ORGANIZING COMMITEE

KoNTekS18 | Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-18

"Challenges and Opportunities of Sustainable Development Toward INDONESIA EMAS 2045"

KUPANG,NUSA TENGGARA TIMUR,24-26 OKTOBER 2024

Diselenggarakan atas kerja sama:

UNIVERSITAS TRISAKTI

UNIVERSITAS UDAYANA

Sponsored by :

HAKI

JASA TIRTA I

INDRA KARYA



ORGANIZING COMMITEE

KoNTekS18 | Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-18

"Challenges and Opportunities of Sustainable Development Toward INDONESIA EMAS 2045"



Editor:

Prof. Dr. Ir. Denik Sri Krisnayanti, ST., MT
Dr. Ir. Remigildus Cornelis, ST., MT
Damianus Eflantus Luhur



KONTEKS18 | Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-18

"Challenges and Opportunities of Sustainable Development Toward INDONESIA EMAS 2045"

STREERING COMMITEE:

Prof.Ir.Yoyong Arfiadi,M.Eng.Ph.D (Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Ir. Ida Ayu Made Budiwati, M.Sc., Ph.D. (Universitas Udayana)
Dr. Ir. Hermawan, ST., MT (Universitas Katolik Soegijapranata)
Prof. Dr. Ir. Wiryanto Dewobroto, M.T (Universitas Pelita Harapan)
Dr. Aksan Kawanda, ST, MT. (Universitas Trisakti)
Dr. techn. Indra Noer Hamdhan, S.T., M.T. (Institut Teknologi Nasional)
Prof.Dr. Ir. Denik Sri Krisnayanti, S.T., M.T (Universitas Nusa Cendana)
Budi Yulianto, ST., MSc., PhD. (Universitas Sebelas Maret)
Dr. Ir. Daniel Christianto, S.T., M.T., IPM (Universitas Tarumanagara)
Ir. Gunaedy Utomo, S.T., M.T. (Universitas Balikpapan)
Dr.Ir. Andi Marini Indriani, S.T., M.T. (Universitas Balikpapan)

ORGANIZING COMMITEE:

Prof. Dr. Ir. Denik Sri Krisnayanti, S.T., M.T. (Universitas Nusa Cendana)
Dr. Ir. Remigildus Cornelis, S.T., M.T. (Universitas Nusa Cendana)
Dr. Ir. Imam Basuki, MT. (Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Dr. Ing. Jack Widjajakusuma (Universitas Pelita Harapan)
Dr. Ir. Hermawan, ST., MT (Universitas Katolik Soegijapranata)
Dr. Achmad Basuki, ST., MT. (Universitas Sebelas Maret)
Dr. Ir. Daniel Christianto, S.T., M.T., IPM (Universitas Tarumanagara)
Ir. Kamaluddin, M.T., M. Kom (Institut Teknologi Nasional)
Dr. Yunita Messah, S.T., M.T. (Universitas Nusa Cendana)
Elsy Hangge, S.T., M.T. (Universitas Nusa Cendana)
Ralno Klau, S.T., M.Ling. (Universitas Nusa Cendana)
Ir. Syamsumarlin,ST (Universitas Nusa Cendana)

KEYNOTE SPEAKERS:

Dr. (H.C.) Ir. H. Mochamad Basuki Hadimoeljono, M.Sc., Ph.D. – Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR)
Prof.Dr.Ir. Buntara Sthenly Gan. – Professor in Structural Engineering, Departement of Architecture, College of Engineering, Nihon University, Koriyama, Japan
Dr. Yunita Afliana Messha, ST.,MT – Dosen Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana

KONTEKS18 | Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-18

"Challenges and Opportunities of Sustainable Development Toward INDONESIA EMAS 2045"

EDITORS:
Remigildus Cornelis (Universitas Nusa Cendana)
Ronaldo Rihi (Universitas Nusa Cendana)
Benny Ardhi Nugroho (Universitas Katolik Soegijapranata)

Reviewers:
Prof.Dr.Ir. AM. Ade Lisantono,M.Eng (Material, Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Prof. Dr. Ir. Wiryanto Dewobroto, M.T (Struktur, Universitas Pelita Harapan)
Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D (Struktur, Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Dr. Ir. Sumiyati Gunawan, ST.,MT. (Geotek, Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Dr. Aazokhi Waruwu, S.T., M.T. (Struktur, Universitas Pelita Harapan)
Dr. Ir. Yudi Nasjono, S.T.,M.T. (Hidro, Universitas Nusa Cendana)
Dr.Ir. Andi Hidayat Rizal, MT (Management, Universitas Nusa Cendana)
Dr. Partogi Simatupang, ST.MT (Struktur, Universitas Nusa Cendana)
Dr.Ir. Andi Kumalawati, MT (Transportasi, Universitas Nusa Cendana)
Dr.-Ing. Ir.Agustina Kiky Anggraini, ST. M.Eng (Hidro, Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Dr. Aksan Kawanda, ST, MT. (Geoteknik, Universitas Trisakti)
Dr. techn. Indra Noer Hamdhan, S.T., M.T. (Geoteknik, Institut Teknologi Nasional)
Dr. Yuki Achmad Yakin, M.T. (Geoteknik, Institut Teknologi Nasional)
Dr. Ir. Imam Basuki, MT. (Transportasi, Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Dr. Achmad Basuki, ST., MT. (Struktur, Universitas Sebelas Maret)
Dr. Galuh Chrismaningwang, ST.MT (Geoteknik, Universitas Sebelas Maret)
Lydia Novitriana Nur Hidayati, ST.M.Sc, Ph.D (Transportasi, Universitas Sebelas Maret)
Yessi Nirwana Kurniadi, S.T., M.T., Ph.D. (Geoteknik, Institut Teknologi Nasional)
Dr. Ir. Wati A Pranoto, M.T. (Hidro, Universitas Tarumanagara)
Dr. Nectaria Putri Pramesti, ST., MT (Management, Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Dr. Ir. Bambang Endro Yuwono, MS (Manajemen, Universitas Trisakti)
Oei Fuk Jin, S.T., M.Eng., D.Eng (Manajemen Rekayasa Kontruksi, Universitas Tarumanagara)
Dr. Ir. Hermawan, ST., MT (Geoteknik, Universitas Katolik Soegijapranata)
Andy Prabowo, S.T., M.T., Ph.D (struktur dan Konstruksi, Universitas Tarumanagara)
Ali Iskandar, S.T., M.T (Geoteknik, Universitas Tarumanagara)
Ir. Vienti Hadsari, ST., M.Eng., MECRES, Ph.D (Geoteknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta)
Ida Bagus Rai Widiarsa, ST., MASc., Ph.D (Struktur, Universitas Udayana)
Made Dodiek Wirya Ardana, ST.MT (Geoteknik, Universitas Udayana)
Dr.Ir. Nyoman Yudha Astana, MT (Manajemen Konstruksi, Universitas Udayana)
Dr.Ir. I Made Agus Ariawan, ST.MT (Transportasi, Universitas Udayana)
I Putu Gustave Suryantara P, ST, M.Eng, Ph.D (Hidro,Universitas Udayana)
Ida Ayu Rai Widhiawati, ST.MT (Infrastruktur dan Lingkungan, Universitas Udayana)
Dr. Lisa Oksri Nelfi, ST., MT., M.Sc (Struktur, Universitas Trisakti)
Dr. Eng. M. Zaki, ST., MT., ISGE (Geotek, Universitas Trisakti)
Dr. Ir. Endah Kurniyaningrum, ST., MT (Hidro, Universitas Trisakti)
Ir. Gunaedy Utomo, S.T., M.T. (Geoteknik, Universitas Balikpapan)
Dr. Ir. Andi Marini Indriani, S.T., M.T. (Geoteknik, Universitas Balikpapan)
Dr.Ing Jack Widjajakusuma (Struktur/Material/Infrastruktur, Universitas Pelita Harapan)

DAFTAR ISI

MAKALAH TEMA MATERIL.....i

MAKALAH TEMA MANAJEMEN KONSTRUKSI …….....ii

MAKALAH TEMA STRUKTURAL.....iii

MAKALAH TEMA GEOTEKNIK.....iv

MAKALAH TEMA HIDRO.....v

MAKALAH TEMA TRANSPORTASI.....vi

DAFTAR ISI BIDANG MATERIAL

EVALUASI STORY DRIFT PADA STRUKTUR GEDUNG PERKANTORAN 5 LANTAI DENGAN SAP2000 Sadvent M Purba[1].....1

PENGARUH ABU TERBANG *(FLY ASH)* SEBAGAI SUBTITUSI PENGGANTI SEMEN *SIKAFUME* TERHADAP PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON NORMAL Fahrizal Zulkarnain[1*], Fadyla Putri.....7

SEISMIK RETROFIT BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING DENGAN PERKUATAN DINDING GESER Junaedi Utomo[1*], Ade Lisantono[2] dan Hermawan[3] 13

KAJIAN SPEKTRUM KAPASITAS NON-ENGINEERED BUILDING (NEB)DENGAN ANALISIS STATIC PUSHOVER Hendramawat Aski Safarizki[1*], Stefanus Adi Kristiawan[2], Senot Sangadji[2], Syarifuddin Nur Wahid[1],dan Rafif Hanan Muwaffaq[1].....28

KARAKTERISTIK AIR ALKALI PH 9 DALAM CAMPURAN MATRIKS-SEMEN Muhammad Noor Asnan[1*] , Muh Syahrul[1] , Vebrian[2], Rusandi Noor[1].....36

STUDI EKSPERIMENTAL PERBAIKAN BETON MENGGUNAKAN SIO2 DAN SUPERPLASTICIZE Ermitha Ambun RD[1*], Lewi Rura[2] dan Hendrik Palilu[4].....43

PENGGUNAAN KARANG JAHE PADA SELF COMPACTING CONCRETE (SCC) MENGGUNAKAN METODE EFNARC Rully Angraeni Safitri[1] dan Intan Sarafina[2].....50

PEMANFAATAN PASIR DAN AIR LAUT SEBAGAI SELF COMPACTING CONCRETE (SCC) DENGAN SERAT BAJA Adnan[1], M. Tumpu[2], Parea R. Rangan[3] dan Mansyur.....56

PENGGUNAAN FLY ASH SEBAGAI BAHAN PENSTABILISASI TANAH LUNAK YANG DIPERKUAT DENGAN SERAT ALAMI M. Tumpu[1], Parea R. Rangan[2] dan Mansyur[3].....64

KUAT LENTUR BALOK BETON YANG MENGGUNAKAN BATANG POHON AREN SEBAGAI TULANGAN Israel Padang[1*], Zwengly Lodi Honta[2], Jufri Manga[3].....74

INOVASI PEMBUATAN GEOPOLIMER SEBAGAI ALTERNATIF MATERIAL ORNAMEN ARSITEKTUR TRADISIONAL BALI BERKELANJUTAN I Nyoman Sutarja[1*], I Nyoman Susanta[2], Muhammad Maheswara Aryasatya[3] dan Ngurah Sedana Putra[4].....82

ANALISIS KETAHANAN WASHOUT DAN KUAT TEKAN PADA UNDERWATER CONCRETE DENGAN BAHAN TAMBAH SILICA FUME DAN LIMBAH STEEL SLAG SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN AGREGAT KASAR Mochamad Solikin, dan Suhendro Trinugroho[1] , Aurelia Hanuun Lintang Mahaputri[2], Yenny Nurchasanah[3].....90

ANALISIS VARIASI DESAIN PENAMPANG FONDASI DALAM TERHADAP EFISIENSI PELAKSANAAN (STUDI KASUS: GEDUNG POLIKLINIK RSUP PROF. DR. I.G.N.G. NGOERAH) I Made Aryatirta Predana[*], Made Dodiek Wirya Ardana, dan I Gede Yogi Gangga Purnawardana.....97

PEMANFAATAN SERAT IJUK SEBAGAI BAHAN STABILISASI (STABILIZING AGENT) PADA CAMPURAN STONE MATRIX ASPHALT KASAR AGREGAT SLAG BANTAENG Alpius[1], R. Irmawaty[2], M. W. Tjaronge[3], S. H. Aly[4].....104

PENENTUAN PARAMETER TANAH UNTUK PERENCANAAN STRUKTUR PENAHAN GALIAN Budi, G. S.[1], dan Neoleinad, W. [2].....112

PENGARUH LOKASI DAN VARIASI KETEBALAN DINDING GESER KANTILEVER PADA BANGUNAN BERTINGKAT SIMETRIS Grisella Audria Gunawan[1], Ade Lisantono[2,*], Yoyong Arfiadi[3], Junaedi Utomo[4].....121

PENGARUH PENAMBAHAN BESTMITTEL TERHADAP KUAT TEKAN DAN KUAT TARIK BELAH BETON Asrul Sani Nafis Sabila Yusro[1], Ivan Arya Buana .[1]Widija Suseno Widjaja[2,] Gabriel Jose Posenti Ghewa[2] 129

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH ABU SEKAM PADI DAN SUPERPLASTICIZER PADA MORTAR TERHADAP KUAT TEKAN Andika Dimas Hartanto[1], Kalfin Candra Andika[2,]Widija Suseno Widjaja [3,] Gabriel Jose Posenti Ghewa[4] 139

PENGEMBANGAN AWAL BETON KINERJA TINGGI MENGGUNAKAN MATERIAL QUARRY BAJAWA DAN QUARRY NOBO DI NTT Partogi H. Simatupang*, Agusto Y. L. Wona[2], dan Dominikus P. S. Riberu[3].....151

STUDI NUMERIK KINERJA BANGUNAN RUMAH TINGGAL SEDERHANA TERHADAP BAHAYA GEMPA BUMI Edy Purwanto[1)], SA Kristiawan[1)], Achmad Basuki[1)], Ahda Dinansya Trisnawan Putra[1)1)] , Arda Arditama.....159

STUDI AWAL PENGEMBANGAN METODE PERAWATAN BETON DENGAN METODE BIOMINERALISASI : LITERATURE REVIEW Alvin Alfredo Bara[1*] dan Remigildus Cornelis[1].....165

PEMANFAATAN BAHAN PET TERHADAP DAYA SERAP AIR PADA BETON PRACETAK TIPE U-DITCH Siti Abadiyah[1], Sarizwandi Bin Sahrul[2].....172

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG REHABILITASI BALOK JEMBATAN DENGAN SPALLING MENGGUNAKAN SIKA GROUTING DAN GFRP Achmad Zultan Mansur[1*], Daud Nawir[1].....177

AGREGAT BUATAN UNTUK BETON YANG TERBUAT DARI PLASTIK PET (Polyethylene Terephthalate) DENGAN CAMPURAN ABU SEKAM PADI Ketut Aswatama Wiswamitra[1], Ary Wahyu Perdana[1], Krisnamurti[1].....184

ANALISIS KARAKTERISTIK BAMBU SEBAGAI MATERIAL DINDING NON STRUKTURAL Desi Putri*, Astuti Masdar[2], Endah Lestari[1] dan Abdul Rokhman[3].....192

APLIKASI METODE KEKAKUAN UNTUK MENGHITUNG DISTRIBUSI GAYA TIANG FONDASI DENGAN MODEL KEPALA TIANG KAKU Yoyong Arfiadi[1*] dan Richard Frans[2].....198

APLIKASI SELF HEALING MORTAR BERBASIS BAKTERI UREOLITIK MELALUI METODE PERENDAMAN Stefani Rahmawati Fanesa Mangngi[1*], Remigildus Cornelis[2], Denik Sri Krisnayanti[3].....208

DETEKSI KERUSAKAN PADA STRUKTUR RANGKA BATANG RUANG DENGAN MENGGUNAKAN BINARY BAT ALGORITHM DAN EUCLIDEAN DISTANCE SEBAGAI FUNGSI OBYEKTIF Richard Frans[1*] dan Yoyong Arfiadi[2].....214

EFEKTIFITAS SABUT KELAPA SEBAGAI STABILIZING AGENT DALAM CAMPURAN STONE MATRIX ASPHALT AGREGAT SLAG NIKEL Abdias Tandy Arrang[1], Rita Irmawaty[2], Rudy Djamaluddin[3], dan Herman Parung[4].....221

EVALUASI STORY DRIFT PADA STRUKTUR GEDUNG PERKANTORAN 5 LANTAI DENGAN SAP2000

Sadvent M Purba[1],

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan,*
Jl. MH Thamrin Boulevard 1100, Banten.
e-mail: sadvent23@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia, yang terletak di dalam Cincin Api Pasifik, adalah wilayah yang sangat rentan terhadap gempa bumi dengan intensitas tinggi. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan infrastruktur yang mampu menahan gempa untuk memastikan keselamatan dan ketahanan struktur dalam jangka panjang. Laporan ini bertujuan untuk menganalisis sebuah gedung perkantoran lima lantai di Kemang, Jakarta Selatan, sesuai dengan persyaratan dalam SNI 1726:2019 tentang ketahanan gempa untuk struktur bangunan.Analisis dilakukan dalam tiga tahap utama: pra-analisis, analisis, dan kesimpulan. Tahap pra-analisis meliputi penentuan lokasi, peruntukan, dimensi gedung, serta perhitungan N-SPT dan respons spektrum gempa. Tahap analisis mencakup perhitungan manual dan penggunaan aplikasi SAP2000 untuk menentukan apakah gedung memenuhi persyaratan SNI 1726:2019. Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung tersebut tidak aman terhadap gempa karena nilai simpangan antar lantai melebihi batas yang diizinkan. Simpangan antar lantai respon spektrum arah-x ada pada lantai 2 sebesar 565, 06 mm, arah-y ada pada lantai 2 sebesar 691,45 mm sedangkan kinerja batas ultimit strory drift izin adalah 46,15 pada kedua arah. Kesimpulan dari laporan ini menegaskan bahwa gedung perlu didesain ulang dengan perkuatan tambahan, seperti perkuatan sambungan balok kolom, penambahan dinding geser, atau penggunaan kolom dan balok yang lebih besar untuk memenuhi persyaratan keamanan gempa.Evaluasi dan desain yang lebih detail diperlukan untuk memastikan keamanan dan ketahanan struktur terhadap gempa.

Kata kunci: struktur tahan gempa, simpangan antar lantai, SAP2000, SNI 1726:2019, analisis seismik

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Indonesia merupakan negara yang terletak di dalam Ring of Fire, yang dikenal sebagai kawasan dengan aktivitas seismik tinggi. Hal ini menjadikan Indonesia sangat rentan terhadap kejadian gempa bumi dengan intensitas serta magnitudo yang tinggi. Selain itu, sebagai negara berkembang, Indonesia memerlukan infrastruktur yang kuat dan tahan gempa untuk mengakomodasi pertumbuhan penduduk dan kebutuhan ekonomi yang terus meningkat. Pembangunan infrastruktur yang tahan gempa sangat penting untuk memastikan keselamatan penghuni serta menjaga ketahanan bangunan dalam jangka waktu panjang. Salah satu standar yang digunakan dalam perencanaan dan analisis ketahanan gempa di Indonesia adalah SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung. Standar ini menetapkan persyaratan minimum yang harus dipenuhi oleh bangunan agar dapat bertahan dan tetap fungsional selama dan setelah terjadinya gempa bumi. Dalam konteks ini, penggunaan perangkat lunak analisis struktural seperti SAP2000 menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa desain bangunan memenuhi standar ketahanan gempa yang telah ditetapkan.

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis ketahanan gempa pada sebuah gedung 5 lantai yang terletak di Kemang, Jakarta Selatan, sesuai dengan persyaratan dalam SNI 1726:2019. Analisis ini mencakup beberapa tahap, yaitu:

1. **Tahap Pra-Analisis**: Meliputi penentuan lokasi, peruntukan, dan dimensi gedung, serta perhitungan N-SPT dan respons spektrum gempa untuk lokasi tersebut.
2. **Tahap Analisis**: Dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk menghitung simpangan antar lantai dan gaya geser dasar seismik, serta membandingkan hasil perhitungan dengan persyaratan dalam SNI 1726:2019.
3. **Tahap Kesimpulan**: Menyimpulkan apakah gedung telah memenuhi persyaratan ketahanan gempa yang ditetapkan dan memberikan rekomendasi perkuatan jika diperlukan.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai pentingnya desain struktural yang tahan gempa serta langkah-langkah yang diperlukan untuk memastikan keselamatan dan ketahanan bangunan di wilayah yang rawan gempa.

2. LANDASAN TEORI

Konsep dasar gempa bumi dan struktur tahan gempa. Gempa bumi adalah fenomena alam yang disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik yang melepaskan energi dalam bentuk gelombang seismik. Struktur bangunan harus dirancang untuk menahan beban dinamis yang dihasilkan oleh gempa bumi, yang sering kali lebih kompleks dan berbahaya daripada beban statis. Oleh karena itu, penting untuk memahami karakteristik gempa bumi dan bagaimana bangunan meresponsnya

Standar perencanaan ketahanan gempa di indonesia (SNI 1726:2019). SNI 1726:2019 adalah standar yang digunakan di Indonesia untuk perencanaan ketahanan gempa pada struktur bangunan gedung dan non-gedung. Standar ini mengatur persyaratan minimum yang harus dipenuhi oleh bangunan agar dapat bertahan selama dan setelah gempa bumi terjadi. Beberapa aspek penting dari standar ini meliputi penentuan beban gempa, respon spektrum, serta koefisien modifikasi respons yang sesuai dengan tipe struktur dan lokasi geografis

Analisis dinamis menggunakan SAP2000. SAP2000 adalah perangkat lunak analisis struktural yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis respons struktur terhadap beban, termasuk beban gempa. Dalam analisis ini, SAP2000 digunakan untuk melakukan analisis modal dan analisis respons spektrum untuk menentukan periode getar alami bangunan serta distribusi gaya gempa pada setiap lantai.

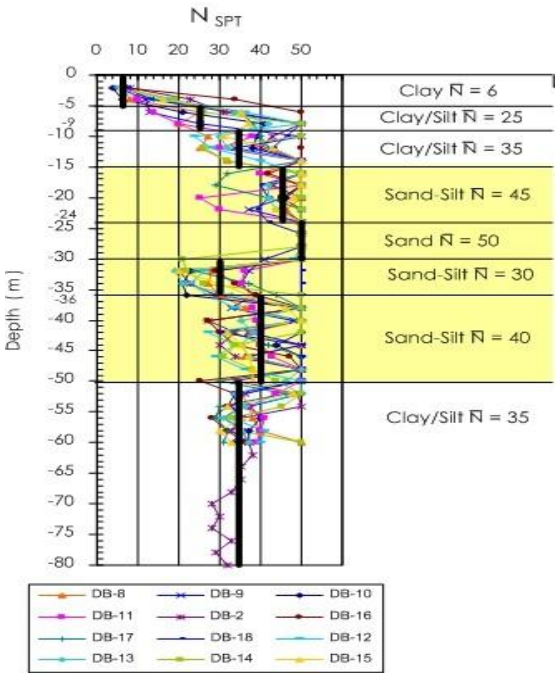
Simpangan antar lantai (story drift). Simpangan antar lantai adalah pergeseran relatif antara dua lantai berturut-turut yang terjadi akibat beban lateral, seperti gempa bumi. Standar SNI 1726:2019 mengatur batas maksimum simpangan antar lantai untuk memastikan bahwa deformasi bangunan tetap dalam batas yang aman dan tidak menyebabkan kerusakan signifikan pada elemen struktural maupun non-struktural.

Perkuatan struktur. Untuk memastikan bahwa bangunan dapat menahan gempa dengan aman, beberapa metode perkuatan dapat diterapkan, seperti peningkatan ukuran dan kekuatan elemen struktural (balok dan kolom), serta penambahan elemen struktural khusus seperti dinding geser (shear wall). Dinding geser adalah elemen vertikal yang didesain untuk menahan gaya lateral dan membantu mengurangi simpangan antar lantai. Dengan landasan teori ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi ketahanan gempa bangunan 5 lantai menggunakan perangkat lunak SAP2000 dan memastikan bahwa desain bangunan memenuhi persyaratan standar ketahanan gempa yang berlaku di Indonesia

3. DATA DAN PEMODELAN

Lokasi dan spesifikasi gedung, Lokasi: Kemanhg, Jakarta Selatan. Jenis Bangunan: Gedung perkantoran 5 lantai. Dimensi: Panjang 30 meter, lebar 20 meter, dan tinggi total 20 meter (dengan masing-masing lantai setinggi 4 meter)

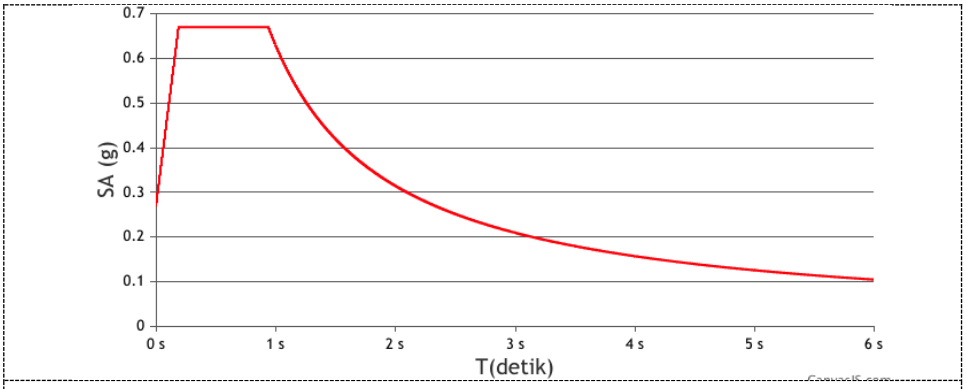
Data tanah hasil borlog. Berdasarkan data tanah hasil borlog pada area sekitar bangunan gedung Menara Z di atas, didapakan nilai N30 rata-rata sebesar 27,135. Nilai ini berada di antara nilai 15 – 50 yang artinya termasuk dalam kelas situs SD (tanah sedang). Namun karena hanya terdapat satu data tanah dari minimal dua yang disyaratkan dalam SNI 1726:2012 pasal 5.1. dan SNI 1726:2019 pasal 5.1. maka kelas situs yang digunakan bukan lagi SD (tanah sedang) tetapi SE (tanah lunak) untuk mendapatkan hasil yang lebih konservatif



Gambar 1. Analisis N-SPT di Kemang Jakarta (Firmansyah, 2011)

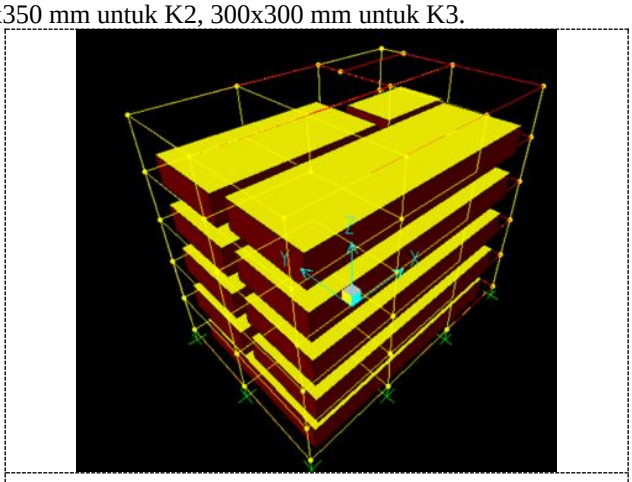
Parameter gempa dan material struktur. Data gempa berdasarkan peta zonasi gempa Indonesia. Respon spektrum gempa

untuk lokasi Kemang, Jakarta Selatan. Nilai Ss diambil sebesar 0.75g, nilai S1 diambil sebesar 0.35g. Faktor amplikasi getaran Fa sebesar 1.20 dan Fv sebesar 1,95. Nilai S_{DS} sebesar 0,60 g dan nilai S_{D1} sebesar 0,46 g. T0 = 0,19 detik, Ts= 0,94 detik, Beton bertulang dengan mutu beton K-300. Baja dengan mutu baja ASTM A36.



Gambar 2. Spektrum Respon Desain, Jakarta Selatan, Kelas SE-Tanah Lunak

Pemodelan struktur menggunakan SAP2000. Kolom dan balok struktur bangunan ini menggunakan material beton dengan mutu 30 MPa, menandakan kekuatannya yang tinggi dalam menahan beban tekan. Beton ini memiliki berat jenis 2400 kg/m3, menunjukkan kepadatan material yang cukup untuk memberikan struktur yang kokoh dan stabil. Elastic modulus yang digunakan pada beton menggunakan rumus 4700 x v fc' MPa. Balok digunakan ukuran 400 x 200 mm. Pelat lantai yang digunakan adalah slab beton dengan tebal 120 mm yang sama di setiap lantai. Ukuran masing-masing kolom 400x400 mm untuk K1, 350x350 mm untuk K2, 300x300 mm untuk K3.



Gambar 3. Pemodelan Mengggunakan SAP2000 (Tampak Samping)

Perhitungan pembebanan struktur. Dari hasil perhitungan, ditentukkan total beban kolom untuk seluruh gedung sebesar 499.55 kN. Total beban balok untuk seluruh gedung sebesar 1152.32 kN. beban pelat total untuk seluruh gedung adalah 3490.85 kN. Total beban gravitasi sebesar 2945,16 kN. Beban total untuk seluruh gedung ditentukkan dari tambahan dari beban mati akibat kolom, balok dan pelat lantai dan juga beban gravitasi yang telah dihitung dari lantai dasar sampai lantai atap yakni 8087,89 kN

.

4. ANALISA DAN KESIMPULAN

Perhitungan untuk menentukan geser dasar seismic (V). Perhitungan untuk geser dasar seismik dengan V = Cs.W diperoleh geser seismik arah V-x = 616,255 kN dan V-y = 616,255 kN. Distribusi Gempa selanjutnya dikalikan 0,85 V-x = V-x = 523,82 kN. Distribusi beban lateral pada setiap lantai disajikan melalui tabel berikut:

Tabel 1. Distribusi Gempa Vertikal Arah X dan Y

Lantai	hi (m)	W (kN)	Wx.hi^k (kNm)	Cvx	Fi (kN)	100% (kN)	30% (kN)
GF	0	1810.76	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00

Lt.1	3	1406.80	4831.041	0.07	36.963	36.963	11.09
Lt.2	6	1406.80	10521.979	0.15	80.506	80.506	24.15
Lt.3	9	1406.80	16590.058	0.24	126.934	126.934	38.08
Lt.4	12	1406.80	22916.807	0.33	175.341	175.341	52.60
Lt.5	15	649.91	13602.077	0.20	104.072	104.072	31.22
	Total		8087.89	68461.96	1.00	523.817	523.817

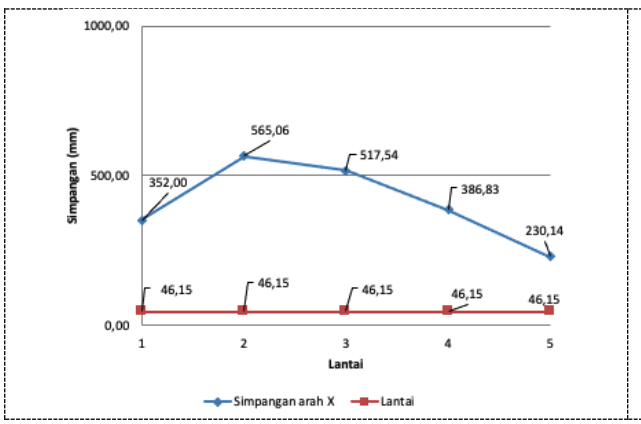
Hasil analisa struktur dan simpangan antar lantai tingkat. Nilai δxe adalah nilai simpangan yang didapatkan dari simulasi dalam SAP2000. Dalam perhitungan ini rumus diatas digunakan dua kali untuk menentukkan dua jenis simpangan yaitu simpangan total pada suatu tingkat dan simpangan antar tingkat. Perbedaan antara dua nilai ini adalah nilai δxe yang digunakan pada rumus diatas, Dimana perhitungan simpangan total menggunakan hanya nilai simpangan δxe untuk tingkat yang ditinjau sedangkan perhitungan simpangan antar tingkat menggunakan nilai simpangan δxe yang ditemukan dari pengurangan nilai δxe pada tingkat di bawah dari nilai δ xe dari Tingkat yang ditinjau. Dalam perhitungan di excel simpangan total, Δ disebutkan sebagai perpindahan total dan simpangan antar tingkat, δ disebut sebagai story drift.

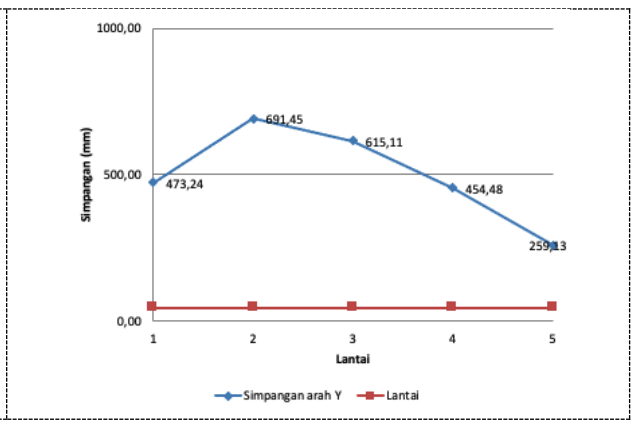
Tabel 2. Simpangan Antar Lantai Respon Spektrum Arah-X (Kinerja Batas Ultimit)

Lantai	Elevasi	Perpindahan Lantai δxe(mm)	Perpindahan Total δx(mm)	Story Drift Δ (mm)	Story Drift izin Δa (mm	Status
Lt.1	3	63.99922	351.99571	352.00	46.15	tidak aman
Lt.2	6	166.73726	917.05	565.06	46.15	tidak aman
Lt.3	9	260.83624	1434.60	517.54	46.15	tidak aman
Lt.4	12.4	331.16876	1821.43	386.83	46.15	tidak aman
Lt.5	15	373.0127	2051.57	230.14	46.15	tidak aman

Tabel 3. Simpangan Antar Lantai Respon Spektrum Arah-Y (Kinerja Batas Ultimit)

Lantai	Elevasi	Perpindahan Lantai δxe(mm)	Perpindahan Total δx(mm)	Story Drift Δ (mm)	Story Drift izin Δa (mm	Status
Lt.1	3	86.04371	473.240405	473.24	46.15	tidak aman
Lt.2	6	211.76199	1164.69	691.45	46.15	tidak aman
Lt.3	9	323.6004	1779.80	615.11	46.15	tidak aman
Lt.4	12.4	406.23279	2234.28	454.48	46.15	tidak aman
Lt.5	15	453.34772	2493.41	259.13	46.15	tidak aman





Gambar 4a. Simpangan antar Lantai X)	Gambar 4b.Simpangan antar Lantai Y

5. KESIMPULAN.

Analisis dengan SAP 2000 menunjukkan bahwa bangunan dengan beban gempa SNI 1726:2019 di Kemang, Jakarta, tidak aman saat gempa terjadi. Pada hasil simpangan atau defleksi yang terjadi telah melebihi batas simpangan yang ada di syarat SNI 1726:2019. Meskipun pembebanan dari gempa respon spektrum diperbesar dengan faktor skala SNI, bangunan tetap harus di desain kembali dengan beberapa perkuatan untuk memenuhi syarat keamanan. Salah satu cara untuk membuat banguan untuk lebih tahan akan gaya gempa yang terjadi adalah dengan memberikan tambahan perkuatan di bagian sambungan balok kolom atau juga memperbesar kolom dan balok yang digunakan. Selain itu solusi lain juga dapat diberikan yaitu penambahan dinding geser atau shear wall. Dinding geser merupakan dinding yang di desain khusus pada sebuah bangunan untuk berfungsi sebagai penahan beban seismik dan beban lateral lainnya. Dengan demikian hasil dari analisis ini bangunan perlu di evaluasi dan di desain kembali. Perlu diingatkan bahwa hasil analisis menggunakan aplikasi SAP 2000 versi student yang merupakan aplikasi lama. Hasil analisis dapat berbeda jika menggunakan beberapa aplikasi analisis struktur yang lebih akurat seperti ETABS atau BIM. Selain itu bangunan yang di desain merupakan bangunan sederhana yang gampang untuk dianalisis. Untuk pemahaman yang lebih jelas dan detail, diperlukan evaluasi perhitungan dengan aplikasi yang lebih akurat dan desain yang lebih detail.

DAFTAR PUSTAKA

Firmansyah, I. (2011, August 25). Simplified Soil Profiles dan Daya Dukung Fondasi Tiang di Jakarta.https://irawanfirmansyah.wordpress.com/2011/08/25/simplified-soil-profiles-dan-daya-d ukung-fondasi-tiang-di-jakarta/

Saputra, E. (2018, April 16). Perkembangan Peraturan Ketahanan Gempa di Indonesia. Retrieved from Catatan Kuliah Belajar Ilmu Teknik Sipil dan Kegempaan: https://farmadel.wordpress.com/2018/04/16/perkembangan-peraturan-ketahanan-gempa-di-indonesia/

SNI 1726. (2012). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

SNI 1726. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

SNI 1727. (2020). Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Sodik, A. S., & Andayani, R. (2021). Pengaruh Penerapan SNI 1726:2019 Terhadap Desain Struktur Rangka

Pengaruh Abu Terbang (*Fly Ash*) Sebagai Subtitusi Pengganti Semen *Sikafume* Terhadap Pengujian Kuat Tekan Beton Normal

Fahrizal Zulkarnain[1*], Fadyla Putri

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jl. Kapten Mukhtar Basri No.3 Medan*
e-mail: fahrizalzulkarnain@umsu.ac.id
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jl. Kapten Mukhtar Basri No.3 Medan,
e-mail: fadillahputri907@gmail.com

ABSTRACT

Satu dari substansi umum yang diaplikasikan pada struktur adalah beton. Manfaat beton lebih besar daripada material bangunan lainnya. Untuk mengetahui seberapa baik jumlah abu terbang yang berbeda bekerja sebagai pengganti semen dalam beton, para ilmuwan melakukan eksperimen. Dua belas sampel berumur 28 hari digunakan untuk mengevaluasi bumbung beton berdimensi 150 mm x 300 mm. Tujuan penelitian ini adalah memastikan proporsi paduan beton yang menyertakan *fly ash* sebagai pengganti semen *sikafume* selama pengujian kuat tekan dan untuk memeriksa dampak substitusi ini pada sifat beton. Abu terbang disertakan dalam campuran beton pada 7,5%, 10%, dan 12,5% berat, dengan sikafume menyumbang 20% dari total. Menurut hasil, 25 MPa adalah kuat tekan yang diinginkan agar beton dapat mengeras. Menurut hasil penelitian, kuat tekan variasi BN yang khas adalah 11,54 MPa. Pada saat yang sama, BFS pada persentase 7,5% juga tercatat pada 11,54 MPa, BFS pada 10% pada 11,06 MPa, dan BFS pada 12,5% pada 10,69 MPa.

Kata kunci: *fly ash, sikafume,* kuat tekan beton

Latar Belakang

Percepatan pembangunan di Indonesia semakin kilat, dan semakin merambah ke daerah pedesaan dan perkotaan, khususnya dalam upaya untuk meningkatkan masyarakat yang kurang berkembang. Namun, selama memenuhi kriteria beton yang relevan di Indonesia, beton dengan kualitas sedang sudah cukup untuk pembangunan perumahan umum. Mengurangi rasio semen-kerikil-pasir untuk memenuhi kebutuhan masyarakat merupakan salah satu pendekatan untuk meningkatkan standar kualitas pembangunan rumah (Ahmad, 2011). Campuran air, pasir, kerikil, dan semen hidrolik seringkali semen *Portland*) merupakan bahan penyusun beton. Anda juga dapat membuat massa padat dari beton dengan mencampurnya dengan berbagai komponen. Untuk membuat beton basah yang mudah dikerjakan, campuran beton harus dihitung secara tepat. Dapatkan kekuatan tekan setelah kering dan nikmati manfaat biaya. Insinyur struktur sering menggunakan beton sebagai bahan bangunan karena banyak manfaatnya. Beton memiliki beberapa manfaat, seperti menggunakan bahan yang mudah didapat, memiliki proses produksi yang mudah, mudah dibentuk, dan tahan terhadap api serta berbagai kondisi cuaca. Berat komponen struktural yang besar, waktu pengeringan yang lama, dan kekuatan tarik beton yang rendah menjadikannya pilihan yang buruk untuk banyak aplikasi. Memperhatikan kepadatan beton dengan saksama sangat penting untuk mencapai kualitas beton yang optimal (Tarru, 2018).

Saat merencanakan rangka bangunan, beton merupakan salah satu material yang sering dipertimbangkan. Balok, kolom, pelat lantai, dan girder untuk jembatan dan struktur lainnya merupakan bagian dari proses desain beton. Jika dibandingkan dengan material konstruksi lainnya, beton memiliki beberapa manfaat. Anda dapat membentuknya sesuai dengan kebutuhan dan keinginan Anda, dan dapat menahan beban tekan dengan mudah. Beton juga cukup serbaguna untuk digunakan untuk konstruksi berat dan ringan. Selain itu, beton tidak memerlukan banyak perawatan (Setiawati, 2018).

Sekilas, beton terlihat cukup simpel. Namun, jika diperhatikan dengan lebih teliti, beton sebagai bahan komposit memiliki sejumlah masalah. Bayangkan kita ingin mengaduk campuran yang beraneka ragam seperti dawet atau cendol, namun kita ingin semua bahan tercampur dengan sempurna. Campuran beton tidak akan segera mengeras, melainkan memerlukan waktu untuk proses reaksi hidrasi antara air dan semen. Setiap unsur memiliki berat yang berbeda, sehingga unsur yang lebih berat, seperti agregat, cenderung bergerak ke bawah, sementara yang lebih ringan, seperti air, cenderung bergerak ke atas (Zulkarnain, 2021).

Saat agregat, semen, dan air dicampur saat masih dalam kondisi plastis, mereka diaduk untuk membuat beton. Beton lebih mudah dikerjakan karena kualitas-kualitas ini. Sifat-sifat ini memungkinkan untuk membentuk beton agar sesuai dengan kebutuhan pengguna. Reaksi kimia yang menyebabkan material yang digabungkan mengeras dan menjadi lebih kuat sering terjadi selama tahap pencampuran, yang juga dikenal sebagai momen (Ahmad, 2011). Desain campuran, jenis material, dan kontrol kualitas secara keseluruhan dapat digunakan untuk menganalisis dan menilai keberadaan dan kekuatan beton. Berdasarkan proporsi umum yang ditemukan dalam suatu kombinasi (Raja, 2021).

Beton yang dicampur menggunakan teknik volume absolut (campuran berat-volume) biasanya memiliki kandungan rongga udara berkisar antara 1% hingga 3% untuk beton yang didistribusikan dengan air dan 4% hingga 8% untuk pasta semen (kombinasi semen dan air) untuk mendapatkan kekuatan optimal dari desain. Lebih jauh, antara 25% hingga 40% agregat adalah agregat halus, dan antara 60% hingga 75% adalah agregat total (Raja, 2021). Untuk mengubah kualitas dan fitur beton, beberapa komponen ditambahkan ke dalam campuran saat sedang dicampur. Bahan-bahan ini disebut aditif. Waktu pemrosesan, kecepatan pengerasan, kuat tekan, dan biaya semuanya dapat ditingkatkan dengan modifikasi ini. Produk sampingan mineral lain dari pengabuan batu bara di generator uap adalah abu terbang. Kemampuan pozolanik dari abu ini disertai dengan penampilannya yang halus dan bulat. Pemanfaatan abu terbang sebagai bahan dalam beton superior telah menjadi subjek dari beberapa penelitian. Penambahan *fly ash* dapat meningkatkan resistivitas material, sifat kedap air, dan ketahanan terhadap sulfat sekaligus membuatnya lebih mudah diaplikasikan (Tarigan, 2017).

Satu dari beberapa bahan *sikafume*, bahwa membentuk material berwujud bundar sangat lembut dengan ukuran diameter 1/100 dari diameter partikel semen *Portland*. *Sikafume* berperan sebagai bahan penambah diantara komponen semen. Dengan memasukkan *sikafume* ke dalam adukan beton dalam jumlah khusus, porositas beton dapat diturunkan, kesesuaian beton meningkat, dan akhirnya kuat tekan beton juga akan mengalami peningkatan (Zulkarnain, 2021).

Karakteristik pozolan ditunjukkan oleh *fly ash*, produk sampingan halus dari pembakaran batu bara. Jika dibandingkan dengan semen, *fly ash* tidak dapat mengikat beton. Silika oksida dalam *fly ash* menyebabkan reaksi kimia dengan kalsium hidroksida dalam semen jika dicampur dengan air dan partikel kecil lainnya. Material dengan kemampuan mengikat akan dihasilkan melalui teknik ini. Tujuan dari riset setudi ini adalah menentukan kekuatan tekan beton yang mengandung abu terbang substitusi sebagian semen dalam campuran beton tradisional dan membandingkan kuat tekan beton konvensional dan beton berbasis abu terbang (Anggarini, 2023). Penelitian ini menyarankan abu terbang sebagai subtitusi semen dalam pembentukan beton, sebagai tanggapan atas kesulitan dihadapi, maka abu terbang digunakan elemen tambahan sebagai subtitusi semen.

Material

Tidak ada bahan tambahan atau unsur dapat menurunkan mutu beton ditambahkan pada bahan digunakan untuk penelitian, yang meliputi semen PCC tipe I, pasir, kerik, dan air dari PDAM. Selain itu, abu terbang yang digunakan merupakan hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik. Batu bara yang meleleh saat dibakar akan membentuk zat anorganik yang disebut abu terbang.

Sesuai dengan persyaratan SNI dan proses yang diuraikan dalam buku pegangan teknologi beton, agregat dipilih terlebih dahulu dan kemudian diperiksa. Agregat pecah dan agregat halus menjalani pengujian berikut:

1. Analisa gradasi (SNI ASTM C136, 2012)
2. Berat jenis kasar (SNI 1969, 2016)
3. Berat jenis halus (SNI 1970, 2016)
4. Berat isi (SNI 1973, 2008)
5. Kadar air (SNI 1971, 2011)
6. Kadar lumpur (SNI 03-4141-1996)

Benda Uji

Objek pengujian berbentuk silinder, memiliki panjang 15 x 30 cm, digunakan dalam pengujian. Dengan menggunakan rasio % abu terbang terhadap berat semen, kami menentukan nilai kuat tekan dengan menambahkan sejumlah abu terbang yang berbeda. Tabel 1 menampilkan berbagai jenis benda uji.

Tabel 1. Sampel dan variasi penggunaan abu terbang dan sikafume

No	Kode Sampel	Abu Terbang (%)	Sikafume (%)	Total Sampel
1	BTN	0	20	3
2	BFS_1	7,5	20	3
3	BFS_2	10	20	3
4	BFS_3	12,5	20	3

Dimana:

BN = Beton Normal

BFS_1 = Beton dengan penambahan *Fly Ash* 7,5% + Sikafume 20%

BFS_2 = Beton dengan penambahan *Fly Ash* 10% + Sikafume 20%

BFS_3 = Beton dengan penambahan *Fly Ash* 12,5% + Sikafume 20%

Kuat Tekan

Saat mengevaluasi kekuatan tekan beton, variasi beton dikenai sejumlah tekanan tertentu menggunakan

peralatan uji tekan hingga pecah. Bila bahan-bahan dalam beton dicampur dalam jumlah yang tepat, material yang dihasilkan memiliki kuat tekan yang tinggi. Reaksi kimia tidak dapat dimulai tanpa sejumlah air tertentu. terjadi saat beton mengering. Menurut (Idris, 2023), & SNI 1974:2011 dapat digunakan untuk menentukan daya dukung tekan beton.

Spesimen silinder berukuran 15x30 sentimeter mengukur kekuatan tekan beton. Selama pengujian, jarum mengukur beban P, yang merupakan singkatan dari Peak Force. Ini adalah nilai maksimum yang dapat dicatat sebelum material mulai menunjukkan retak, patah, atau kerusakan. Rumus (1) dapat mencari kekuatan tekan beton (Sultan et al., 2019).

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

P = beban tekan (kg)

A = luas bidang tekan (mm^2)

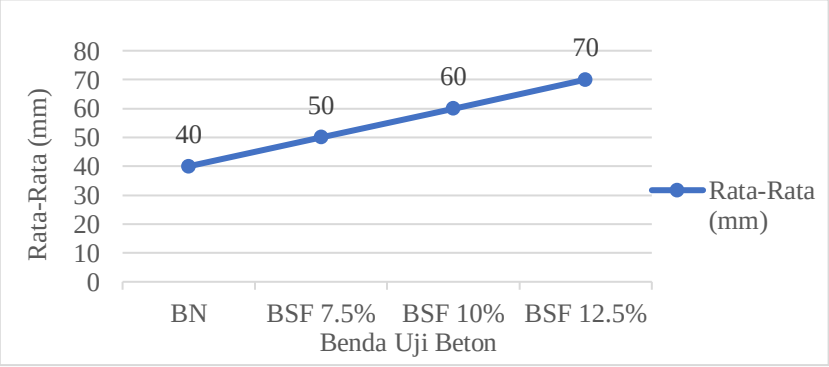
Hasil Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan memastikan hasil kekuatan tekan beton dan untuk memeriksa dampak dari substitusi sebagian semen dengan *fly ash* dan *sikafume*. Setelah beton berada dalam campuran selama 28 hari, pengujian dilakukan oleh SNI (2011).

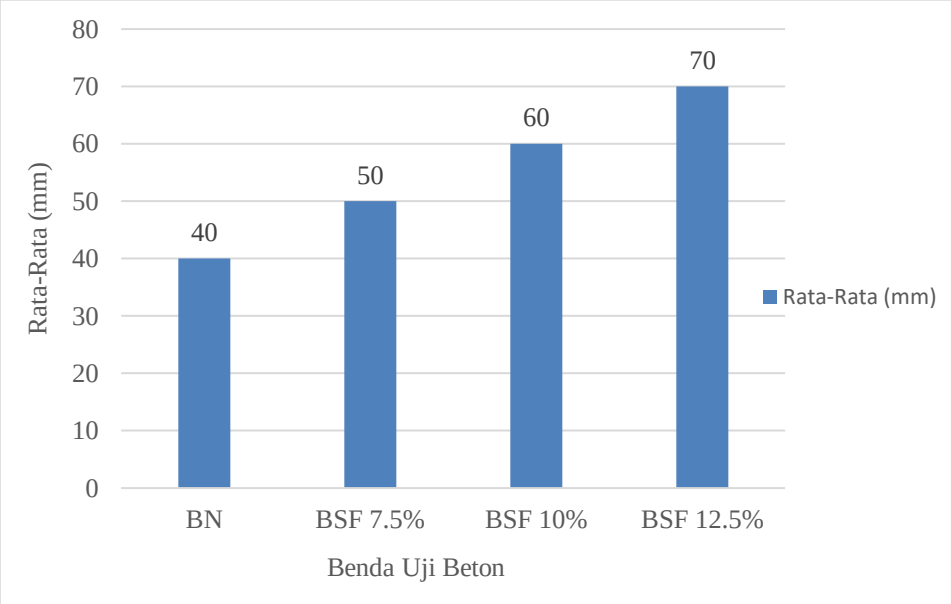
Tabel 2. Menggambarkan hasil slump

No	Variasi	Hasil Slump (mm)
1	BTN	40
2	BFS 7,5% + SF 20%	50
3	BFS 10% + SF 20%	60
4	BFS 12,5% + SF 20%	70

Standar (SNI 7656:2012, 2012) mendiktekan prosedur untuk melakukan uji slump. Tujuan pengujian slump adalah untuk menentukan seberapa mudah campuran beton baru yang sesuai dengan kode dan mencakup semua aditif yang diperlukan dapat diproses. Uji slump dilaksanakan dengan mengisi kerucut Abrams menggunakan tiga lapisan lapisan beton yang baru dituang. Karena setiap lapisan mencakup lebih dari sepertiga dari total volume kerucut, semua bahan yang diproduksi harus mewakili campuran ini. Untuk menyelesaikan proses, penusuk harus ditusuk 25 kali, satu untuk setiap lapisan. Sesudah penambahan berakhir, menyetarakan limas dan istirahatkan dalam 10 detik. Kemudian, jaga limas tetap berdiri sampai seluruh campuran beton telah diperas keluar dari cetakan, dan kemudian mengukur hasil campuran. Tabel 3 menampilkan temuan uji *slump*, yang ditentukan oleh perbedaan tinggi antara kerucut dan campuran.



Gambar 1.Hasil pengujian *slump test.*



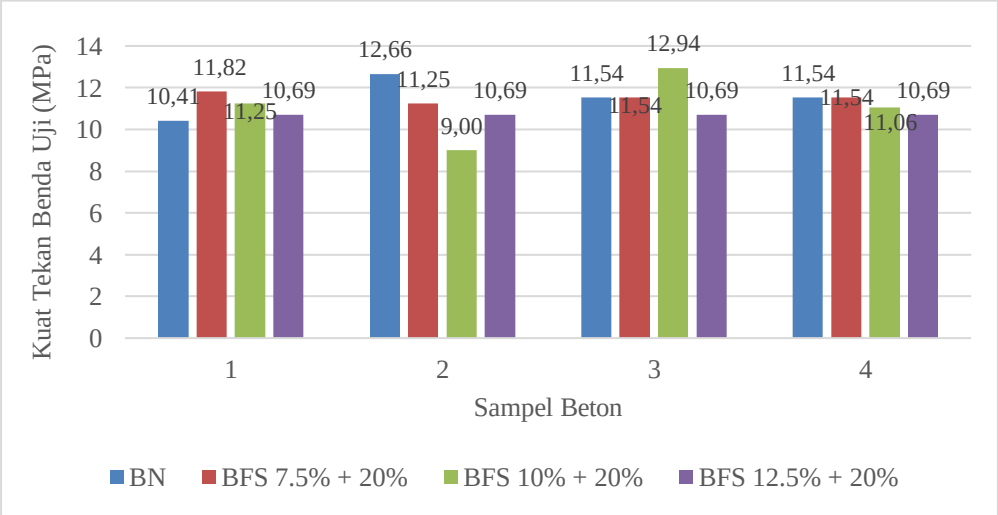
Gambar 2. Hasil slump *test*.

Berdasarkan grafik slump yang ditampilkan, terdapat peningkatan pada beton normal saat ditambahkan *fly ash* dan *sikfume* di setiap variasi yang bertambah.

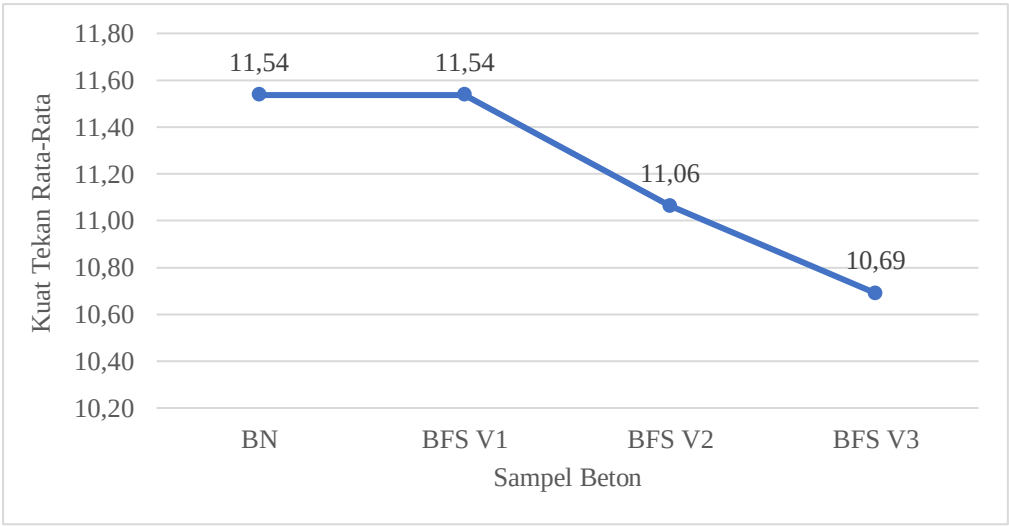
Tabel 3. Menunjukkan Kekuatan Tekan Beton

Variasi Beton	Kekuatan Tekan Beton (MPa)			Rata-Rata (MPa)
BN	10,41	12,66	11,54	11,54
BFS 7,5%	11,82	11,25	11,54	11,54
BFS 10%	11,25	9,00	12,94	11,06
BFS 12,5%	10,69	10,69	10,69	10,69

Keterangan:
BN = Beton Normal
BFS = Beton *Fly Ash Sikafume*



Gambar 3. Hasil pengujian tekanan maksimum



Gambar 4 Menunjukkan linear dari pengujian kekuatan tekan.

Berdasarkan Tabel 3, kombinasi BFS 7,5% dan 20% menghasilkan kekuatan tekan beton tertinggi adalah 11,54 MPa di semua variasi benda uji. Sementara itu, BFS 12,5% + 20% mencapai 10,69 MPa, sedangkan BFS 10% + 20% mencatat nilai sebesar 11,06 MPa. Terdapat pengaruh terhadap perubahan nilai satuan benda uji dan terhadap variasi kandungan abu terbang dan sikafume, berdasarkan data yang ditampilkan.

KESIMPULAN

Dalam hasil pengujian kekuatan tekan, rerata sampel beton BFS 7,5% dan sampel beton tipe normal (BN) adalah 11,54 MPa. Abu terbang dan sikafume menurunkan kekuatan sampel beton. Sampel BFS 12,5 mengalami penurunan kekuatan yang signifikan, yaitu sebesar 10,69 MPa, dibandingkan dengan 11,06 MPa yang diperoleh sampel BFS 10.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, I. (2011). Analisis Perbedaan Kuat Tekan Beton Tambahan Abu Terbang Dengan Beton Normal Yang Direndam Dalam Asam Sulfat Untuk Beton Mutu Rendah. *Konstruksia*, *2*(2), 1–8.

Anggarini, E. (2023). *E-Issn: 2656-6001*. 51–62.

Badan Standarisasi Nasional Sni 1969. (2016). Cara Uji Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Kasar. *Badan Standar Nasional Indonesia*, 20.

Idris, M., Trisnawathy, T., Hisbullah, H., & Yusril, I. (2023). Kuat Tekan Beton Dengan Penambahan Fly Ash Batu Bara Sebagai Pengganti Sebagian Semen. *Journal Of Applied Civil And Environmental Engineering*, *3*(1), 39. Https://Doi.Org/10.31963/Jacee.V3i1.4190

Raja, T. M., Zulkarnain, F (2021). Analisa Pengarus Penambahan Serat Bambu Dan Sika Viscocrete - 8670 MN Terhadap Kuat Tarik Belah Beton. *Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Medan*.

Setiawati, M. (2018). *Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton*. 1–8.

SNI 03-4141-1996. (1996). Metode Pengujian Gumpalan Lempung Dan Butir-Butir Mudah Pecah Dalam Agregat. *Badan Standarisasi Nasional*, 1–6.

SNI 1970-2016 Berat Jenis Agregat Halus.Pdf. (N.D.).

SNI 1971:2011. (2011). "Cara Uji Kadar Air Total Agregat Dengan Pengeringan." *Badan Standarisasi Nasional*, 1–11.

SNI 1973:2008. (2008). Cara Uji Berat Isi, Volume Produksi Campuran Dan Kadar Udara Beton. *Badan Standardisasi Nasional*, 1–13.

SNI 7656:2012. (2012). Tata Cara Pemilihan Campuran Untuk Beton Normal, Beton Berat Dan Beton Massa. *Badan Standarisasi Nasional*, 52.

SNI ASTM C136-2012. (2012). Sni Astm C136-2012: Analisis Saringan Agregat. *Badan Standardisasi Nasional*, 1–24.

Sultan, M. A., Imran, I., & Faujan, M. (2019). Pengaruh Penambahan Limbah Pembakaran Batubara (Fly Ash) Ex Pltu Rum Pada Campuran Beton. *Teras Jurnal*, *9*(2), 83. Https://Doi.Org/10.29103/Tj.V9i2.186

Tarigan, G. (2017). Pengaruh Abu Terbang Dari Pt. Belawan Deli Terhadap Kuat Tekan Beton. In *Cetak) Buletin Utama Teknik* (Vol. 13, Issue 1). Online.

Tarru, R. O. (2018). Studi Penggunaan Silica Fume Sebagai Bahan Pengisi (Filler) Pada Campuran Beton. *Journal Dynamic Saint*, *3*(1), 472–485. Https://Doi.Org/10.47178/Dynamicsaint.V3i1.271

Zulkarnain, F. (2021). *Teknologi Beton. Penerbit*.

Zulkarnain, F., Kamil, B., Utara, S., & Kapten Mukhtar Basri No, J. (2021). Seminar Nasional Penelitian Lppm Umj Website: Http://Jurnal.Umj.Ac.Id/Index.Php/Semnaslit Perbandingan Kuat Tekan Beton Menggunakan Pasir Sungai Sebagai Agregat Halus Dengan Variasi Bahan Tambah Sica Fume Pada Perendaman Air Laut. *Perbandingan Kuat Tekan Beton Menggunakan Pasir Sungai Sebagai Agregat Halus Dengan Variasi Bahan Tambah Sica Fume Pada Perendaman Air Laut*, 1–10. Http://Jurnal.Umj.Ac.Id/Index.Php/Semnaslit

SEISMIK RETROFIT BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING DENGAN PERKUATAN DINDING GESER

Junaedi Utomo[1*], Ade Lisantono[2] dan Hermawan[3]

[1] Departeman Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta*
e-mail: junaedi.utomo@uajy.ac.id
[2] Departeman Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta
e-mail: ade.lisantono@uajy.ac.id
[3] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Soegijapranata,, Jl. Pawiyatan Luhur Sel. IV No.1, Semarang
e-mail: hermawan.mrk@gmail.com

ABSTRAK

Tujuan evaluasi seismik adalah untuk evaluasi berbagai defisiensi yang membuat bangunan tidak dapat mencapai sasaran kinerja yang dipilih. Retrofit dilakukan untuk menghilangkan atau mengurangi defisiensi pada bangunan eksisting dengan meningkatkan kinerja struktur keseluruhan dengan menambahkan elemen baru ke dalam sistem struktur. Bangunan beton bertulang eksisting yang diretrofit adalah bangunan bertingkat sedang dengan ketidak teraturan vertikal dan dibangun pada tanah dengan kemiringan satu arah. Hasil analisis non-linier pada bangunan eksisting menunjukkan adanya beberapa defisiensi, terutama defisiensi geser. Seismik retrofit dengan EuroCode 8 – Part 3 dilakukan dengan dinding geser beton bertulang yang dipasang pada bagian luar dan bagian interior dari bangunan. Dinding geser menpuyai efek yang menguntungkan terhadap kinerja seismik dari bangunan eksisting. Setelah dilakukan perkuatan dengan dinding geser, analisis non-linier pada bangguan eksisting diulang sampai semua defisiensi yang ditemukan sebelumnya hilang. Hasil analisis non-linier menunjukkan bangunan eksistitng, yang telah diperkuat dengan dinding geser, dapat mencapai semua sasaran kinerja yang ada dalam EuroCode 8 – Part 3.

Kata kunci: Analisis nonlinier, Defisiensi Geser, Dinding Geser, EuroCode 8 – Part 3, Seismik Retrofit

1. PENDAHULUAN

Ketidak teraturan dalam suatu bangunan sering terjadi karena konfigurasi dan geometri bangunan mengikuti rancangan arsitektural dan fungsi bangunan. Ketidak teraturan juga sering ada dalam bangunan eksisting yang akan diretrofit. Beberapa dari ketidak teraturan ini telah ada aturannya dalam berbagai standar seperti ASCE 7-16. Dengan mengacu pada standar-standar ini, pelaku *retrofitting* pada bangunan beton bertulang eksisting dapat menyusun strategi perkuatan mengacu pada ASCE 7-16 dan menggunakan *acceptance criteria* dan *modeling parameters* dari EuroCode 8–Part 3, ASCE 41-17 atau yang lain.

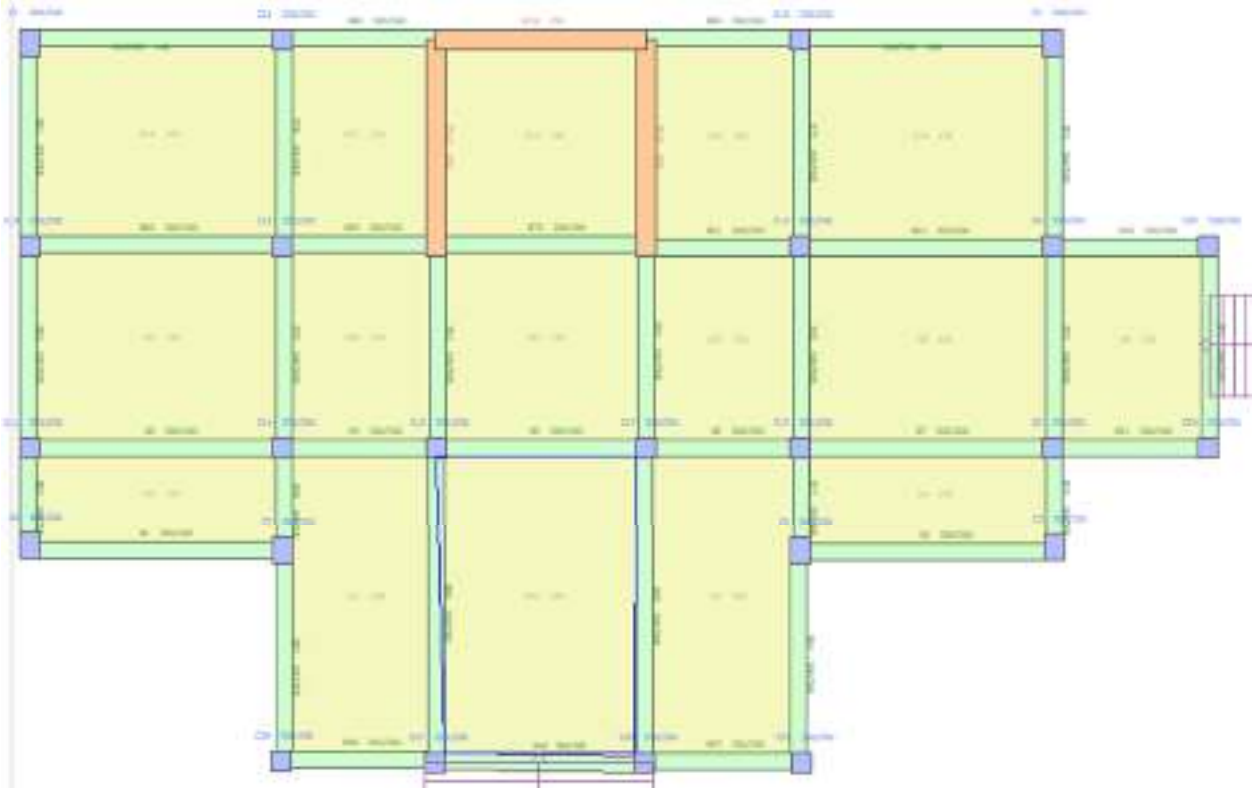
Bangunan beton bertulang eksisting yang diretrofit adalah bangunan bertingkat sedang dengan ketidak teraturan vertikal dan dibangun pada tanah dengan kemiringan satu arah yang membuat tinggi kolom pada lantai dasar berbeda. Bangunan ini bukan bangunan sesungguhnya, bangunan ini sengaja dirancang untuk mengalami berbagai defisiensi selanjutnya seismik retrofit dilakukan untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan sesuai dengan sasaran kinerja yang dipilih. *Retrofitting* dilakukan memakai perangkat lunak SeimoBuild (2020), yaitu perangkat lunak yang khusus dikembangkan untuk retrofit bangunan beton bertulang. Saat ini SeismoBuild mengadopsi enam *Codes* yaitu: *Euro codes* (EuroCode 8-Part 3), *American codes* (ASCE 41-17), *Italian National Seismic Codes* (NTC 08 dan NTC 18), *Greek Seismic Interventions Code* (KANEPE) dan *Turkish Seismic Evaluation Building Code* (TBDY).

Seismik Retrofit pada makalah ini dilakukan memakai EuroCode 8 – Part 3 (CEN 2005). Agar dapat memperoleh perbandingan antara EuroCode 8 dan ASCE 41-17, ketentuan-ketentuan sejenis pada kedua *Codes* juga dibahas. ASCE 41-17 telah mengalami proses evolusi panjang dari ASCE 41–06, ASCE 41-13 dan ASCE 41-17.

2. PERKUATAN TERHADAP BANGUNAN EKSISTING

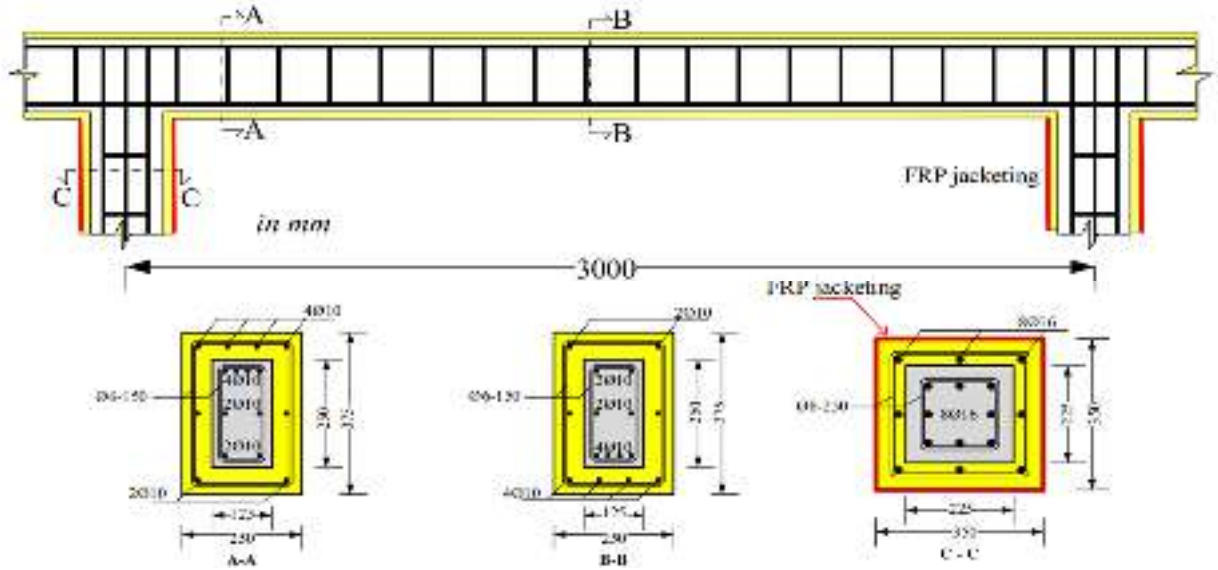
Ada dua kelompok teknik perkuatan yang sering dipakai terhadap bangunan eksisting. Kelompok pertama teknik perkuatan diterapkan pada level global, yang memperlakukan struktur keseluruhan sebagai satu entitas, dengan tujuan mengurangi besar/pengaruh gaya-gaya dalam yang bekerja pada tiap komponen. Perkuatan global yang sering dilakukan adalah menambahkan dinding geser ke dalam sistem struktur bangunan eksisting. Dinding geser mempunyai efek yang menguntungkan terhadap kinerja seismik dari bangunan eksisting. Tambahan dinding geser akan meningkatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitas pada struktur keseluruhan. Adanya elemen yang besar dan kaku

seperti dinding geser akan mengurangi pengaruh beban yang bekerja pada tiap komponen. Adanya pengurangan *demand* pada bangunan eksisting ini sangat menguntungkan untuk pekerjaan seismik retrofit karena dengan tulangan-tulangan yang sudah terpasang komponen-komponen sudah mampu menahan beban-beban yang bekerja atau hanya memerlukan perkuatan ringan saja. Perlu kiranya disadari bahwa jumlah tulangan yang terpasang pada bangunan eksisting umumnya kurang dibanding dengan jumlah tulangan yang ditentukan berdasar peraturan bangunan tahan gempa masa kini. **Gambar 1** menunjukkan contoh dinding geser yang ditambahkan pada bagian luar dan bagian interior bangunan eksisting. Lokasi dinding geser perlu dipertimbangan agar retrofitting dapat dikerjakan dan menimbulkan gangguan minimal baik pada bangunan atau pada penghuni bangunan.



Gambar 1. Penambahan dan pemilihan lokasi dinding geser pada bangunan eksisting

Kelompok kedua teknik perkuatan diterapkan pada level komponen dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan atau daktilitas dari komponen tertentu**. Gambar 2** merupakan contoh perkuatan pada komponen (balok dan kolom) yang dilakukan dengan *reinforced concrete jackets* dan pembungkusan dengan *fiber reinforced polymer* (FRP).



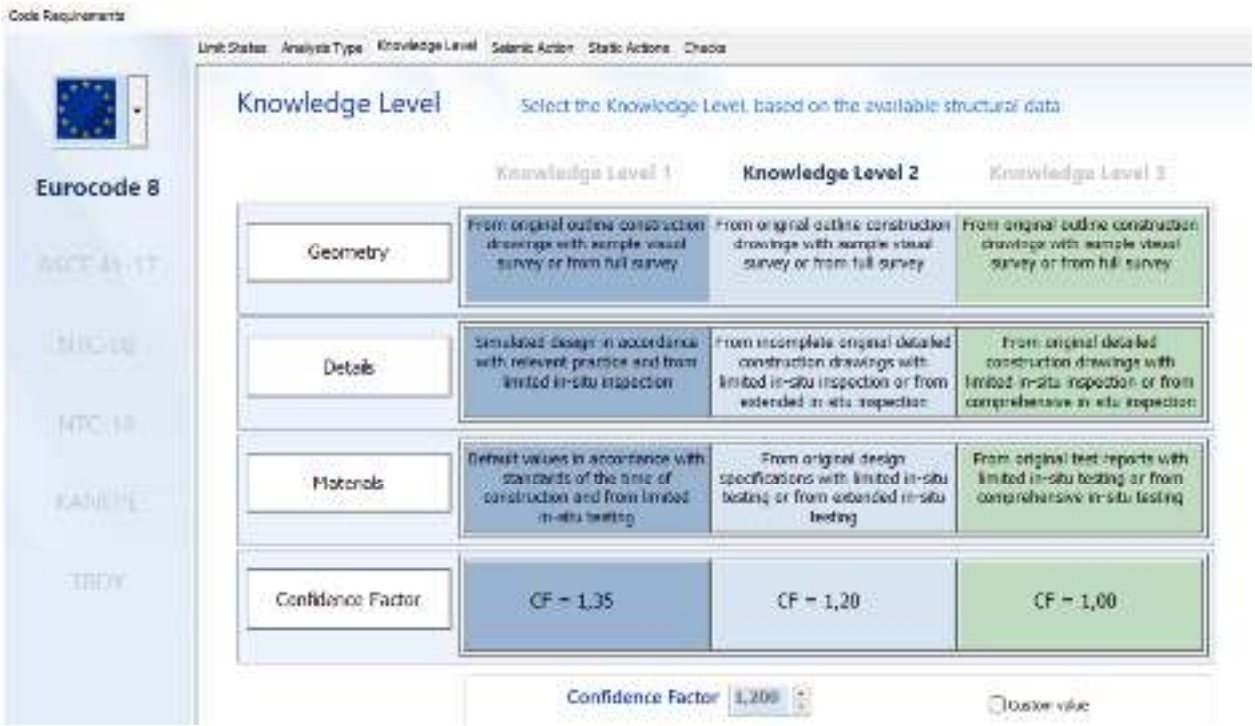
Gambar 2. Solusi retrofit komponen bangunan beton bertulang eksisting

Kedua teknik perkuatan ini sering digabung saat melakukan perkuatan pada bangunan eksisting. Umumnya teknik perkuatan pertama diaplikasikan terlebih dahulu, dan teknik perkuatan kedua dilakukan (bila diperlukan) untuk memperkuat komponen-komponen individu dalam bangunan eksisting yang perlu ditingkatkan kinerja seismiknya.

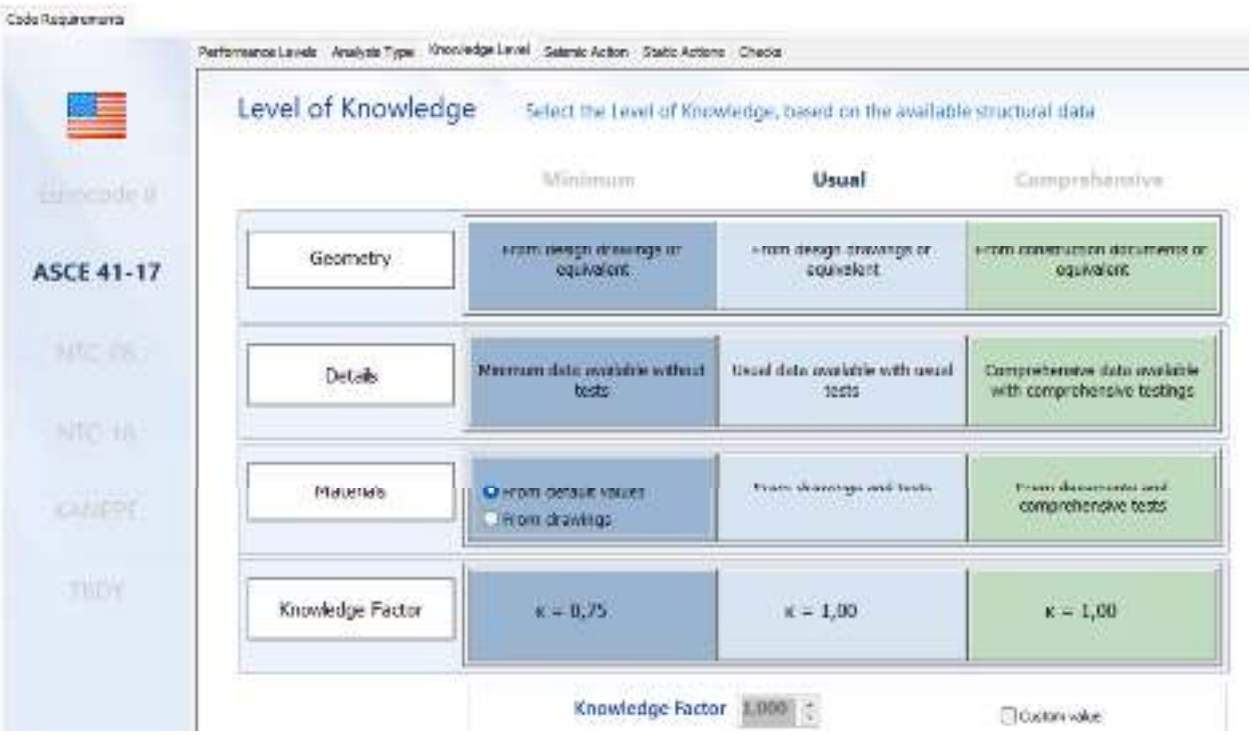
3. EVALUASI SEISMIK DAN LEVEL PENGETAHUAN

Proses evaluasi seismik memakai analisis nonlinier dapat menghasilkan solusi retrofit yang lebih ekonomis (Antoniou (2023)). Ada dua prosedur analisis nonlinier yaitu Prosedur Statik Nonlinier (NSP) dan Prosedur Dinamik Nonlinier (NDP). Saat ini NSP telah menjadi standar untuk retrofit dan dapat dipakai untuk struktur yang mempunyai ketidak teraturan (Antoniou (2023) dan SeismoBuild (2020)). Prosedur Statik Nonlinier (NSP) telah diaplikasikan dalam perangkat lunak SeismoBuild (2020) dan akan dipakai dalam makalah ini.

Level Pengetahuan (*Knowledge level*) mempengaruhi hasil asesmen bangunan eksisting yang mengandung banyak ketidakpastian (*epistemic uncertainties*). Level Pengetahuan dibentuk melalui pengumpulan data yang diambil dari : (1) geometri sistem struktur, baik komponen struktural maupun komponen nonstruktural; (2) *detailing*, yaitu detil dan jumlah tulangan terpasang; dan (3) material penyusun komponen. Meskipun gambar konstruksi dan gambar jadi (*as-built drawings*) telah diperoleh, tetap harus dilakukan survei lapangan dan uji material untuk memeriksa apakah ada penyimpangan yang dapat berpengaruh terhadap respon seismik struktur. *Seismic safety assessment standard* pada EuroCode 8 dan ASCE 41-17 menggunakan pendekatan berbasis komponen memakai kriteria penerimaan batas (*limit-state acceptance criteria*) dari kapasitas parameter-parameter untuk melakukan verifikasi terhadap keamanan dari pola kegagalan daktail dan kegagalan getas. EuroCode 8 memakai *confidence factors* (**CF**) untuk faktorisasi nilai rata-rata kuat material (**Gambar 3**). ASCE 41-17 memakai *knowledge factor* (**κ**) seperti ditunjukkan oleh **Gembar 4**. ASCE41-17 membagi Level Pengetahuan menjadi tiga yaitu: *minimum*, *usual* dan *comprehensive* yang selanjutnya dipakai dengan memilih satu diantara tiga *knowledge factor* yaitu: 0.75-0.9, 1.0 dan 1.0. *Knowledge factor* dari ASCE41-17 beroperasi pada sisi kapasitas komponen sehingga nilainya lebih kecil atau maksimum sama dengan satu. Level Pengetahuan dipakai untuk memilih jenis analisis yang digunakan, dan *knowledge factor* dipakai sebagai tambahan faktor keamanan untuk memperhitungkan kurangnya *knowledge* tentang bangunan eksisting. ASCE7-41 tidak memperbolehkan pemakaian prosedur analisis nonlinier bila Level Pengetahuan bangunan eksisting adalah minimum.



Gambar 3. *Confident factor* dari EuroCode 8 – Part 3 (SeismoBuild (2020))



Gambar 4. *Knowledge levels* dari ASCE 41-17 (SeismoBuild (2020))

4. LEVEL KINERJA, SASARAN KINERJA DAN LEVEL BAHAYA SEISMIK

EuroCode 8–Part 3 dan ASCE 41-17 adalah standar asesmen keamanan seismik yang memakai pendekatan asesmen berbasis kinerja dengan memasukan berbagai ketidak pastian melalui *confident factor* (**CF**) atau *knowledge level* (**κ**). **Gambar 5** menunjukkan perbandingan sasaran kinerja (yang merupakan kombinasi level bahaya seismik dan level kinerja) sesuai dengan ASCE 41-17 dan EuroCode 8- Part 3 untuk bangunan umum.

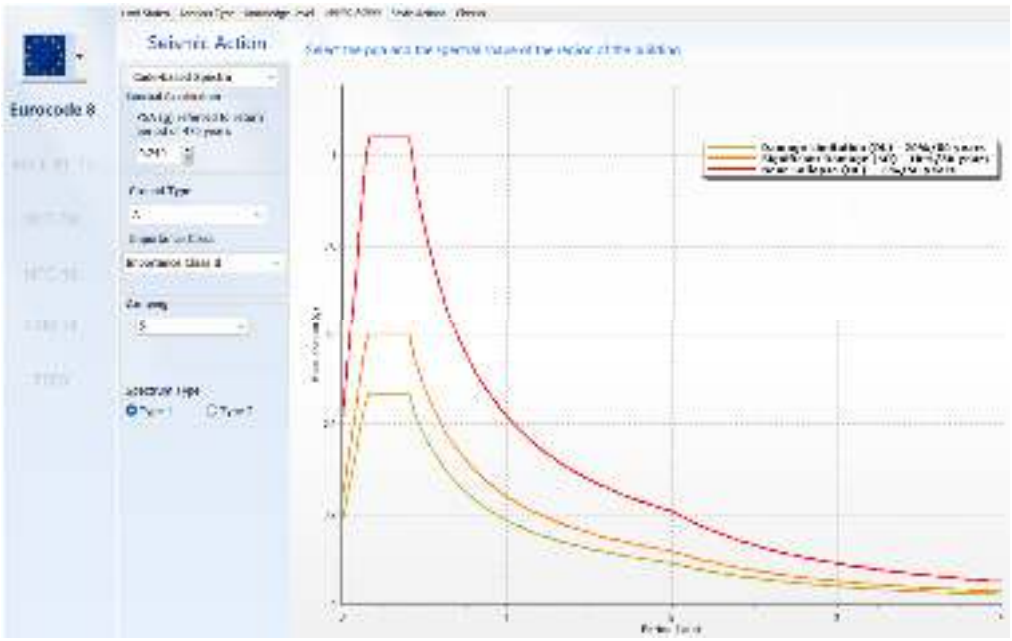
	Performance Level					Limit state			
ASCE 41-17	**OP**	**IO**	**LS**	**CP**	**EC8/3**	**-**	**DL**	**SD**	**NC**
50% in 50 years	*a*	*b*	*c*	*d*	50% in 50 years	-	-	-	-
20% in 50 years	*e*	*f*	*g*	*h*	20% in 50 years	-	x	-	-
10% in 50 years	*i*	*j*	*k*	*l*	10% in 50 years	-	-	x	-
2% in 50 years	*m*	*n*	*o*	*p*	2% in 50 years	-	-	-	x

Gambar 5. Perbandingan kombinasi level kinerja dan koresponding level bahaya seismik (Nuno et al. (2024))

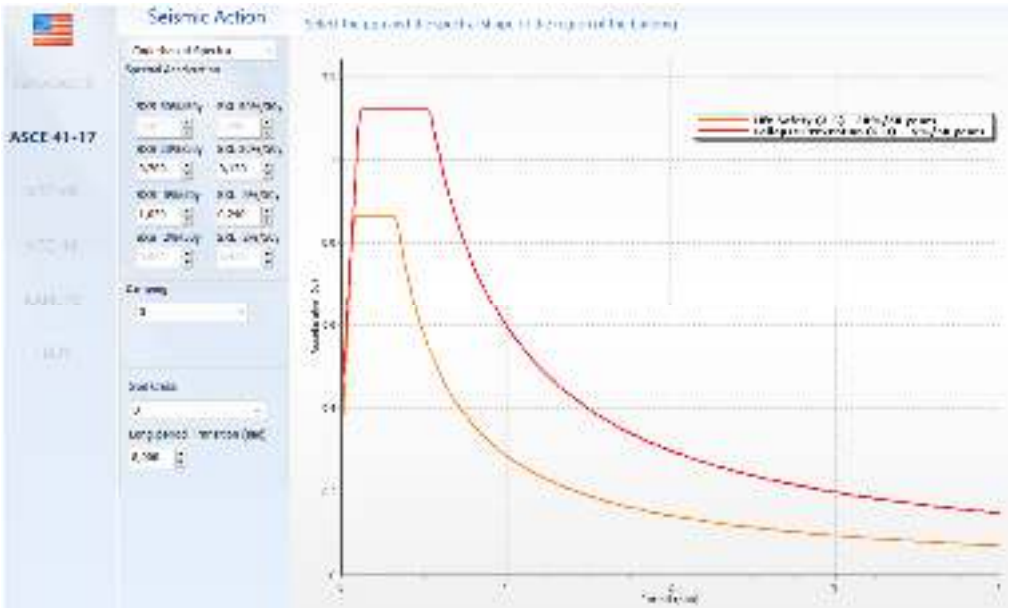
Dari **Gambar 5** tampak EuroCode 8 menyajikan satu set sasaran kinerja yang merupakan pasangan level kinerja dan level bahaya seismik (kombinasi tunggal), sedang ASCE 41-17 menyajikan banyak kombinasi pasangan level kinerja dan level bahaya seismik.

5. RESPON SPEKTRA AKSELERASI

Bahaya seismik akibat gerakan tanah didefinisikan melalui Respon Spektra Akselerasi atau riwayat akselerasi gerakan tanah akibat gempa yang ditentukan secara probabilistik atau deterministik. Respon spektra akselerasi untuk EuroCode 8-Part 3 untuk *Peak Ground Acceleration* (PGA) dengan perioda ulang 475 tahun, tipe tanah A, *importance class* II dan redaman 5 % ditunjukkan oleh **Gambar 5**. Respon spektra akselerasi untuk ASCE 41-17, yang dihitung mengikuti contoh hitungan FEMA P2006 (2018), untuk wilayah Yogyakarta dengan kelas situs D, dan redaman 5 % untuk level bahaya seismik BSE-1E (20%/50 tahan) dan BSE-2E (5%/50 tahun) ditunjukkan oleh **Gambar 6**. Hitungan parameter-parameter untuk respon spektra akselerasi ini telah dipresentasikan oleh penulis dalam KoNTekS ke 17.



Gambar 5. Respon Spektra Akselerasi dari EuroCode 8 (SeismoBuild (2020))



Gambar 6. Respon Spektra Akselerasi dari ASCE 41-17 (SeismoBuild (2020))

6. SEISMIK RETROFIT BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING

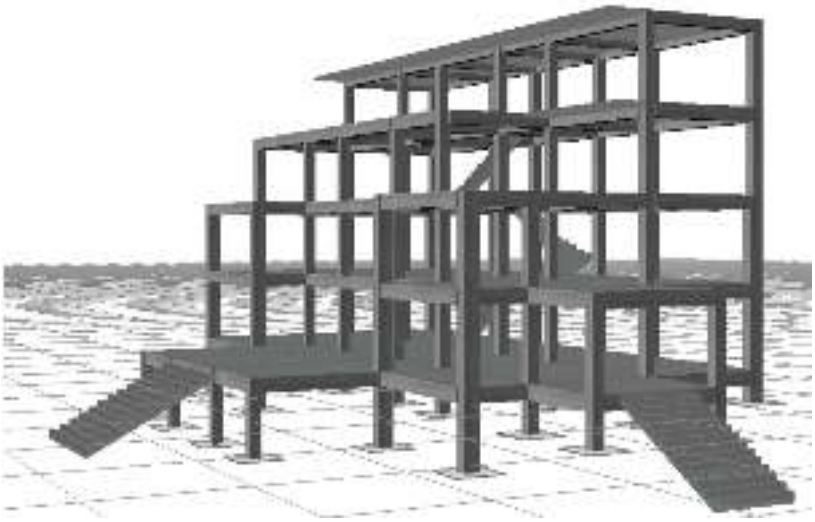
Seismik retrofit dilakukan terhadap bangunan beton eksisting yang sengaja dirancang mengikuti praktek perancangan masa lalu, saat kemajuan pengetahuan perancangan tahan gempa belum secanggih sekarang. Bangunan beton eksisting ini sengaja dirancang untuk mengalami defisiensi geser. Konfigurasi bangunan beton eksisting dalam dilihat pada **Gambar 7**. Tampak dari **Gambar 7** bahwa bangunan eksisting mengalami ketidak teraturan vertikal. Adanya kolom pendek, karena bangunan dibangun di atas tanah dengan kemiringan satu arah, yang membuat kolom pendek mengalami gaya geser besar perlu mendapat perhatian karena jumlah tulangan geser kolom pada bangunan beton masa lalu umumnya lebih sedikit dibanding dengan hasil dari perancangan bangunan tahan gempa masa kini.

Asesmen dan retrofit bangunan eksisting dengan ketidak teraturan lebih dari satu dilakukan langsung dengan prosedur statik nonlinier (NSP), menggunakan 16 kombinasi pembebanan, menggunakan respon spektra akselerasi pada **Gambar 5**, dan memakai EuroCode 8-Part 3. Tulangan-tulangan hasil perancangan bangunan eksisting untuk pelat, balok dan kolom telah dimasukkan ke dalam model yang dibuat dalam perangkat lunak SeismoBuild (2020). Hasil

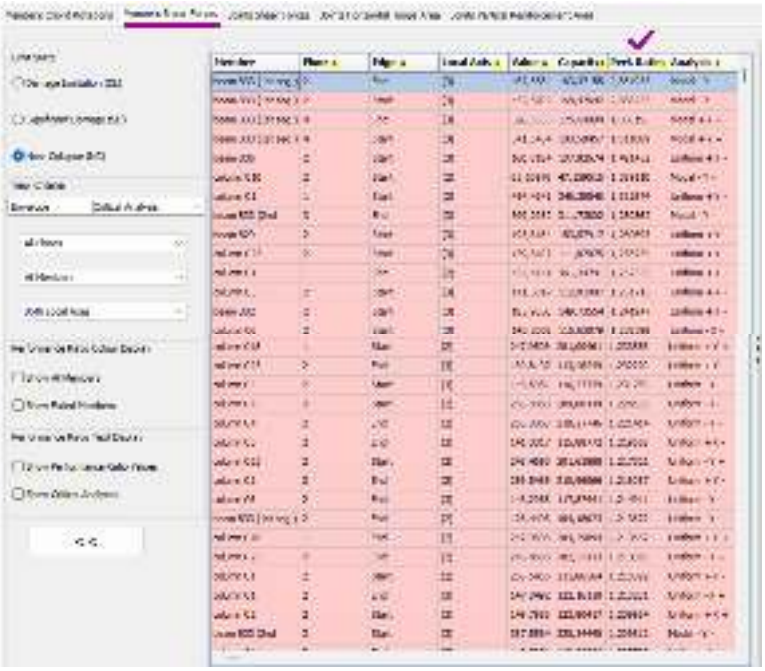
perancangan ini dapat dianggap mewakili level pengetahuan yang c*omprehensive* dari bangunan eksisting sehingga prosedur NSP boleh dipakai. *Properties* material yang dipakai dalam seismik retrofit dapat dilihat pada **Tabel 1**. Ada tiga kondisi batas yang ditinjau yaitu: *Damage Limitation* (DL) – 20%/50 tahun, *Significant Damage* (SD)) – 10%/50 tahun dan *Near Collapse* (NC)) – 2%/50 tahun. Hasil dari analisis nonlinier pada kondisi batas *near collapse* (NC) menunjukkan ada banyak defiensi akibat gaya geser seperti ditunjukkan oleh **Gambar 8**.

Tabel 1. *Properties* material yang dipakai dalam retrofit**.**

Nama	Tipe Elemen	*Fc*, nilai yang diharapkan (MPa)	*Fc*, nilai batas bawah (MPa)	*Fs*, nilai yang diharapkan (MPa)	*Fs*, nilai batas bawah (MPa)
***Default* eksisting**	Eksisting	20.0 (*Mean*)	16.0 (*Mean-σ*)	275.0 (*Mean*)	220.0 (*Mean-σ*)
***Default* baru**	Baru	33.0 (*Mean*)	25.0 (*Mean-σ*)	555.6 (*Mean*)	500.0 (*Mean-σ*)



Gambar 7. Geometri dan konfigurasi bangunan beton bertulang eksisting yang mempunyai ketidak teraturan



Gambar 8. Hasil analisis nonlinier NSP bangunan eksisting pada kondisi batas *Near Collapse* (NC)

Strategi seismik retrofit yang dipakai adalah menambahkan dinding geser pada lokasi dan konfigurasi yang ditunjukkan oleh **Gambar 1** dan **Gambar 9a**. Tambahan dinding geser akan meningkatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitas pada struktur keseluruhan. Adanya elemen yang besar dan kaku seperti dinding geser akan mengurangi pengaruh beban yang bekerja pada tiap komponen. Adanya pengurangan *demand* pada bangunan eksisting ini sangat menguntungkan untuk pekerjaan seismik retrofit karena dengan tulangan-tulangan yang sudah terpasang komponen-komponen sudah mampu menahan beban-beban yang bekerja atau hanya memerlukan perkuatan ringan saja. Hasil dari analisis nonlinier banguan eksisting yang telah diperkuat dengan dinding geser pada kondisi batas *Near Collapse* (NC) ditunjukkan oleh **Gambar 9b**. Bila *Performance Ratio* dari suatu kompoen ≤ 1,0 maka komponen tersebut sudah tidak mengalami defisiensi. Semua defiensi akibat geser pada komponen bangunan eksisting telah hampir hilang, seismik retrofit bisa dianggap selesai. Seismik retrofit dapat ditingkatkan dengan memberikan perkuatan dengan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) pada komponen *wall* W23, *beam* B33, *beam* B38, *beam* B79 dan *beam* B82 meskipun perkuatan tambahan ini tidak akan memberikan dampak signifikan terhadap bangunan eksisting. Perkuatan dengan dinding geser dipandang sudah mencukupi untuk seismik retrofit.



(a) (b)

Gambar 9. Hasil analisis non-linier NSP bangunan beton bertulang ekssisting: (a) Dengan perkuatan dinding geser dan (b) Geser pada kondisi batas *Near-Collapse* (NC)

Ada delapan kurva kapasitas yang diperoleh dari analisis *pushover* (prosedur NSP) sesuai jumlah kombinasi beban yang dipakai, Kurva kapasitas untuk kombinasi beban Modal + X + eccY sebelum dan sesudah retrofit ditunjukan oleh **Gambar 10a** dan **Gambar 10b** Dari **Gambar 10a** dan **Gambar 10b** tampak bahwa gaya geser lateral (*base shear*) pada bangunan eksisting meningkat dari 3550 kN sebelum retrofit menjadi 7220 kN setelah retrofit. *Target displacement* sebelum retrofit (bulatan kecil pada **Gambar 10a**) menurun setelah retrofit (bulatan kecil pada **Gambar 10b**). SeismoBuild (2020) memberikan nilai-nilai *Target Displacement* sebagai berikut:

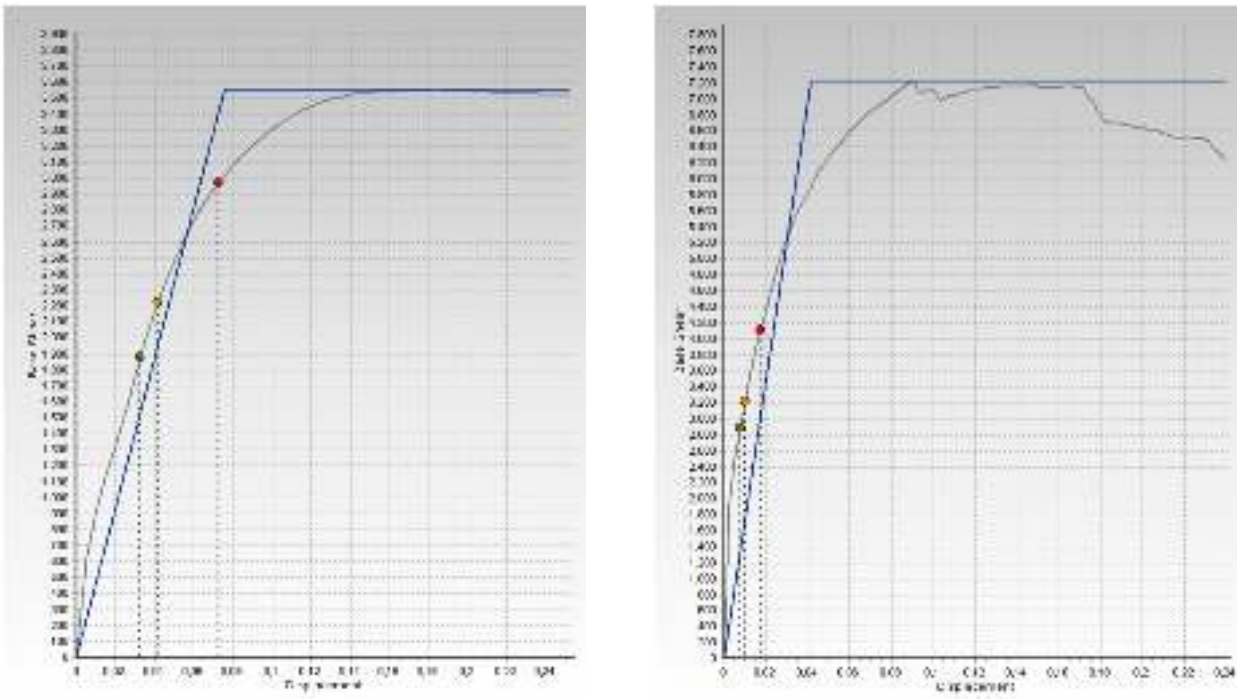
Target displacement sebelum retrofit:

- Level kinerja *Damage Limitation* = 0.0326 m
- Leval kinerja *Significant Damage* = 0.0419 m
- Level kinerja *Near Collapse* = 0.0726 m

Target displacement setelah retrofit:

- Level kinerja *Damage Limitation* = 0.00778 m
- Leval kinerja *Significant Damage* = 0.00998 m
- Level kinerja *Near Collapse* = 0.017306 m

Kurva-kurva kapasitas dari kombinasi beban 15 yang lain dapat dievaluasi dengan cara yang sama. Bila informasi tentang bangunan eksisting tersedia, dipahami dengan baik dan dilakukan pengumpulan data yang akurat dari banguan eksisting maka retrofit menggunakan analisis non-linier akan menghasilkan solusi yang ekonomis. Bila retrofit bangunan eksisting yang dulunya dirancang memakai peraturan perancangan tahan gempa yang sudah modern (misal peraturan perancangan tahan gempa dari tahun 1990 ke atas), hasil analisis non-linier dapat menghasilkan solusi bahwa bangunan eksisting tersebut tidak perlu diretrofit, suatu solusi yang melegakan pemilik bangunan eksisting.



(a) (b)

Gambar 10. Kurva kapasitas untuk kombinasi beban Modal + X + eccY: (a) Sebelum retrofit dan (b) Sesudah retrofit

7. KESIMPULAN

Bangunan beton bertulang eksisting yang mempunyai ketidak teraturan lebih dari satu dapat ditingkatkan kekakuan dan kapasitasnya untuk menahan beban gempa sesuai dengan level kinerja dan level bahaya seismik mengikuti ketentuan dalam EuroCode 8-Part 3. Ada banyak pilihan perkuatan yang dapat dipakai seperti *concrete jacketing* atau FRP namun dinding geser merupahan pilihan perkuatan yang efektif karena bekerja pada level global dan dapat mempengaruhi respon struktur secara signifikan. Perkuatan dinding geser meningkatkan gaya geser lateral pada bangunan eksisting dan menurunkan *Target Displacement* pada masing-masing level kinerja. Dinding geser sangat efektif untuk menurunkan *demand* pada komponen-komponen dari bangunan beton bertulang eksisting.

DAFTAR PUSTAKA

[ASCE] American Society of Civil Engineers (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41–17)*. Reston, Virginia: ASCE.

[ASCE] American Society of Civil Engineers (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7–16)*. Reston, Virginia: ASCE.

CEN (2005) Eurocode 8: *Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings*. European Committee of Standardization, Brussels.

Antoniou, Stelios. (2023). *Seismic Retrofit for Reinforced Concrete Buildings*, John Wiley &Sons Inc.

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2018). *Example Application Guide for ASCE/SEI 41-13 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings – with Additional Commentary for ASCE/SEI 41-17*. FEMA P2006, Washington, DC: Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency.

Nuno, P., Despoina, S. dan Xavier, R. (2024). *Closed-Form Expressions for Partial Safety Factors Used in the Seismic Assessmen of Existing RC Buildings*. Bulletin of Earthquake Engineering (2024) 22:997–1032.

SeismoBuild (2020). *A Computer Program for the Linear and Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Buildings*. Tersedia di URL: www.seismosoft.com.

KAJIAN LITERATUR SISTEM SAMBUNGAN BALOK SLOOF PRACETAK KONSTRUKSI RUMAH SEDERHANA TAHAN GEMPA

Israel Padang[1], Rudy Djamaluddin[2], Herman Parung[3], dan Arwin Amiruddin[4]

[1)]Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp 0811422111, E mail: civilrael1107@gmail.com
[2),] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 0811466610, E mai ; rudy0011@gmail.com
[3)]Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp. 087840023116, E mail: parungherman@gmail.com
[4)]Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp. 082190423578, E mail: a.arwinamiruddin@yahoo.com.

ABSTRAK

Gempa bumi adalah salah satu bencana alam yang paling merusak, terutama di Indonesia yang terletak di Cincin Api Pasifik dan memiliki curah hujan tinggi, sehingga sering mengalami gempa, letusan gunung berapi, banjir, dan tsunami. Inovasi dalam teknologi konstruksi tahan gempa sangat penting untuk pemulihan pasca-bencana, terutama dalam pembangunan kembali rumah-rumah yang rusak dengan cepat dan efisien. Beton pracetak adalah solusi yang populer karena kualitasnya yang lebih baik dan waktu konstruksi yang lebih singkat, namun desain dan implementasi sistem sambungan yang efektif adalah tantangan utama. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi teknik dan metode sistem sambungan balok pracetak untuk pondasi rumah sederhana tahan gempa melalui studi literatur. Studi ini mengidentifikasi jenis-jenis sambungan seperti sambungan basah, kering, dan semi-kering, serta menganalisis kinerja sambungan dalam berbagai pengujian laboratorium. Hasil studi literatur ini ditemukan bahwa sambungan yang dirancang dengan baik mampu mentransfer beban secara aman dan efektif, serta memastikan integritas struktural selama gempa. Makalah ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang desain dan konstruksi sambungan balok pracetak yang dapat mendukung percepatan pembangunan rumah tahan gempa di Indonesia.

Kata kunci: gempa bumi, beton pracetak, sambungan balok, konstruksi, rumah tahan gempa

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang paling merusak, yang dapat menyebabkan kerugian besar baik dalam hal nyawa maupun properti. Indonesia, sebagai bagian dari Cincin Api Pasifik, selain itu Indonesia memiliki curah hujan yang sangat tinggi menyebabkan Indonesia termasuk negara rawan dilanda bencana seperti seperti gempa bumi, letusan gunung berapi, banjir hingga tsunami. (Indonesiabaik.id). Statistik Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BPBD) mencatat jumlah kejadian bencana di Indonesia termasuk dalam kategori sangat tinggi. Tercatat dalam 5 tahun terakhir bencana di atas angka rata-rata 3000 kejadian setiap tahunnya. Bahkan terbesar di tahun 2020 mencapai 5003 kejadian bencana. BNPB mencatat lebih dari 42.000 rumah warga rusak akibat bencana alam sepanjang tahun 2020. Kejadian bencana dari tahun ke tahun menjadi catatan sekaligus data betapa bencana sangat merugikan bagi kelangsungan hidup manusia sebagai sebuah histori. Terdapat kecenderungan peningkatan kejadian bencana setiap tahun, dimana total kejadian bencana di tahun 1815 berjumlah 1 meningkat menjadi 3.885 kejadian pada tahun 2019 (Yulianto et al., 2021). Oleh karena itu, inovasi dalam teknologi konstruksi tahan gempa sangat penting. Salah satu tantangan utama dalam pemulihan pasca-bencana adalah membangun kembali rumah-rumah yang rusak atau hancur dengan cepat dan efisien. Pemulihan ini merupakan tahap penting dalam mengembalikan kehidupan normal bagi warga yang terkena dampak. Namun, pembangunan rumah dengan cara konstruksi yang konvensional memerlukan waktu yang lama dan sumber daya yang besar, yang dapat menunda pemulihan dan meningkatkan penderitaan korban bencana. Sistem struktur beton pracetak merupakan salah satu alternatif teknologi dalam perkembangan konstruksi di Indonesia yang bisa dilakukan dengan lebih terkontrol, lebih ekonomis, serta mendukung efisiensi waktu, efisiensi energi, dan mendukung pelestarian lingkungan (Sianturi, 2012). Hal ini sejalan dengan kebutuhan percepatan pembangunan rumah sederhana korban yang terkena dampak bencana pada saat terjadi bencana alam yang tahan terhadap gempa.

Beton pracetak memiliki keunggulan dalam kualitas dan konstruksi yang lebih pendek waktu. Sambungan struktur beton pracetak penting untuk keberhasilan konstruksi (Djamaluddin et al., n.d.). Sistem sambungan yang digunakan untuk menghubungkan elemen-elemen pracetak, harus direncanakan agar dapat berperilaku dengan baik, dalam mentransfer beban gravitasi maupun beban lateral. Di samping itu, sistem sambungan tersebut haruslah dapat mempercepat pelaksanaan konstruksi dan mudah untuk dilaksanakan. Penggunaan balok pracetak dalam konstruksi telah menjadi solusi yang semakin populer karena berbagai keunggulannya, termasuk kecepatan pembangunan, kontrol kualitas yang lebih baik, dan efisiensi biaya. Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaan balok pracetak adalah desain dan implementasi sistem sambungan yang efektif dan efisien. Sistem sambungan yang baik harus mampu mentransfer beban dengan aman dan efektif, serta memastikan integritas struktural selama dan setelah

terjadinya gempa. Artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai teknik dan metode sistem sambungan balok pracetak yang telah terbukti efektif dalam konteks pondasi rumah sederhana tahan gempa.

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur. Metode studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelolah bahan penelitian (Zed, 2008:3), sebagai langkah awal dalam perencanaan penelitian dengan memanfaatkan kepustakaan untuk memperoleh data lapangan dan membentuk kerangka berpikir pada penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur melibatkan pengumpulan informasi dari berbagai sumber yang relevan dengan topik yang dibahas. Sumber-sumber yang digunakan termasuk jurnal ilmiah, buku, laporan penelitian, artikel konferensi, dan standar konstruksi. Pencarian literatur dilakukan melalui database online seperti Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, dan database akademik lainnya. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian literatur meliputi "precast beam connection", "earthquake-resistant foundation", "seismic performance of precast structures", dan "efficient construction methods". Literatur yang ditemukan kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi teknik dan metode sambungan balok pracetak yang telah terbukti efektif dalam uji laboratorium maupun aplikasi lapangan.

3. PEMBAHASAN

Jenis Sambungan Balok Pracetak

Berbagai jenis sambungan balok pracetak telah dikembangkan dan diuji untuk memastikan kinerjanya dalam kondisi gempa. Beberapa jenis sambungan yang umum digunakan antara lain:

1. *Wet Connection* (Sambungan Basah)

Sambungan ini merupakan sambungan dengan cara groutting atau penyaluran tulangan menggunakan tulangan biasa sebagai penyambung/penghubung antar elemen beton baik antar pracetak ataupun antara pracetak dengan cor ditempat. Elemen pracetak yang sudah berada di tempatnya akan dicor bagian ujungnya untuk menyambungkan elemen satu dengan yang lain agar menjadi satu kesatuan yang monolit. Sambungan jenis ini sering diterapkan dalam pelaksanaan konstruksi, karena tergolong mudah dalam pelaksanaannya. Selain itu sambungan ini dapat membuat bangunan menjadi lebih kaku dibanding menggunakan sambungan jenis lain. Menurut sudut pandang praktisi, sambungan basah dapat menghemat biaya dan cara pemasangannya yang lebih mudah dibandingkan dengan sambungan kering akan tetapi, memerlukan setting time yang cukup lama (Taher, 2007).

2. *Dry Connection* (Sambungan Kering)

Sambungan jenis ini menggunakan penghubung mekanis seperti baut, sambungan plat baja, atau sistem interlock. Sambungan kering lebih cepat dalam pemasangan dan tidak memerlukan waktu pengeringan, namun harus dirancang dengan presisi untuk memastikan keselarasan dan kekuatan yang cukup. Kekurangan dari sambungan jenis ini yaitu pelaksanaannya yang tidak mudah sehingga membutuhkan tenaga ahli dan biaya pengerjaannya lebih mahal dibandingkan sambungan basah. Retak yang tersembunyi pada bagian plat baja yang tertanam di dalam beton juga menjadi salah satu faktor dari kekurangan sambungan ini.

3. *Semi-Dry Connection* (Sambungan Semi-Kering)

Kombinasi antara sambungan basah dan kering, menggunakan perekat atau grouting untuk memperkuat penghubung mekanis. Sambungan ini menawarkan keseimbangan antara kekuatan dan efisiensi waktu, namun memerlukan teknologi perekat yang tepat untuk mengoptimalkan hasilnya.

Kinerja Sambungan dalam Beberapa Pengujian

Penelitian tentang sambungan beton pracetak sudah cukup banyak dilakukan. Berbagai inovasi ditemukan untuk mendapatkan model dan sistem sambungan yang efektif dan efisien pada kebutuhan konstruksi dewasa ini. Penelian Penelitian (Zheng et al., 2023). Hasildari penelitian ini adalah bahwa perilaku lentur dari balok segmen beton pracetak UHPC dengan kawat tarik tak terikat dipengaruhi oleh jenis sambungan dan jumlah sambungan. Meskipun kekuatan lentur dari komponen pracetak lebih rendah daripada balok monolitik, namun menunjukkan perilaku yang lebih lentur. Gagalnya balok segmen umumnya terjadi pada bagian lentur, dan distribusi regangan sepanjang ketinggian balok bersifat linear. Selain itu, bentuk sambungan juga mempengaruhi kapasitas dukung lentur. Hasil simulasi FE menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data uji, meskipun terdapat perbedaan yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan dan kerusakan material. Penelitian ini memberikan wawasan berharga untuk desain dan konstruksi jembatan segmen beton pracetak UHPC.

Penelitian (Ro et al., 2021).Sebuah studi eksperimental tentang perilaku lentur sistem balok modular beton pracetak menggunakan pelat baja yang disisipkan. Hasil dari penelitian ini memperlihatkan retakan awal terjadi di tengah-tengah semua spesimen uji. Pada sistem balok modular PC yang diusulkan, PCM-A dan PCM-B, retakan berlanjut sepanjang bentuk sambungan ke zona kompresi seiring dengan peningkatan beban setelah terjadi retakan lentur awal. PCM-B dengan panjang sambungan 700 mm (dua kali lipat dari spesimen PCM-A) lebih rapuh. Namun, penyambungan antara modul PC dipastikan karena sambungan antara modul PC tidak lepas sampai pengujian dihentikan. Beban maksimum dari PCM-A dan PCM-B masing-masing adalah 81% dan 78% dari beban maksimum spesimen monolitik. Kapasitas tahan beban anggota modular PC biasanya sekitar 70–85% dibandingkan dengan balok RC standar.

Penelitian (Nguyen et al., 2023).Penelitian Nguyen dan kawan-kawan menggunakan loop untuk menghubungkan elemen beton pracetak. Variabelnya adalah panjang tumpang tindih, diameter lentur, dan jarak antara batang loop dalam satu pasang. Temuan menunjukkan bahwa mengurangi panjang tumpang tindih dan diameter lentur mengurangi kekuatan lentur sambungan loop. Selanjutnya, jarak antara batang loop memiliki efek yang tidak berarti pada kapasitas dukung tetapi berdampak signifikan pada kinerja lentur. Analisis elemen hingga tiga dimensi dilakukan untuk memprediksi perilaku mekanik sambungan loop. Simulasi numerik menguatkan hasil eksperimen dalam hal perilaku beban-defleksi dan regangan batang penguat. Akhirnya, persamaan empiris diusulkan untuk memprediksi kekuatan lentur dari beberapa sambungan loop vertikal.

Penelitian (Djamaluddin et al., n.d.) 2015.Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan lembaran CFRP pada sambungan balok-kolom sistem portal beton pracetak memiliki kapasitas lentur sekitar 85% dari spesimen monolit. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa sistem sambungan menggunakan lembaran CFRP dengan kunci geser dapat menjadi alternatif dalam sistem sambungan, terutama untuk sistem portal yang utamanya menahan beban vertikal. Namun, sistem sambungan pracetak masih memiliki keuletan yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen monolit. Selain itu, ditemukan bahwa sabuk pada lembaran CFRP longitudinal dapat menyebabkan pemutusan dini serat terluar, yang mengurangi kapasitas lentur. Studi ini memberikan wawasan berharga untuk desain dan konstruksi struktur beton pracetak menggunakan lembaran CFRP.

Penelitian (Lu et al., 2021)meneliti perilaku lentur balok beton pracetak dengan lengan ganda yang diisi beton di atas pengujian tiga titik dan empat titik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lengan baja pada balok berperilaku memuaskan, dan ulir membantu meningkatkan kekakuan awalnya. Beban retak pertama dari semua balok pra-cetak lebih rendah daripada balok referensi karena efek antarmuka. Dengan peningkatan diameter batang transisi bawah, kapasitas beban yield dan ultimate dari spesimen pracetak di bawah lenturan tiga titik meningkat sebesar 9,0% dan 21,0%, masing-masing. Balok dengan lengan ganda yang diisi beton menunjukkan kekentalan yang lebih baik dengan lebar retakan maksimum yang 41,2% dan 28,6% lebih besar dari balok referensi di bawah lenturan tiga titik dan empat titik, masing-masing.

Penelitian (Kummara and Senthil Kumar, 2023). Penelitian ini membandingkan kinerja sambungan balok-balok yang terbuat dari balok monolitik dan pracetak di bawah beban lentur. Dua jenis sambungan balok-balok pracetak yang berbeda dan balok monolitik dikenai uji beban lentur. Sambungan balok-balok pracetak disatukan dengan sambungan pipa baja yang dilas dan sambungan pipa Poly Vinyl Chloride. Beban lentur diterapkan pada panjang 1/3 dan 1/4 dari tumpuan. Uji lentur yang dilakukan pada balok pracetak dan balok monolitik menggunakan mesin uji universal memberikan evaluasi terhadap kekuatan lentur, mekanisme kegagalan, dan parameter deformasi dari balok monolitik dan balok pracetak yang tersambung. Hasil investigasi ini menunjukkan bahwa balok dengan sambungan pipa baja yang dilas memiliki kekuatan lentur yang setara dan defleksi 10,3% lebih rendah daripada balok monolitik. Kesimpulannya, balok yang tersambung dengan pipa baja yang dilas lebih unggul daripada balok beton bertulang monolitik dan dapat digunakan untuk menyambungkan komponen balok beton pracetak.

Penelitian (Peng & Yan, 2022)bereksperimen untuk meneliti kinerja sambungan basah pada jembatan beton ultra-tinggi yang diprefabrikasi (UHPC). Mode kegagalan spesimen, kapasitas lentur ultimate, distribusi regangan, dan kurva beban-defleksi diselidiki. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur dari balok sambungan lebih rendah daripada balok lengkap. Di antara lima spesimen dengan sambungan basah, sambungan romboid yang dilas dengan strip atas dan bawah memiliki kekakuan terbesar, kapasitas resistensi retakan tertinggi, dan kinerja lentur terbaik. Dari yang terbaik hingga yang terburuk, sisa spesimen sambungan basah mengikuti urutan berikut: sambungan romboid tanpa pengelasan dengan strip, sambungan vertikal dengan strip, sambungan romboid, dan sambungan vertikal. Sesuai dengan hasil pengujian dan analisis teoritis terkait, hasil penelitian ini mengusulkan rumus untuk menghitung kapasitas lentur dari balok dengan sambungan UHPC.

Penelitian (Li et al., 2022)Dalam penelitian ini, respons dinamis satu sambungan beton bertulang monolitik (RC) dan tiga sambungan PC dengan konfigurasi sambungan basah yang berbeda diselidiki dengan menggunakan sistem uji dampak . Perilaku dampak dari sambungan RC monolitik dan PC diperiksa dan dibandingkan dalam hal mode kegagalan, respons dinamis, dan disipasi energi. Efek dari berbagai konfigurasi sambungan basah terhadap respons dinamis sambungan PC yang dianalisis ditemukan bahwa kerusakan antarmuka antara balok PC dan sambungan mengakibatkan integritas sambungan PC yang berkurang. Selain itu, model numerik dari sambungan balok-kolom dikembangkan dengan menggunakan perangkat lunak LS-DYNA dan dikalibrasi dengan data uji. Model numerik yang dikalibrasi digunakan untuk menyelidiki pengaruh berbagai konfigurasi sambungan basah terhadap kinerjanya yang terkena dampak di lokasi yang berbeda. Hasil numerik menunjukkan bahwa kunci geser dan tulangan antarmuka yang digunakan untuk sambungan basah bermanfaat untuk menahan kerusakan yang dipimpin oleh geser tetapi kurang efektif dalam menahan kerusakan yang dipimpin oleh lentur yang diinduksi oleh beban dampak. Oleh karena itu, sambungan basah harus dirancang dengan baik untuk sambungan PC agar dapat menahan skenario pembebanan dampak yang ditentukan.

Penelitian (Zhou et al., 2022)menggunakan jenis sambungan balok pracetak yang dirakit di dalam jangka dengan sambungan baut-pelat baja (PBSPB), di mana pelat baja berbentuk U menutupi web dan zona tarik balok beton. Pelat baja dan baut digunakan untuk menghubungkan dua balok pendek yang dirakit untuk menahan lentur dan geser akibat efek eksternal. Untuk menyelidiki efek ketebalan pelat baja dan rasio jangka-dalam pada perilaku lentur balok, uji perilaku statis dilakukan pada enam PBSPB dan satu balok tempa-in-situ. Semua PBSPB menunjukkan kinerja yang sangat baik dengan retakan terbatas di bawah kondisi yang sama; hanya kerusakan kecil yang diamati, yang terdiri dari jumlah kecil beton yang terkelupas dan pergeseran pinggir pelat baja. Model analisis elemen hingga (ABAQUS)

dari PBSPB yang diusulkan dikembangkan untuk memverifikasi beban ultimat dan situasi kerusakan dari setiap spesimen, rumus perhitungan kapasitas lentur yang disederhanakan untuk PBSPB dikembangkan, dan hasil teoritis konsisten dengan hasil eksperimental. Hasil menunjukkan bahwa balok beton pracetak baru memiliki kapasitas lentur yang baik. Balok dengan pelat baja yang lebih tebal di jangka memiliki kekuatan yang lebih tinggi karena kekakuan yang lebih tinggi. Meningkatkan rasio jangka-dalam meningkatkan beban ultimat dan hampir tidak memengaruhi mekanisme kegagalan.

Penelitian (Tumengkol et al., 2022)Penelitian ini menemukan bahwa sambungan balok-kolom pracetak dengan pen dowel memiliki kinerja yang baik dalam menanggung beban gempa bumi di bawah kondisi seismik sedang dan kuat. Penggunaan pen dalam sambungan meningkatkan kapasitas beban, kekakuan, dan disipasi energi. Nilai daktilitas dari sambungan pracetak dengan pen sedikit lebih rendah daripada sambungan monolitik, namun masih memenuhi persyaratan. Studi merekomendasikan penggunaan sambungan pracetak dengan pen untuk aplikasi praktis. Banyak referensi disediakan untuk bacaan lebih lanjut. Kapasitas beban dan daktilitas sambungan balok-kolom pracetak dengan pen lebih besar daripada sambungan monolitik. Sambungan pracetak dengan 4 pen memiliki kapasitas beban dan daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang memiliki 2 pen. Keberadaan pengecoran di area sambungan balok meningkatkan kekakuan dan kapasitas beban sambungan pracetak. Nilai daktilitas untuk spesimen dikategorikan sebagai sedang sesuai dengan ASCE 41-17. Daktilitas lengkungan untuk sambungan balok-kolom pracetak menggunakan pen juga lebih tinggi daripada sambungan monolitik. Perilaku sambungan balok-kolom pracetak dengan pen lebih kuat dalam menahan beban siklik. Artikel ini juga memberikan detail metode pengujian dan hasil untuk berbagai jenis sambungan balok-kolom.

Penelitian (Kataoka et al., 2012). Melakukan penelitian sambungan balok kolom pracetak dengan sambungan pelat baja, luas baja yang digunakan pada penutup beton pelat inti berongga sama, dengan variasi jumlah batang yang melewati kolom dan yang ditempatkan berdampingan dengan kolom. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sambungan dengan batang yang berdampingan dengan kolom menunjukkan peningkatan kekakuan dan kontrol retakan yang lebih baik. Menurut klasifikasi, kedua sambungan yang diuji dapat dianggap sebagai semi-rigid.

Penelitian (Esmaeili and Ahooghalandary, 2020). Menurut Esmaeili meskipun prosedur pemasangan yang mudah, sebagian besar sambungan kering tidak menunjukkan kinerja yang dapat diterima dalam hal keuletan dan disipasi energi. Di sisi lain, sambungan semi-monolitik memerlukan waktu penundaan yang lama untuk pengecoran dan perancah di lokasi konstruksi dan mengakibatkan kepadatan tulangan di sambungan balok-kolom. Selain itu, sebagian besar balok pracetak dalam kedua pendekatan tersebut tidak memiliki permukaan dukungan yang sesuai untuk menciptakan kondisi sambungan balok ke pelat yang diinginkan. Kemudian Esmaeili melakukan inovasi pada penelitian ini dengan sambungan balok-kolom beton pracetak yang mudah dipasang yang diperkuat dengan kotak baja dan pelat perifer. Hasilnya, Hasil uji menunjukkan bahwa PBC yang diusulkan memiliki kapasitas pemikul beban, disipasi energi, dan keuletan yang lebih tinggi daripada IBC yang setara dan memenuhi semua persyaratan gempa dari kriteria ACI374.1-05 untuk sambungan tahan momen. Terakhir, sambungan tersebut disimulasikan dengan metode elemen hingga (FEM) dalam perangkat lunak ATENA untuk mengembangkan hasil uji. Pada tahap ini, prediksi analisis elemen hingga untuk kapasitas pemikul beban, pola retakan, dan nilai regangan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil uji.

Penelitian (*_8_ NIKEN*, n.d.) melakukan penelitian untuk mengetahui perilaku lentur pada sambungan model takik balok pracetak. Dari pengamatan pasca pengujian, analisa hasil pengujian, hasil perhitungan dengan anggapan balok monolit dan pengamatan keretakan dapat diperoleh kesimpulan bahwa sistem sambungan ini mempunyai perilaku lentur seperti struktur monolit namun disarankan dilakukan peninjauan terhadap mekanisme geser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi SNI (Standar Nasional Indonesia) yang paling ketat dapat tercapai dengan perpindahan 4,66 mm dan pembebanan 17,326 tf pada kondisi balok elastis. Retak pertama muncul pada pembebanan 6,64 tf yang setara dengan 86,8% dari perhitungan pembebanan statik. Beban maksimum adalah 23,99 tf atau 62% dari perhitungan pembebanan statik, hal ini sesuai dengan teori kelelahan bahwa pembebanan berulang mengurangi 40-55% dari pembebanan statik. Retak pertama adalah retak lentur dan kemudian retak tersebut berkembang menjadi tipe diagonal.

Penelitian (*V A Noorhidana (2006) - Analisis Perilaku Balok Beton Pracetak Dengan Wet-Joint Yang Menerima Lenturan*, n.d.)Hasil penelitiannya memperlihatkan bahwa balok beton pracetak dengan sambungan basah (*wet joint*) dengan sambungan tulangan yang ujungnya dibengkokkan (BP1) dengan sambungan tulangan yang dilas satu sama lain (BP2), mempunyai perilaku yang hampir sama dengan balok beton monolit (BM), dilihat dari hubungan beban lendutan, ketahanan lentur (*toughness*) dan pola retak. Sehingga disimpulkan bahwa tipe sambungan basah dengan tulangan lewatan yang dilas maupun tulangan lewatan yang ujungnya dibengkokkan dapat diterapkan dalam konstruksi bangunan.

Penelitian (Palembangan et al., 2020). Untuk menentukan dan menganalisis perilaku lentur dari sambungan balok-kolom luar ganda yang lurus karena beban lateral siklik. Terdapat 3 (tiga) spesimen uji skala, monolitik BK, tipe SBK 1, dan tipe SBK 2. Model sambungan pada balok adalah sambungan alur ganda lurus dan menggunakan metode sambungan mekanis dan pengecoran. Pemuatan dengan beban lateral bergantian diasumsikan sebagai beban siklik. Hasilnya menunjukkan bahwa stabilitas spesimen tipe SBK 1 dan tipe 2 dalam hal karakteristik kurva loop histeresis memiliki kurva yang mirip dengan monolitik BK. Perpindahan terbesar dalam kondisi tekan terjadi pada tipe SBK 2 sementara kondisi tarik terjadi pada monolitik BK. Dari hasil studi, juga diketahui bahwa beban lateral berbanding lurus dengan perpindahan, di mana semakin tinggi beban lateral yang ditanggung maka semakin besar perpindahan yang dialami dan sebaliknya.

Menurut (Zheng et al., 2023), kekuatan lentur komponen prefabrikasi 9~15% lebih rendah daripada balok monolit,

sementara itu, bentuk sambungan juga memengaruhi kapasitas dukung lentur. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Maryoto, 2017), di mana penyambung antara segmen balok beton pracetak memegang peranan yang sangat penting. Panjang sambungan berpengaruh terhadap kuat lentur balok beton segemental. Namun kapasistas lentur balok beton segmental masih dibawah kapasitas lentur balok beton tanpa sambungan. Penelitian sistem sambungan pada balok pracetak menggunakan pelat baja dilakukan oleh (Ro et al., 2021), memperlihatkan hasil sistem balok modular PC yang diusulkan mencapai sekitar 80% dari kinerja struktural dibandingkan dengan spesimen monolitik, dengan keuletan sekitar 1,3 kali lipat lebih besar. Penelitian sambungan balok ke balok pracetak digabungkan dengan sambungan pipa las baja dan sambungan pipa Polivinil Klorida yang dilakukan oleh (Kummara & Senthil Kumar, 2023) menunjukkan bahwa balok terhubung dengan konektor pipa las baja memiliki kekuatan lentur yang setara dan defleksi 10,3% lebih rendah daripada balok monolitik. Peneliti ini menyimpulkan bahwa balok terhubung dengan pipa las baja lebih unggul daripada balok beton bertulang monolitik dan dapat digunakan untuk menghubungkan anggota balok beton pracetak. Penelitian yang dilakukan oleh (Peng & Yan, 2022) juga menunjukkan bahwa jenis sambungan menentukan kapasitas lentur balok sambungan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur balok sambungan lebih rendah daripada balok monolit.

Dari beberapa penelitian ini sejalan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu menemukan model sambungan balok pracetak yang memiliki kinerja efektif, waktu dan biaya pelaksanaan yang efisien dalam pengembangan inovasi sambungan beton pracetak dalam dunia konstruksi. Menurut sudut pandang praktisi, selain memiliki kinerja kekuatan struktural yang lebih baik dan kapasitas deformasi yang lebih tinggi, sambungan basah dapat menghemat biaya dan cara pemasangannya yang lebih mudah dibandingkan dengan jenis sambungan lainnya. Akan tetapi, memerlukan setting time yang cukup lama.

Efisiensi Biaya dan Waktu

Efisiensi biaya dan waktu merupakan faktor penting dalam pemilihan sistem sambungan balok pracetak. Sambungan kering cenderung lebih murah dan cepat karena tidak memerlukan waktu pengeringan, namun mungkin memerlukan material tambahan untuk memastikan kekuatan seismik yang memadai. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa meskipun sambungan kering lebih cepat, biaya tambahan untuk elemen penghubung dan peredam getaran dapat meningkatkan biaya total konstruksi. Sambungan basah, meskipun lebih mahal dan memakan waktu lebih lama, menawarkan kekuatan struktural yang lebih baik dan kapasitas deformasi yang lebih tinggi. Penggunaan beton cast-in-place dalam sambungan basah memastikan transfer beban yang efektif dan kontinuitas struktural yang baik . Sambungan semi-kering dapat menjadi pilihan optimal jika teknologi perekat yang digunakan dapat diandalkan dan efisien. Studi menunjukkan bahwa sambungan semi-kering dengan penggunaan perekat atau grouting dapat mengurangi waktu konstruksi sambil mempertahankan kinerja seismik yang baik . Selain itu, sambungan semi-kering menawarkan fleksibilitas dalam desain dan konstruksi, memungkinkan adaptasi terhadap berbagai kondisi proyek dan persyaratan desain.

4. KESIMPULAN

Dari tinjauan ini menunjukkan bahwa inovasi model sambungan beton pracetak merupakan penelitian yang luas dan sangat menarik. Kinerja sambungan balok pracetak dalam menghadapi gempa bumi sangat bergantung pada desain dan implementasi sambungan tersebut. Beberapa studi menunjukkan bahwa sambungan basah memiliki kinerja seismik yang baik karena mampu mendistribusikan beban gempa secara merata dan memiliki kapasitas deformasi yang tinggi . Namun, sambungan basah memerlukan waktu pengeringan yang lama dan kontrol kualitas yang ketat selama pemasangan. Sambungan kering, di sisi lain, lebih cepat dan efisien dalam konstruksi, tetapi sering kali memerlukan elemen tambahan seperti peredam getaran atau penghubung fleksibel untuk meningkatkan kinerja seismiknya . Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan peredam getaran dapat secara signifikan meningkatkan kinerja seismik sambungan kering dengan mengurangi perpindahan relatif antar elemen pracetak . Sambungan semi-kering menawarkan fleksibilitas dan kinerja yang baik, dengan kombinasi kekuatan dari sambungan basah dan efisiensi waktu dari sambungan kering. Penggunaan perekat atau grouting dalam sambungan semi-kering dapat meningkatkan kapasitas beban dan deformasi sambungan, asalkan teknologi perekat yang digunakan dapat diandalkan dan diaplikasikan dengan tepat.

DAFTAR PUSTAKA

_8_ NIKEN. (n.d.).

Djamaluddin, R., Rante, H., & Irmawati, R. (n.d.). *FLEXURAL CAPACITY OF THE PRECAST RC BEAM-COLUMN CONNECTION USING CFRP SHEET*.

Esmaeili, J., & Ahooghalandary, N. (2020). Introducing an easy-install precast concrete beam-to-column connection strengthened by steel box and peripheral plates. *Engineering Structures*, *205*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110006

Kataoka, M. N., Ferreira, M. A., & El Debs, A. L. H. C. (2012). *A study on the behavior of beam-column connections in precast concrete structures: experimental analysis Estudo do comportamento de ligações viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto: análise experimental* (Vol. 5, Issue 5).

Kummara, S. P., & Senthil Kumar, N. (2023). Flexural capacity of the new precast beam-to-beam connection. *Sādhanā*, *48*(4), 255. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02266-1

Li, H., Chen, W., Huang, Z., Hao, H., Ngo, T. T., Pham, T. M., & Yeoh, K. J. (2022). Dynamic response of monolithic and precast concrete joint with wet connections under impact loads. *Engineering Structures*, *250*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113434

Lu, Z., Wu, B., Yang, S., Hou, J., Ji, Z., Li, Y., Huang, J., & Zhang, M. (2021). Experimental study on flexural behaviour of prefabricated concrete beams with double-grouted sleeves. *Engineering Structures*, *248*, 113237. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113237

Maryoto, A.-. (2017). Pengaruh Panjang Sambungan Pada Beton Prategang Segmental Bertulangan Limbah. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan; Vol 19, No 1 (2017): Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan; 65-70 ; 2503-1899 ; 1411-1772 ; 10.15294/Jtsp.V19i1*. https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jtsp/article/view/9500

Nguyen, Q.-T., Maki, T., Mutsuyoshi, H., & Ishihara, Y. (2023). Flexural Behavior of Precast Concrete Slab Connections using Loop Steel Bars and Mortar. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *21*(6), 436–449. https://doi.org/10.3151/jact.21.436

Palembangan, M. T., Parung, H., Amiruddin, A. A., & Simbolon, R. (2020). Flexural behavior of double straight notch joint beam column exterior due to lateral cyclic load. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *473*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012144

Peng, K., & Yan, B. (2022). Experimental study of the flexural behaviour of ultra-high-performance concrete beam with wet joint. *Magazine of Concrete Research*, *74*(2), 70–80. https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00078

Ro, K. M., Kim, M. S., Cho, C. G., & Lee, Y. H. (2021). An experimental study on the flexural behavior of precast concrete modular beam systems using inserted steel plates. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(9). https://doi.org/10.3390/app11093931

Sianturi, N. M. (2012). TINJAUAN PENGGUNAAAN BALOK PRACETAK PADA PEMBANGUNAN GEDUNG. In *Jurnal Rancang Sipil* (Vol. 1, Issue 1).

Tumengkol, H. A., Irmawaty, R., Parung, H., & Amiruddin, A. (2022). Precast concrete column beam connection using dowels due to cyclic load. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, *35*(1). https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.01a.09

V A Noorhidana (2006) - Analisis perilaku balok beton pracetak dengan wet-joint yang menerima lenturan. (n.d.).

Yulianto, S., Apriyadi, R. K., Aprilyanto, A., Winugroho, T., Ponangsera, I. S., & Wilopo, W. (2021). Histori Bencana dan Penanggulangannya di Indonesia Ditinjau Dari Perspektif Keamanan Nasional. *PENDIPA Journal of Science Education*, *5*(2), 180–187. https://doi.org/10.33369/pendipa.5.2.180-187

Zed, Mestika 2003. Metode Penelitian Kepustakaan. Jakarta : Yayasan Obor Indonesia

Zheng, H., Chen, D., Ou, M., Liang, X., & Luo, Y. (2023). Flexural Behavior of Precast UHPC Segmental Beams with Unbonded Tendons and Epoxy Resin Joints. *Buildings*, *13*(7). https://doi.org/10.3390/buildings13071643

Zhou, W., Xu, Z., & Ma, C. (2022). Flexural behavior of precast concrete beams in-span assembled with bolt-steel

plate joints. *Structures*, *43*. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.067

KAJIAN SPEKTRUM KAPASITAS NON-ENGINEERED BUILDING (NEB) DENGAN ANALISIS STATIC PUSHOVER

Hendramawat Aski Safarizki[1*], Stefanus Adi Kristiawan[2], Senot Sangadji[2], Syarifuddin Nur Wahid[1], dan Rafif Hanan Muwaffaq[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Veteran Bangun Nusantara, Sukoharjo*
***e-mail**: hendra.mawat@gmail.com*
[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
e-mail: s.a.kristiawan@ft.uns.ac.id; s.sangadji@ft.uns.ac.id
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Veteran Bangun Nusantara, Sukoharjo
***e-mail**: nwahid421@gmail.com; rafifhanan72@gmail.com*

ABSTRAK

Kondisi geologis Kabupaten Pacitan dilewati oleh sesar grindulu dan berhadapan langsung dengan daerah subduction menjadikan wilayah Kabupaten Pacitan rawan terjadi gempa bumi. Dinding sebagai elemen bangunan Non-Engineered Building (NEB) dapat mempengaruhi respon bangunan terhadap gempa yang terjadi. Dinding pengisi seringkali dianggap sebagai bagian non-struktural dalam struktur *open frame*. Pemasangannya dinding pengisi biasanya dikerjakan setelah semua elemen utama seperti balok, kolom, dan pelat selesai dikerjakan dalam proses konstruksi. Dalam proses perencanaan, sering kali dinding pengisi tidak diperhitungkan sebagai elemen struktur. Dengan menggunakan analisis *static pushover* maka dapat diketahui perilaku kinerja seismik struktur bangunan rumah tinggal terhadap gempa pada program SeismoStruct. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis bangunan Non-Engineered Building (NEB) dengan membandingkan bangunan NEB tanpa dinding pengisi terhadap NEB dengan dinding pengisi. Analisis dilakukan dengan bantuan program seismostruct dengan melakukan modeling struktur sesuai dengan data yang ada di lapangan.

Kata kunci: dinding pengisi, gempa, Non-Engineered Building, spektrum kapasitas, *static pushover*

1. PENDAHULUAN

Gempa tidak mengakibatkan kematian tetapi keruntuhan bangunan akibat gempa yang dapat menimbulkan korban jiwa. Indonesia sering dilanda gempa bumi karena terletak pada pertemuan lempeng tektonik Wilayah Kabupaten Pacitan berada di jalur cincin api (*ring of fire*) (Ahsani, 2023; Kristiawan et al., 2023). Kondisi geologis Kabupaten Pacitan dilewati oleh sesar grindulu dan berhadapan langsung dengan daerah subduction menjadikan wilayah Kabupaten Pacitan rawan terjadi gempa bumi. Dengan adanya kejadian gempa bumi di Indonesia, maka banyak dikembangkan analisis-analisis gempa terhadap struktur (Utami, 2019).

Dalam menganalisis struktur bangunan gedung tahan gempa metode yang digunakan adalah *Performance Based Earthquake Engineered* (PBEE). PBEE terbagi menjadi dua, yaitu *Performance Based Seismic Design* (PBSD) dan *Performance Based Seismic Evaluation* (PBSE). Evaluasi pada PBSD salah satunya adalah dengan menggunakan analisis nonlinier pushover. Analisa pushover merupakan salah satu metode analisis *performance based seismic design* yang memanfaatkan teknik analisa non-linier berbasis komputer untuk menganalisa perilaku inelastis struktur dari berbagai macam intensitas gerakan tanah (gempa), dengan memberikan pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang besarnya ditingkatkan secara bertahap *(incremental*) sampai struktur tersebut mencapai target *displacement* tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu (Sultan, 2016).

Perencanaan bangunan tahan gempa pada umumnya didasarkan pada analisa elastik yang di beri faktor beban untuk simulasi kondisi bangunan ultimit (batas). Kenyataannya, perilaku runtuh struktur bangunan pada saat gempa besar adalah pada saat kondisi inelastis. Dengan merencanakan suatu struktur dengan beban gempa, banyak aspek yang mempengaruhinya diantaranya adalah periode bangunan, sangat dipengaruhi oleh massa struktur serta kekakuan struktur tersebut. Kekakuan struktur sendiri dipengaruhi oleh kondisi struktur, bahan yang digunakan serta dimensi struktur yang digunakan. Evaluasi untuk memperkirakan kondisi inelastik struktur bangunan pada saat gempa perlu untuk mendapatkan jaminan bahwa kinerjanya memuaskan pada saat terjadinya gempa (Almufid & Hidayah, 2019).

Dinding pengisi

Sistem struktur dengan dinding pengisi merujuk pada penggunaan dinding atau panel sebagai elemen yang mampu menahan gaya arah horizontal. Dinding pengisi umumnya berfungsi sebagai pembatas interior atau eksterior dalam struktur beton bertulang, khususnya untuk bangunan kelas menengah. Pemasangan dinding pengisi dilakukan setelah selesainya struktur utama, bersamaan dengan tahap penyelesaian bangunan. Oleh karena itu, dalam perencanaannya, dinding pengisi dianggap sebagai komponen non-struktural yang tidak mempengaruhi pemodelan struktur, asal beban yang dihasilkan telah dipertimbangkan sebelumnya, misalnya dengan mengasumsikannya sebagai beban merata (Bastian, 2020).

Ketika dinding pengisi mengalami tingkat pembebanan yang relatif kecil, kontribusinya terhadap kekakuan dan kekuatan struktur tetap penuh. Pada situasi tersebut, kekuatan dinding pengisi masih belum terlampaui, dan meskipun

portalnya mengalami kerusakan, kekakuan struktur secara keseluruhan tetap terjaga. Dinding akan mengalami keruntuhan jika gempa kuat terjadi, hal itu dapat menurunkan kekakuan struktur dan menyebabkan kegagalan tingkat lunak (Sudarsana et al., 2023).

Dinding pengisi seringkali dianggap sebagai bagian non-struktural dalam struktur open frame. Pemasangannya dinding pengisi biasanya dikerjakan setelah semua elemen utama seperti balok, kolom, dan pelat selesai dikerjakan dalam proses konstruksi. Dalam proses perencanaan, sering kali dinding pengisi tidak diperhitungkan. Namun, dalam beberapa kasus, ketika terdapat beban lateral yang signifikan (misalnya akibat gempa), dinding pengisi dapat memberikan kontribusi besar terhadap kekakuan dan kekuatan struktur, sehingga perilaku keruntuhan struktur tersebut menjadi berbeda dari portal terbuka (Pascanawaty et al., 2020).

Static pushover analysis

Analisis beban dorong statik pada struktur bangunan merupakan suatu pendekatan untuk melakukan analisis baik secara linier maupun non-linier dalam 2 dimensi atau 3 dimensi, di mana dampak dari gempa bumi terhadap struktur bangunan dipertimbangkan sebagai beban-beban statik yang berfungsi menahan pada pusat massa dari setiap lantai. Nilai-nilai tersebut ditingkatkan secara bertahap hingga melebihi batas pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan sendi plastis pertama di dalam struktur bangunan. Selanjutnya, dengan peningkatan beban, struktur mengalami perubahan bentuk dari keadaan elastis menjadi elasto-plastis yang signifikan hingga mencapai titik ambang keruntuhan (Safarizki et al., 2013).

Static Pushover Analysis bertujuan untuk memproyeksikan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi, serta untuk mengidentifikasi bagian-bagian kritis dari struktur. Analisis ini juga berguna untuk menentukan wilayah-wilayah yang memerlukan perhatian khusus dalam hal pendetailan atau stabilitas. Dalam analisis ini, suatu pola beban lateral statik dikenakan pada struktur secara bertahap dengan faktor pengali yang ditingkatkan hingga mencapai target perpindahan lateral tertentu dari suatu titik referensi. Titik referensi yang biasanya digunakan adalah titik pada atap atau pusat massa atap (Pramudhita & Buwono, 2019).

Analisis pushover melibatkan pembentukan kurva pushover, yakni sebuah grafik yang menggambarkan keterkaitan antara gaya geser dasar (V) dengan perpindahan titik acuan pada atap (D). Dalam proses pushover, struktur diberikan gaya dorong hingga mencapai titik leleh di satu atau lebih titik di dalam struktur tersebut. Kurva kapasitas ini menunjukkan fase linear sebelum mencapai titik leleh, kemudian transisi ke perilaku nonlinier. Selain itu, karakteristik kurva pushover dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban dorongan (Pramudhita & Buwono, 2019)

Capacity Spectrum Method (CSM) merupakan salah satu cara untuk mengetahui kinerja suatu struktur. Dalam suatu analisis static pushover akan didapat kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (base shear) dan simpangan (displacement). Kurva kapasitas ini kemudian diubah menjadi spektrum kapasitas dalam format ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum). Spektrum kapasitas merupakan kurva yang menunjukkan hubungan antara spectral acceleration (Sa) dan spectral displacement (Sd) (Mamesah et al., 2014).

Kurva kapasitas yang didapatkan dari analisis pushover memiliki perbedaan dengan hasil analisis dinamis nonlinier riwayat waktu. Keandalan analisis pushiver menurun sejalan dengan berpengaruhnya ragam yang lebih tinggi (Benjamin Lumantarna et al., 2004). Diharapkan pemilihan *Static Pushover Analysis* pada evaluasi bangunan Non-Engineered Building (NEB) yang sederhana dan hanya satu lantai dapat memberikan nilai yang mendekati analisis dinamis nonlinier riwayat waktu.

Non-Engineered building (NEB)

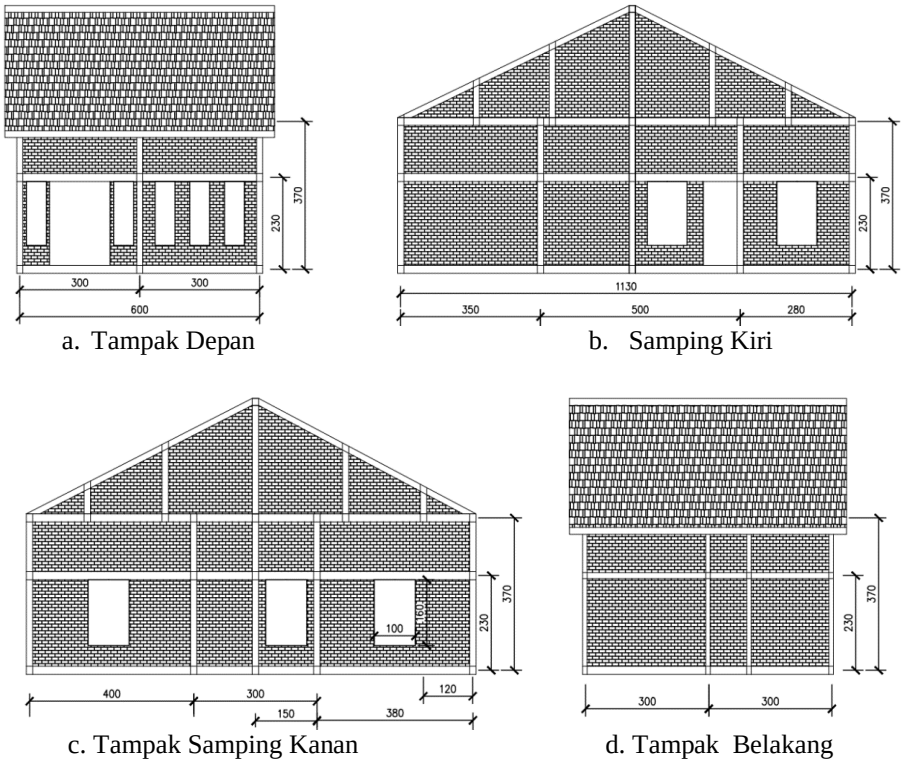
Bangunan Non-Engineered Building (NEB) adalah bangunan-bangunan yang dalam proses pendiriannya tanpa bantuan teknis perencanaan yang benar, tetapi hanya mengikuti kebiasaan dan praktek setempat. Ciri bangunan NEB pada bangunan rumah tinggal di wilayah Pacitan antara lain menggunakan tulangan polos, diameter pembesian yang tidak sesuai pedoman perencanaan bangunan tahan gempa (SNI 1726:2019, 2019), jarak sengkang yang tidak memadai, detil joint yang tidak memenuhi syarat, pencampuran beton yang tidak terukur, serta pengecoran beton yang buruk (Kristiawan et al., 2023). Struktur Non-Engineered Building (NEB) sangat rapuh karena berbagai tingkat kerusakan dapat terjadi pada level drfit ratio yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan batas yang ada pada code struktur yang ada (Kristiawan et al., 2024).

Makalah ini bertujuan untuk melakukan analisis bangunan Non-Engineered Building (NEB) dengan membandingkan bangunan NEB tanpa dinding pengisi terhadap NEB dengan dinding pengisi. Analisis dilakukan dengan bantuan program *seismostruct* dengan melakukan modeling struktur sesuai dengan data yang ada di lapangan.

2. MODEL STRUKTUR

Struktur Non-Engineered Building (NEB) yang ditinjau seperti tampak pada Gambar 1 adalah rumah sederhana yang berlokasi di Desa Kendal, Kecamatan Punung, Kabupaten Pacitan. Dimensi bangunan yang ditinjau berukuran panjang 11,30 meter dan lebar 6 meter. Untuk tinggi total bangunan yaitu 3,70 meter. Pemodelan struktur ini dilakukan dengan menggunakan software seismostruct. Analisis ini dilakukan dengan cara analisa *static pushover*. Bentuk dari bagian elemen balok dan kolom sesuai dengan kondisi riil di lapangan dengan dimensi balok 11x15 cm dan kolom 11x11 cm. Hasil pengujian mutu nilai kuat tekan beton 3,96 MPa (K 47,71) dan Tegangan Luluh baja berada pada nilai 4120,84 kg/cm2 (404,12 MPa). Bentuk dan mutu elemen ini menunjukkan bahwa struktur termasuk kategori

Non-Engineered Building (NEB).



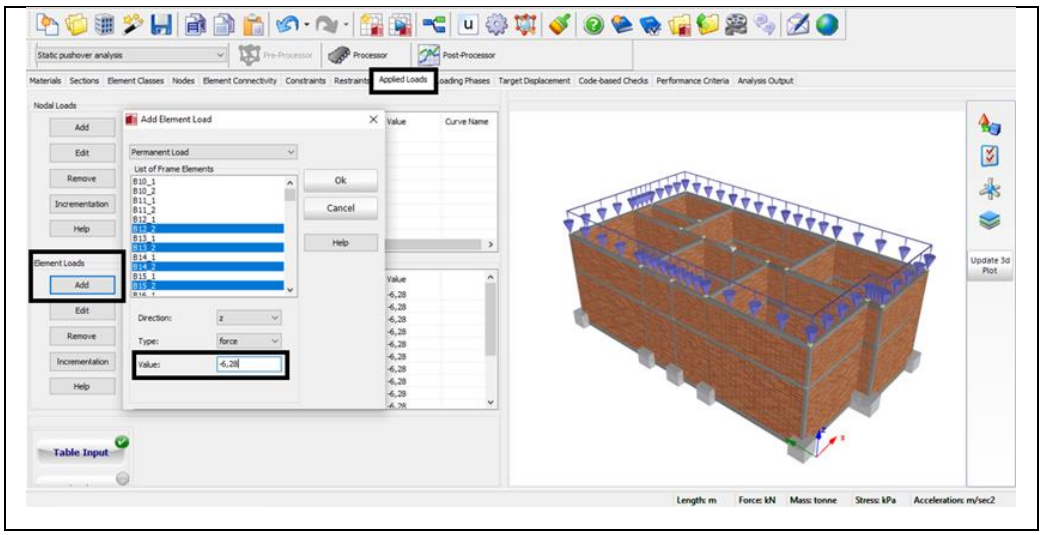
a. Tampak Depan b. Samping Kiri

c. Tampak Samping Kanan d. Tampak Belakang

Gambar 1. Gambar struktur NEB yang ditinjau.

Pemodelan struktur dilakukan dengan sistem struktur rangka tanpa dan dengan dinding pengisi (*infill frame*), bentuk rangka 3 dimensi ini dibuat dengan program *seismostruct* seperti tampak pada Gambar 2, untuk dapat mengetahui perbedaan antara NEB tanpa dinding pengisi dan dengan dinding pengisi. Setelah melakukan pemodelan, selanjutnya menginput data pembebanan kedalam program seismostruct. Setelah pemodelan struktur dan pemasukan data struktur sesuai dengan material dan spesifikasi yang digunakan selesai dilakukan, serta pembebanan juga telah diinput kedalam program *seismostruct*, maka tahapan selanjutnya yaitu melakukan analisis struktur *(run analisis*).

Run analisis dilakukan untuk melakukan perhitungan dalam menentukan gaya-gaya dalam dan respon struktur yang terjadi. Perhitungan dilakukan berdasarkan standar masing-masing yang berkaitan seperti hitungan untuk pengaruh beban gempa yang didasarkan pada tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non gedung, yang dimana pada penelitian ini mengacu pada (SNI 1726:2019). Setelah analisis data selesai dilakukan selanjutnya akan memperoleh output dari analisis tersebut yang selanjutnya dapat dibuat kesimpulan sesuai dari output tersebut



Gambar 2. Model Struktur NEB dalam Seismostruct

3. ANALISIS PUSHOVER

Hasil analisis pushover yaitu kurva kapasitas yang menunjukkan perilaku struktur yang menghubungkan antara perpindahan atap (*roof displacement*) pada sumbu X dalam satuan meter (m) dan gaya geser dasar (*base shear*) pada

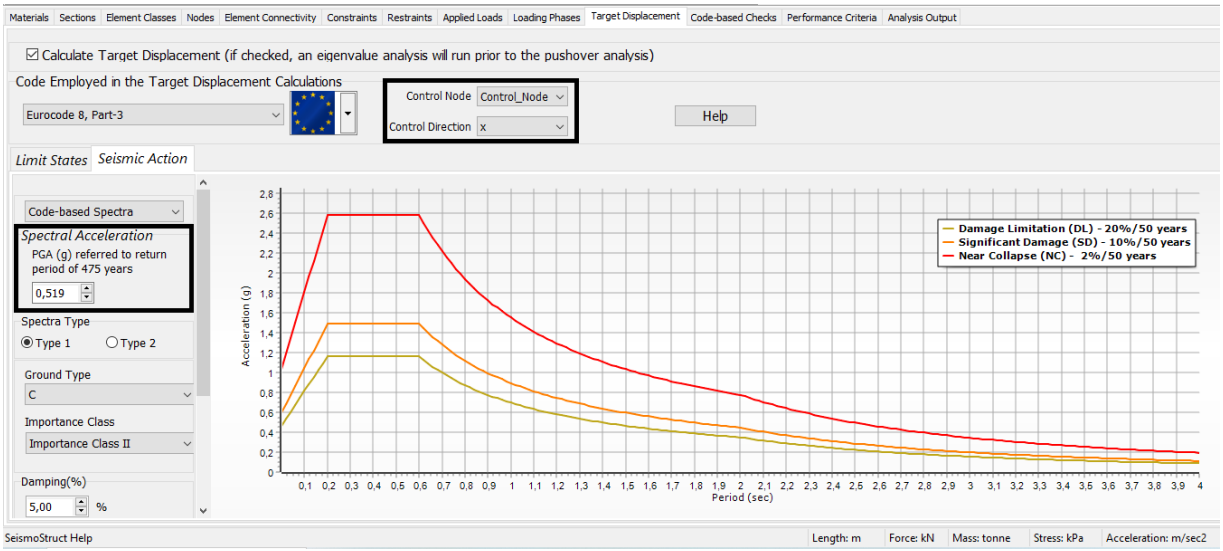
sumbu Y dalam satuan (kN). Hasil kurva kapasitas dari analisis pushover untuk model struktur dengan batas kerusakan berdasarkan *performance criteria SeismoStruct*. Adapun tahapan-tahapan yang harus dilakukan dalam melakukan analisis static pushover dalam program *seismostruct*, yaitu sebagai berikut:

Loading phases

Penentuan target displacement pada seismostruct merupakan langkah penting sebelum dilakukan running analysis. Pada tahap ini beban akan ditingkatkan sampai titik keruntuhan struktur tercapai. Oleh karena itu, dibutuhkan nilai kunci yaitu berapa kali struktur akan diberikan dorongan beban lateral *(steps)* dan sejauh apa struktur akan didorong atau bisa disebut dengan target perpindahan. Pada seismostruct, tahap ini masuk kedalam fase *"loading phases"*.

Control node pada target displacement

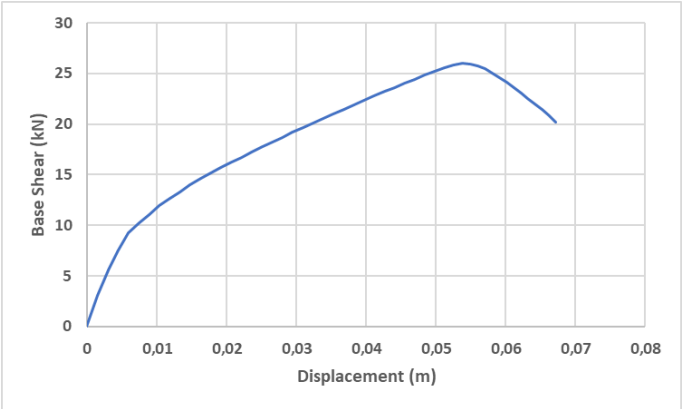
Pada tahap ini menentukan *control node* yang sesuai atau harus sama dengan analisis output pada seismostruct. Selain itu juga menentukan nilai Peak Ground Acceleration (PGA). Nilai PGA didapat dari website RSA Cipta Karya dengan nilai PGA pada daerah Kendal, Pacitan, yaitu 0,519.



Gambar 3. Penentuan Control Node dan PGA

Kurva kapasitas

Setelah dilakukan tahap pre-processor sebelumnya, selanjutnya masuk ke tahap processor yang dimana pada tahap ini kita dapat melakukan running analysis dari model yang telah dibuat. Berdasarkan hasil running analisis terhadap struktur yang telah dimodelkan, terdapat output berupa kurva kapasitas, yang dimana kurva kapasitas ini merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara beban lateral yang dapat ditahan oleh struktur (*base shear*) dan perpindahan lateral yang dialaminya *(displacement).* Adapun kurva kapasitas hasil dari analisis static pushover dengan program seismostruct dapat dilihat pada Gambar 4 untuk bangunan NEB tanpa dinding pengisi. Analisa juga dilakukan pada model bangunan NEB dengan dinding pengisi.



Gambar 4. Kurva Kapasitas bangunan NEB tanpa dinding pengisi

4. SPEKTRUM KAPASITAS

Setelah didapatkan kurva kapasitas dari hasil analisis static pushover, selanjutnya kurva kapasitas tersebut diubah menjadi spektrum kapasitas dengan format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*). Spektrum kapasitas menggambarkan hubungan antara *spectra displacement* (Sd) dan *spectra acceleration* (Sa) yang terjadi saat

struktur menerima percepatan tanah tertentu.

Perhitungan nilai α1 dan PF1

Sebelum dilakukan konversi kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas perlu dilakukan eigenvalue analisis untuk mengetahui massa struktur. Massa struktur akan dihitung secara otomatis pada seismostruct dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Massa pada Struktur yang ditinjau

Lantai	Massa (m)	Berat (W) (m x 9,81)
Roof	57,994	568,929
Lantai dasar	13,903	136,391
Total	71,898	705,321

Setelah didapat massa dan berat struktur dari analisis eigenvalue, selanjutnya dapat mengubah kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas dalam format ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum) seperti Tabel 2.

Tabel 2. Konversi ke ADRS

Lantai	W (kN)	m	ϕ	ϕ^2	m x ϕ	m x ϕ^2
Roof	568,9299	57,9949	0,000548	0,000000301	0,031807	0,0000174
Lantai dasar	136,3913	13,9033	0,000433	0,000000187	0,006016	0,0000026
$\sum$	705,3213	71,89819	0,000981	0,000000488	0,037822	0,0000200

Selanjutnya dilakukan perhitungan α1 dan PF1 sebagai parameter untuk mengubah kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas. Adapun perhitungannya sebagai berikut:

$$\alpha 1 = \frac{(m \times \phi)^2}{(m \times \phi^2) \times m}$$

$$= \frac{(0{,}037822)^2}{0{,}0000200 \times 71{,}89819}$$

$$= 0{,}992502$$

$$PF1 = \frac{(m \times \phi)}{(m \times \phi^2)}$$

$$= \frac{(0{,}037822)}{(0{,}0000200)}$$

$$= 1886{,}696$$

$$PF1 \times \phi roof = 1886{,}696 \times 0{,}000548$$

$$= 1{,}03474$$

Konversi ke spektrum kapasitas

Setelah didapat nilai α1 dan PF1, selanjutnya dapat melakukan perhitungan konversi dari kurva kapasitas (displacement - base shear) menjadi spektrum kapasitas (spectral displacement – spectral acceleration) berdasarkan teori dalam ATC-40. Adapun perhitungan Sa dan Sd sebagai berikut:

$$Sd = \frac{\Delta roof}{PF1 \times \phi roof}$$

$$= \frac{0{,}00048814}{1{,}03474}$$

$$= 0{,}000472$$

$$Sa = \frac{V/W}{\alpha 1}$$

$$= \frac{18{,}2009/705{,}3213}{0{,}992502}$$

$$= 0{,}026$$

dengan :

PF1 = Faktor partisipasi ragam untuk ragam 1

α1 = Koefisien massa ragam untuk ragam 1

V = Gaya geser dasar

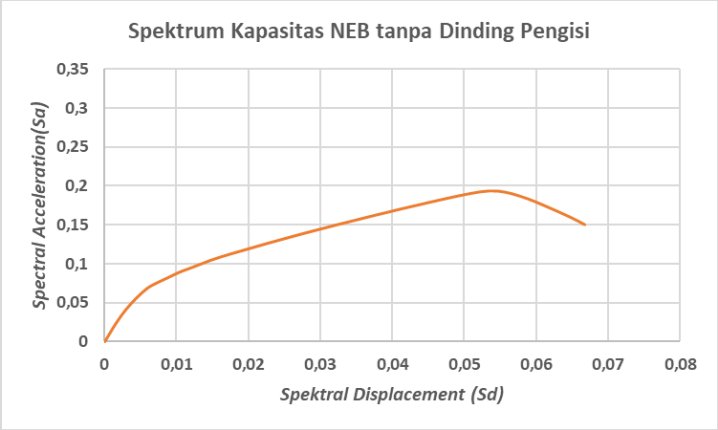
W = Berat struktur

Δroof = Perpindahan atap

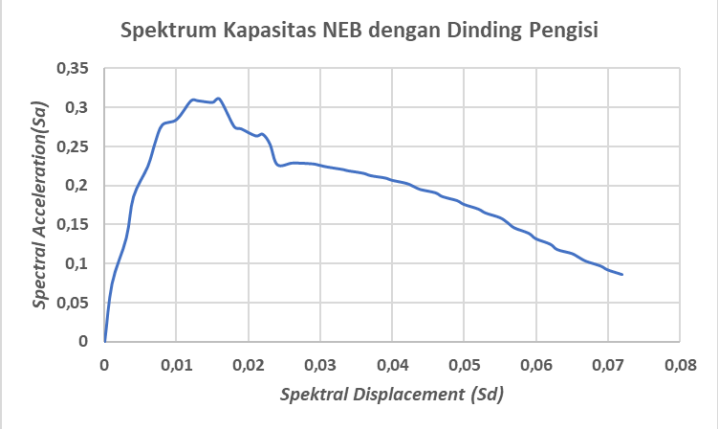
Sd = Spektrum perpindahan

Sa = Spektrum percepatan

Setelah dihitung Sd dan Sa hingga step 50, maka diperoleh hasil kurva spektrum kapasitas seperti yang tertera pada Gambar 5 dan Gambar 6 berikut ini.

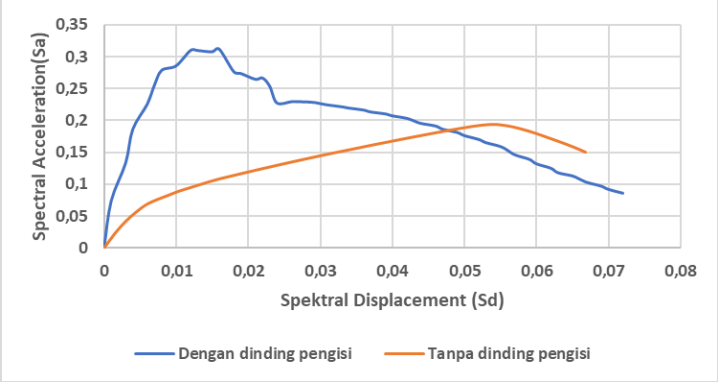


Gambar 5. Spektrum Kapasitas Bangunan NEB tanpa Dinding Pengisi



Gambar 6. Spektrum Kapasitas Bangunan NEB dengan Dinding Pengisi

Berdasarkan spektrum kapasitas pada gambar 5, dapat diketahui nilai dengan *spectral acceleration* (Sa) maksimum sebesar 0,194 yang terjadi pada *spectral displacement* (Sd) 0,053 pada struktur eksisting bangunan NEB tanpa Dinding Pengisi. Sedangkan berdasarkan hasil spektrum kapasitas pada Gambar 6 dapat diketahui nilai *spectral acceleration* (Sa) maksimal sebesar 0,311 yang terdapat pada *spectral displacement* (Sd) 0,016 untuk bangunan NEB dengan dinding pengisi. Dari Gambar 5 dan Gambar 6 kemudian dapat dilakukan perbandingan nilai Spektrum Kapasitas untuk bangunan NEB tanpa dinding pengisi dan NEB dengan dinding pengisi seperti tampak pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan Spektrum Kapasitas Bangunan NEB

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan, didapatkan perbedaan nilai kurva spektrum kapasitas. Tampak perbedaan bentuk Spektrum Kapasitas Bangunan NEB tanpa dinding pengisi jika dibandingkan dengan NEB dengan dinding pengisi. Nilai *spectral acceleration* (Sa) maksimal pada bangunan NEB dengan dinding pengisi lebih tinggi jika dibandingkan dengan bangunan NEB tanpa dinding pengisi pada posisi *spectral displacement* (Sd) yang lebih rendah. Hal ini menunjukan bahwa dinding pengisi dapat memberikan pengaruh kekakuan pada bangunan NEB .

DAFTAR PUSTAKA

Ahsani, M. (2023). *Jalur Ring of Fire Butuh Bangunan Tahan Gempa*. https://radarmadiun.jawapos.com/pacitan/801717977/jalur-ring-of-fire-butuh-bangunan-tahan-gempa

Almufid, A., & Hidayah, S. (2019). Perencanaan Struktur Atas Gedung Hunian 12 Lantai Menggunakan SRPMK. *Jurnal Teknik*, *8*(2). https://doi.org/10.31000/jt.v8i2.2229

Bastian, E. (2020). Analisis Pengaruh Infilled Frame Terhadap Displacement Analysis the Effect of Infilled Frame To Displacement Frame Structure. *Jurnal Penelitian Dan Kajian Ilmiah Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat*, *XIV*(01), 52–59.

Benjamin Lumantarna, Iksan Gunawan, & Eka Wijaya. (2004). Keandalan Analisa Pushover Untuk Meramal Prilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka Dengan Reentrant Corner. *Civil Engineering Dimension*, *6*(1), 1–6. http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/civ/article/view/15580

Kristiawan, S. A., Safarizki, H. A., Purwanto, E., Sangadji, S., Trisnawan, A. D., & Nugroho, T. S. (2024). Damage State of Non-Engineered Residential Buildings Owing To Earthquakes: a Case Study in Pacitan Regency, Indonesia. *Civil and Environmental Engineering*, *20*(1), 426–439. https://doi.org/10.2478/cee-2024-0033

Kristiawan, S. A., Safarizki, H. A., Purwanto, E., Sangadji, S., Trisnawan, A. D., & Nugroho, T. S. (2023). Penentuan Batasan Tingkat Kerusakan Seismik Pada Bangunan Non-Engineered di Pacitan. *KoNTekS Ke-17 Balikpapan*, 558–568.

Mamesah, H. Y., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2014). Analisis Pushover pada Bangunan dengan Soft First Story. *Jurnal Sipil Statik*, *2*(4), 214–224.

Pascanawaty, M. S., Ernawati, A., Tech, S. T. M., Teknik, S. F., & Mataram, U. M. (2020). Analisis Perkuatan Struktur Kerangka Abngunan Bertingkat terhadap Beban Gempa dengan Infilled Frame. *Ulul Albab*, *24*(2), 80–90.

Pramudhita, G., & Buwono, H. K. (2019). Analisis Nonlinier Static Pushover Struktur Gedung Bertingkat Soft Story Dengan Menggunakan Material Beton Bertulang Dan Beton Prategang Pada Balok Bentang

Panjang. *Jurnal Konstruksia*, *10*(2), 95–106.

Safarizki, H. A., Kristiawan, S. A., & Basuki, A. (2013). Evaluation of the Use of Steel Bracing to Improve Seismic Performance of Reinforced Concrete Building. *Procedia Engineering*, *54*, 447–456. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.040

Sudarsana, I. K., Widiarsa, I. B. R., Negara, M. K. A., & Wirawan, I. P. A. P. (2023). Pengaruh Dinding Bata Bertulang Terhadap Kinerja Struktur Rangka Dengan Dinding Pengisi (Infilled Frame). *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil Dan Teknik Informasi*, *6*(1), 1–10. https://doi.org/10.38043/telsinas.v6i1.4224

Sultan, M. A. (2016). Evaluasi Struktur Beton Bertulang. *Jurnal Sipil Sains*, *06*, 1–8.

Utami, A. M. D. (2019). Analisis Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Metode Respon Spectrum Ditinjau pada Drift dan Displacement Menggunakan Software ETABS. *Jurnal Infrastruktur*, *4*(1), 65–71. https://doi.org/10.35814/infrastruktur.v4i1.721

KARAKTERISTIK AIR ALKALI PH 9 DALAM CAMPURAN MATRIKS-SEMEN

Muhammad Noor Asnan[1*] , Muh Syahrul[1] , Vebrian[2], Rusandi Noor[1]

[1]Fakultas Sains dan teknologi, Univeritas Muhammadiyah Kalimantan Timur, Jalan Ir.H.Juanda Samarinda*
e-mail : mna985@umkt.ac.id
[1]Program Studi Teknik Sipil, Univeritas Muhammadiyah Kalimantan Timur, Jalan Ir.H.Juanda Samarinda
e-mail : smuh9858@gmail.com
[2]Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala, Jalan Dinoyo Surabaya
e-mail : vebrian.sipil@gmail.com
[1]Program Studi Teknik Sipil, Univeritas Muhammadiyah Kalimantan Timur, Jalan Ir.H.Juanda Samarinda
e-mail : rn903@umkt.ac.id

ABSTRAK

Air merupakan media untuk terjadinya proses reaksi hidrasi semen. Air alkali merupakan air yang bersifat basa dengan kadar pH lebih dari 7. Penggunaan air alkali dalam proses pembuatan beton masih belum banyak diketahui karakteristiknya. Penelitian ini menggunakan air alkali pH 9 sebagai campuran matriks. Dari studi ini dapat ditentukan pengaruhnya terhadap konsistensi normal, waktu ikat semen dan kuat tekan. Pengujian dilakukan dengan membuat sampel campuran air alkali dan semen yang diukur mengunakan alat vicat. Pengecoran matriks menggunakan kubus 5 x 5 x 5 cm dan dirawat mengunakan air alkali pH 9. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, 14, 21 dan 28 hari. Kemudian air pH 7 digunakan sebagai pembanding. Hasil yang diperoleh nilai Konsistensi normal campuran matriks dengan air pH 9 dibandingkan dengan pH 7 menunjukkan tidak berpengaruhnya nilai pH yang tinggi, dimana rentang konsistensi sebesar 27% sampai 28%. Proses pengikatan semen menggunakan air pH 9 lebih cepat 30 menit dibandingkan dengan air pH 7. Kuat tekan matriks dengan penggunaan air pH 9 memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dan optimal dibandingkan air pH 7. Peningkatan kuat tekan matriks pada umur 3 hari yaitu sebesar 16,25%, umur 7 hari, 14 hari, 21 hari dan 28 hari berturut-turut 14,87%, 18,05%, 17,66%, dan 3,38%. Dan pada perkembangan umur matriks, penggunaan air pH 9 pada umur 28 hari mengalami penurunan sebesar 8,10% dari umur 21 hari. Sedangkan pH 7 menghasilkan pola meningkatnya kuat tekan dengan bertambahnya umur. Untuk pengecoran beton yang memerlukan pengikatan awal yang lebih cepat dapat menggunakan air alkali pH 9.

Kata kunci: Air alkali pH 9, Kuat Tekan, Konsistensi normal, Matriks, Waktu Ikat

1. PENDAHULUAN

Unsur utama pembentuk campuran beton terdiri dari semen, air, pasir dan batu. Mortar adalah campuran antara semen, air dan pasir sedangkan matriks merupakan campuran semen dan air. Untuk mengetahui pengaruh air dalam campuran beton dimulai dengan mempelajari proses campuran matriks (Asnan, 2019).

Semen merupakan perekat hidrolis yang memerlukan air buat proses hidrasi (Gagg, 2014). Banyaknya air untuk proses hidrasi sangat tergantung berasal komposisi senyawa pada semen dan kehalusan semen (Rambabu, 2016) . Bila air buat proses hidrasi berkurang, maka tak seluruh butiran semen akan terhidrasi, demikian pula bila air terlalu banyak, maka kekuatan pasta semen akan menurun. Maka asal itu perlu dicari beberapa kebutuhan air yang optimum sebagai akibat proses hidrasi bisa berjalan sempurna serta kekuatan semen dapat mencapai maksimum. Buat mengetahui berapa poly air yang dibutuhkan untuk dilakukan pengujian konsistensi, berdasarkan standar SNI atau ASTM buat pengujian konsistensi dilakukan menggunakan dengan alat vicat (SNI 03-6826, 2002). Semen yang dicampur dengan air akan terjadi proses hidrasi semen dan mulai terjadi pengikatan serta kemudian mengeras (Kaufman, 2020). Lamanya proses ikatan sangat tergantung pada komposisi senyawa dalam semen dan suhu udara disekitarnya. Saat pengikatan pada pasta semen ada 2 jenis, yaitu waktu pengikatan awal dan waktu pengikatan akhir (Neville, 2003).

Air merupakan unsur utama campuran dalam proses pembuatan beton (Reddy, 2018). Kandungan air disetiap wilayah memiliki sifat fisik, sifat kimia dan nilai pH yang berbeda, tergantung dari kondisi lingkungannya (Babu, 2018). Nilai pH air yang berbeda akan mempengaruhi karakteristik beton seperti workability, kuat tekan, proses hidrasi semen, waktu pengerasan dan waktu ikat semen (Ojo, 2019).

Air kangen water (alkali) adalah air dengan kadar pH basa dengan sifat lembut,berenergi, pencucian yang memiliki kombinasi karakteristik air yang unik. Air ini juga bersifat mikro dengan kemampuan menyerap yang tidak tertandingi dalam tubuh. Kaya akan mineral alkali, membantu menyangga istilah asam pada tubuh. Dengan kelebihan elektron yang tersedia, AAT membuat sel menghancurkan radikal bebas berbahaya (Khushboo, 2014).

Menurut Shirahata meneliti bahwa air alkali terionisasi merupakan air yang bersifat basa, kaya akan komponen hidrogen, sedikit molekul air dan memiliki potensial redoks negatif Air ini diketahui memiliki aktivitas antioksidan

karena dapat mengurangi radikal bebas atau reactive oxygen species (ROS) dalam tubuh. Salah satu produk air alkali yaitu air kangen water pH 9 yang didapatkan dari hasil proses ionisasi air menggunakan mesin Enagic. Air yang masuk kedalam mesin terlebih dahulu disaring dengan melalui 3 lapis filter berdaya bersih tinggi untuk menghilangkan bahan-bahan seperti, karat, timbal, klorin, bakteri dan bau (Shirahata, 2012). Penggunaan air pH basa untuk campuran maupun perawatan beton dapat mempengaruhi kuat tekannya. Semakin tinggi pH air yang digunakan maka kuat tekan yang dihasilkan semakin menurun dari kuat tekan beton normal (Meidiani, 2017). Namun ditemukan juga bahwa kekuatan meningkat dengan peningkatan pH air pencampuran (Dutta, 2017)

Selain untuk campuran beton, air digunakan untuk proses perawatan beton atau curing yang bertujuan untuk menjaga suhu beton sehingga dapat mencapai mutu yang diinginkan (Li, 2020), . Selain kualitas material penyusun beton, metode pelaksanaan perawatan beton juga menjadi hal yang berpengaruh terhadap mutu yang direncanakan (Putri,2021). Pada penelitian Syaifudin, proses curing menggunakan air campuran Co(NH2)2 atau urea pada sampel beton mutu fc' 20 MPa dapat meningkatkan kuat tekan dari umur 7 hari namun mengalami penurun pada umur 28 hari (Syaifudin, 2022).

Konsistensi normal merupakan karakteristik banyaknya air dalam proses hidrasi semen. Sedangkan waktu ikat semen adalah saat terjadinya proses hidrasi semen dan mulai terjadi ikatan serta waktu mengerasnya semen (Neville, 2003).

Konsistensi Semen Portland :

$$\text{Konsistensi} = \frac{Berat\ Air}{Berat\ Semen} x\ 100\% \quad (1)$$

Daya ikat semen sangat berpengaruh terhadap keberhasilan dalam sebuah adukan matriks dan campuran mortar maupun beton. Adukan atau campuran yang dibuat harus segera dicetak. Oleh karena itu sangat penting sekali untuk mengetahui berapa lama waktu pengikatan semen yang akan terjadi (Kaufmann, 2020).

Waktu ikat awal adalah waktu yang dibutuhkan sejak semen bercampur dengan air dari kondisi plastis menjadi tidak plastis, sedangkan waktu ikat akhir yaitu waktu yang dibutuhkan sejak semen bercampur dengan air dari kondisi plastis menjadi keras. Yang dimaksud dengan mengeras pada waktu ikat akhir ialah hanya bentuknya saja yang sudah kaku, akan tetapi matriks semen tersebut belum boleh dibebani, baik oleh berat sendiri maupun beban dari luar (Neville, 2003).

Studi ini dilakukan dengan metode eksperimen penggunaan air alkali pH 9 sebagai campuran matriks. Dari studi air ini dapat ditentukan karakteristik campuran air pH 9 terhadap konsistensi normal dan waktu ikat campuran serta kuat tekan matriks. Selanjutnya dibuat campuran matriks menggunakan air pH 7 untuk mengetahui perbedaan dengan air pH 9.

2. METODE PENELITIAN

Air yang digunakan terdiri air pH 9 yang berasal dari produk mesin Enagic (Kangen Water) (Rosa, 2012) dan air pH 7 berasal dari air yang berada di laboratorium. Sedangkan semen yang digunakan produk merk Tiga Roda.

Langkah penelitian meliputi : pertama pengujian konsistensi normal campuran semen dan air. Pengujian dilakukan sebanyak enam kali dengan air pH 7 dan air pH 9. Persentase air yang digunakan sebesar 20%, 22%, 24%, 26%, 28% dan 30%, dengan berat semen 300 gram. Kemudian diukur penurunan dengan alat vicat untuk masing-masing campuran selama 30 detik. Hasil pengujian digambarkan dengan grafik hubungan konsistensi normal dengan nilai penurunan jarum vicat.

Langkah kedua pengujian waktu ikat semen. Pengujian waktu ikat semen menggunakan semen tiga roda sebanyak 300 gram dan air pH 7 serta air pH 9 sebanyak 84 mm menggunakan alat vicat untuk menguji waktu ikat awal semen dan waktu akhir semen. Waktu pengikatan awal yaitu ketika jarum penetrasi menembus sedalam 25 mm pada pasta semen, sedangkan waktu pengikatan akhir yaitu ketika jarum penetrasi tidak dapat menembus pasta semen atau jarum penetrasi nya 0 mm.

Langkah ketiga pengujian kuat tekan matriks pada umur 3, 7, 4, 21 dan 28 hari menggunakan mesin uji tekan (SNI 1974, 2011). Perawatan benda uji matriks direndam menggunakan air masing-masing pH 9 dan pH 7 (SNI 03 2493, 2011). Benda uji yang dibuat menggunakan cetakan kubus 5 x 5 x 5 cm dengan total 30 sampel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil

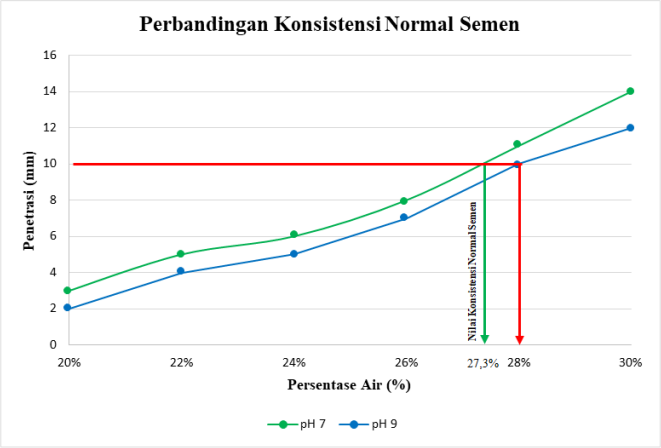
a. Pengujian Konsistensi Semen

Dalam pengujian konsistensi semen ini bahan yang digunakan yaitu semen sebanyak 300 gram, air sebanyak 84 mm dan alat vicat untuk mengukur konsistensi semen. Pengujian konsistensi semen portland mengacu pada SNI 03-6826-2002, dimana diukur penurunan 10±1 mm selama 30 detik. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Konsistensi Semen

No	Berat Semen (gram)	Persentase Air (%)	Volume Air (mm)	Penurunan Jarum (mm)	
				Air pH 7.0	Air pH 9.0
1	300	20	60	3	2
2	300	22	66	5	4
3	300	24	72	6	5
4	300	26	78	8	7
5	300	28	84	11	10
6	300	30	90	14	12

Berdasarkan Tabel 1 diatas dibuat grafik hubungan antara persentase air dan nilai penurunan jarum untuk menentukan konsistensi normal semen. Dari Grafik 1 konsistensi normal didapat dari penurunan sebesar 10 mm yaitu sebesar 28% untuk campuran air pH 9 dan 27,3% untuk air pH 7.



Gambar 1. Grafik perbandingan konsistensi semen antara air pH 7 dan pH 9

Dari Gambar 1 terlihat bahwa nilai konsistensi normal campuran semen pada penggunaan air pH 9 tidak signifikan perbedaannya dengan air pH 7.

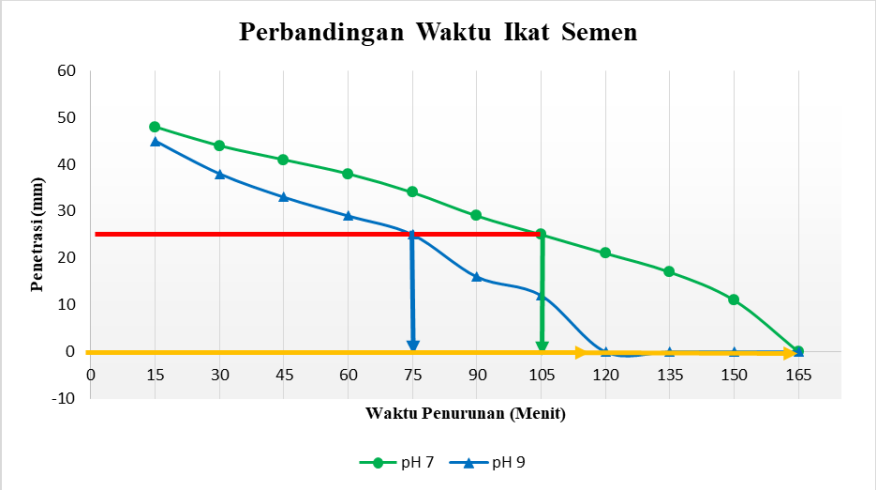
b. Pengujian Waktu Ikat Semen

Tabel 2. Perbandingan Waktu Ikat Semen antara Air pH 7 dan Air pH 9

Waktu Penurunan (Menit)	Penurunan Jarum (mm)	
	Air pH 7	Air pH 9
15	48	45
30	44	38
45	41	33
60	38	29
75	34	25
90	29	16
105	25	12
120	21	0
135	17	0
150	11	0
165	0	0

Berdasarkan tabel 2 dan gambar 2 grafik perbandingan hasil pengujian waktu ikat semen diatas didapatkan dimana

untuk air kangen water terjadi waktu ikat normal semen pada menit ke 75 dengan penetrasi jarum vicat 25 mm dan pengikatan akhir terjadi pada waktu 120 menit dengan penetrasi jarum vicat 0 sedangkan untuk air normal (pH 7) terjadi waktu ikat normal semen pada menit 105 dengan penetrasi jarum vicat 24 mm dan pengikatan akhir terjadi pada menit 160 dengan penetrasi jarum vicat 0 mm. Maka dapat disimpulkan bahwa waktu ikat normal semen dan waktu ikat akhir semen dengan menggunakan air kangen water (pH 9) lebih cepat dibandingkan dengan menggunakan air normal (pH 7).



Gambar 2. Grafik Perbandingan Waktu Ikat Semen Air pH 7 dan Air pH 9

c. Pengujian Kuat Tekan Matriks

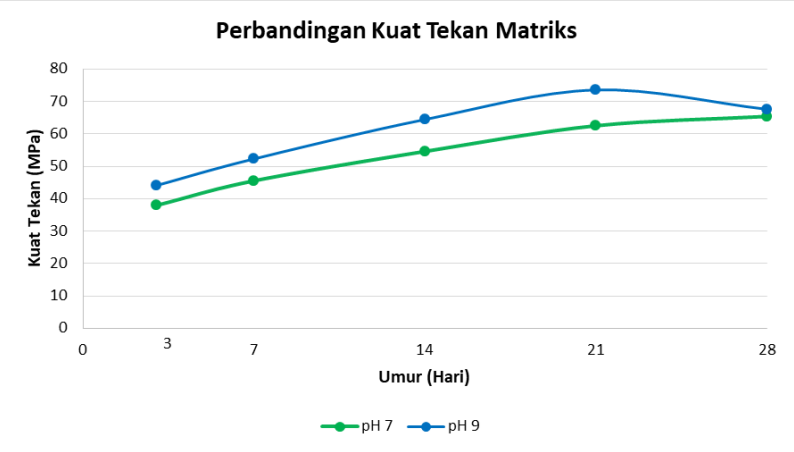
Jumlah benda uji matriks yang diuji kuat tekan sebanyak 30 benda uji dengan variasi umur 3 hari , 7 hari , 14 hari , 21 hari , 28 hari yang dibagi menjadi 15 benda uji yang menggunakan air pH 7 dan 15 uji lagi menggunakan air pH 9 dalam proses pembuatan dan perawatan sampel matriks. Hasil pengujian kuat tekan matriks dapat dilihat pada Tabel 3 serta pada gambar 3 grafik perbandingan kuat tekan matriks.

Tabel 3. Hasil uji kuat tekan matriks

Umur Matriks (Hari)	Kuat Tekan Matriks (MPa)	
	pH 7	pH 9
3	37,90	44,06
7	45,51	52,27
14	54,58	64,43
21	62,52	73,56
28	65,39	67,60

Dari Tabel 7 hasil kuat tekan matrik diatas dapat dihitung Persentase (%) kenaikan dan penurunan kuat tekan matriks dari umur 3, 7, 14, 21, dan 28 yaitu sebagai berikut :

Berdasarkan pada Tabel 3 dan perhitungan persentase kenaikan kuat tekan matriks diatas menyebutkan kuat tekan matriks dengan campuran air normal pH 7. umur 3 hari 37,90 MPa, 7 hari 45,51 MPa dengan kenaikan kuat tekan sebesar 20,06%, umur 14 hari 54,58 MPa dengan kenaikan kuat tekan sebesar 19,93%, umur 21 hari 62,52 MPa dengan kenaikan kuat tekan sebesar 14,55%, dan umur 28 hari 65,39 MPa dengan kenaikan sebesar 4,59%. Sedangkan dengan campuran air pH 9 kuat tekan matriks pada umur 3 hari yaitu 44,06 MPa, 7 hari 52,27 MPa dengan kenaikan kuat tekan sebesar 18,63%, umur 14 hari 64,43 MPa dengan kenaikan kuat tekan sebesar 23,26%, umur 21 hari 73,56 MPa dengan kenaikan sebesar 14,16%, dan pada umur 28 hari 67,60 MPa dengan penurunan kuat tekan sebanyak 8,10%.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Kuat tekan matriks

Berdasarkan pada gambar 3 grafik perbandingan diatas menjelaskan kuat tekan matriks dengan menggunakan air pH 7 dan air pH 9 tidak begitu jauh perbedaan kuat tekan matriks, dimana kuat tekan matriks dengan penggunaan air normal pH 7 mengalami kenaikan kuat tekan setiap umur dengan persentase kenaikan yang paling kecil sebesar 4,59% pada umur 28 hari dan kenaikan yang paling besar sebesar 20,06% pada umur 7 hari . Sedangkan kuat tekan matriks dengan penggunaan air pH 9 mengalami kenaikan kuat tekan dengan persentase kenaikan yang paling besar pada umur 14 hari yaitu 23,26%, dan mengalami penurunan kuat tekan pada umur setelah 21 hari yaitu sebesar -8%. Maka bisa ditarik kesimpulan bahwa penggunaan air pH 9 dalam pembuatan matriks mengalami penurunan kuat tekan setelah umur 21 hari yang menunjukan bahwa pada umur 28 hari matriks kuat tekan nya menurun.

Tabel 4. Perbandingan Persentase Deviasi Kuat Tekan Matriks

Umur Matriks (Hari)	Kuat Tekan (MPa)		Perbandingan	
	Air pH 7	Air pH 9	Deviasi (%)	Keterangan
3	37,90	44,06	16,25	Naik
7	45,51	52,27	14,87	Naik
14	54,58	64,43	18,05	Naik
21	62,52	73,56	17,66	Naik
28	65,39	67,60	3,38	Naik

Dari Tabel 4 diatas untuk mendapatkan nilai deviasi yaitu kuat tekan pH 9 dikurang kuat tekan air pH 7 dibagi air pH 7 dikali 100. Dari Tabel 4,13 hasil perbandingan persentase deviasi diatas menunjukan bahwa kuat tekan matriks dengan penggunaan air pH 9 dengan nilai deviasi pada umur 3 hari yaitu sebesar 16,25%, umur 7 hari, 14 hari, 21 hari dan 28 hari berturut-turut 14,87%, 18,05%, 17,66%, dan 3,38%. Dimana nilai deviasi paling rendah yaitu sebesar 3,38% pada umur 28 hari dan nilai persentase deviasi paling tinggi yaitu 18,05% pada umur 14 hari. Maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan air pH 9 terhadap kuat tekan matriks air pH 7 mengalami kenaikan kuat tekan pada setiap umur dengan rata-rata kenaikan deviasi sebesar 14,04%.

3.2 Pembahasan

Nilai konsistensi semen menggunakan air pH 9 dengan persentase air 28% atau 84 ml yaitu dengan penetrasi jarum vicat 10 mm, sementara untuk nilai konsistensi semen menggunakan air pH 7 dengan persentasi air yang sama yaitu sebesar 11 mm.

Sedangkan hasil pengujian waktu ikat semen menggunakan air pH 9 lebih cepat terjadi proses pengikatan awal dan akhir semen dibandingkan dengan menggunakan air pH 7 dengan waktu pengikatan awal terjadi pada menit ke 65 dengan penetrasi jarum vicat 25 mm, dan waktu pengikatan akhir terjadi menit 120 dengan penetrasi jarum vicat 0 mm, sementara waktu pengikatan awal dan akhir dengan penggunaan air pH 7 yaitu 105 menit dengan nilai penetrasi jarum vicat 24 mm dan 160 menit dengan penetrasi 0 mm sebagai waktu ikat akhir.

Berdasarkan hasil analisa perbandingan kuat tekan benda uji matriks diatas menunjukan kuat tekan matriks dengan penggunaan air pH 9 memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dan optimal dibandingkan dengan air pH 7, Namun mengalami penurunan kuat tekan pada umur 28 hari, meskipun penurunan kuat tekan tidak begitu signifikan tapi ini mengindikasikan bahwa penggunaan air pH 9 mengalami penurunan kuat tekan setelah umur 21 hari tepat nya pada umur 28 hari.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Dari hasil peneltiaan diatas dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan air pH 9 tidak begitu berpengaruh secara signifikan terhadap nilai konsistensi semen. Berdasaarkan hasil analisa diatas dapat disimpulan bahwa penggunaan pH 9 sangat berpengaruh terhadap waktu pengikatan awal dan akhir semen, walaupun tidak begitu signifikan tapi hal menunjukan bahwa proses lebih cepat terjadi pengikatan awal dan akhir bila dibandingkan dengan air pH 7. Kuat tekan yang tercapai pada umur 28 hari untuk pH 7 sebesar 65,39 MPa dan pH 9 sebesar 67,60 MPa. Hubungan kuat tekan terhadap umur menunjukkan pola semakin meningkat dengan bertambah umur pada pH 7. Dan terjadi trend penurunan kekuatan pada umur 28 hari untuk pH 9.

4.2 Saran

Selanjutnya perlu dilakukan penelitian pengaruh air alkali pH 9 terhadap kuat tekan matriks untuk umur paling sedikit sampai 90 hari agar dapat menentukan pengaruh kekuatan sesuai perkembangan umur. Selain penelitian campuran matriks perlu juga ditindaklanjuti dalam campuran beton sesuai perkembangan kekuatannya serta unsur kekuatan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

Asnan, M. N., Noor, R., & Azzahra, R. (2019). Utilization of Styrofoam-Matrix for Coarse Aggregate to Produce Lightweight Concrete. International Journal of Engineering & Technology, 8(1.1), 207-212. https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/24661.

Babu Rao, G and Sai Ramya, B (2018). Suitability of groundwater for irrigation purpose in the Ipur and Rompicherla mandals of the Guntur District, Andhra Pradesh, IJCRT, Volume 6, Issue 1 March 2018. https://www.researchgate.net/publication/330982187_Suitability_of_groundwater_for_irrigation_purpose_in_the_Ipur_and_Rompicherla_mandals_of_the_Guntur_District

Dutta, C., Rakib, A., M., Hossain, A., M., dan Rashid, H., M., (2020), Effect of maxing water pH on concrete, Proceedings of the 5 the International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development, Khulna : Khulna University of Engineering & Technology. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/999/1/012006/pdf.

Gagg, Colin R. 2014. “Cement and Concrete as an Engineering Material: An Historic Appraisal and Case Study Analysis.” Engineering Failure Analysis 40: 114–40. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.

H. R. Putri, F. Paledung, E. Bachtiar, P. Indrayani, R. Makbul dan H. U. Syarif, “The Effect of Seawater on The Compressive Strength and Split Tensile Strength in Self Compacting Geopolymer Concrete,” CIVILA, vol. 6, no. 2, pp. 197-212, 2021. https://doi.org/10.30736/cvl.v6i2.722.

H. Syaifudin and R. R. Dhana, "The Effectiveness of the Water Additional Ingredient Urea Co(NH2)2 To The Concrete Fc' 20 Mpa On Curing Process," CIVILA, vol. 7, no. 2, pp. 171-182, 2022. https://doi.org/10.30736/cvl.v7i2.892.

Kaufmann, Josef. 2020. “Evaluation of the Combination of Desert Sand and Calcium Sulfoaluminate Cement for the Production of Concrete.” Construction and Building Materials 243: 1–10. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118281.

Khushboo, P., Lipsa, S., Priti, Y., Divya, P., Kaenat, S., Shivani, P., et al. (2014). Alkaline Water: The Disease Fighting Water. World Journal of pHarmaceutical Research, 3(3), 38.

Li, Zhen, Jiaping Liu, Jianzhuang Xiao, and Peihua Zhong. 2020. “Internal Curing Effect of Saturated Recycled Fine Aggregates in Early-Age Mortar.” Cement and Concrete Composites 108: 103444. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103444.

Meidiani, S., & Hartawan, M. F. S. (2017). Penggunaan Variasi PH Air (Asam) pada Kuat Tekan Beton Normal F’c 25 MPa. Bentang: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil, 5(2), 127-134. https://doi.org/10.33558/bentang.v5i2.157.

Neville, A. (2003). Neville on concrete. ACI, Farmington Hills, Mich, USA. Page 204-209. https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/13230

Ojo, O. M. (2019). Effect of water quality on compressive strength of concrete. European Scientific Journal, 15(12), 172. https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n12p172.

Rambabu , T., Murali Sai Krishna , G. and Ramarao, V. (2016). Characteristics Study On Different Types Of Cement Mortars Replaced With SCBA as a Admixture, International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 36 Number 3- June 2016 ISSN: 2231-5381, Page 116. 10.14445/22315381/IJETT-V36P222.

Reddy Babu G., Madhusudana Reddy B., and Venkata Ramana, N (2018). Quality of mixing water in cement concrete, Materials today, Volume 5, Issue 1, Part 1, 2018, Pages 1313-1320. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.216.

Rosa MCI, Kyung-Bok J and Kyu-Jae L. 2012. Clinical Effect and Mechanism of Alkaline Reduced Water. Journal of Food and Drug Analysis.1(20), 394-97. https://doi.org/10.38212/2224-6614.2099.

Shirahata, S., Hamasaki, T., & Teruya, K. (2012). Advanced research on the health benefit of reduced water. Trends

in Food Science & Technology, 23(2), 124-131. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.10.009.
SNI 03-6826-2002, Metode Pengujian Konsistensi Normal Semen Portland dengan Alat Vicat untuk Pekerjaan Sipil, Badan Standar Nasional.
SNI 03-2493-2011, Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton Di Laboratorium, Badan Standar Nasional.
SNI 1974 : 2011, Cara Uji Kuat Tekank Beton dengan Benda Uji Silinder, Badan Standar Nasional.

STUDI EKSPERIMENTAL PERBAIKAN BETON MENGGUNAKAN SIO2 DAN SUPERPLASTICIZE

Ermitha Ambun RD[1*], Lewi Rura[2] dan Hendrik Palilu[4]

[1]Program Studi Teknik Sipil, UKI Toraja, Jl. Poros Tallunglipu Pangli, Rantepao*
***e-mail**: ambun.rombe@gmail.com*
[2]Program Studi Teknik Sipil, UKI Toraja, Jl. Poros Tallunglipu Pangli, Rantepao
e-mail: rura16@gmail.com
[3]Program Studi Teknik Sipil, UKI Toraja, Jl. Poros Tallunglipu Pangli, Rantepao
e-mail: hendrik.palilu@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu upaya untuk memperbaiki kerusakan beton dengan melakukan injeksi pada beton. Injeksi dapat dilakukan pada beton yang mengalami keretakan ataupun berlubang. Perbaikan konstruksi beton pada suatu bangunan yang diakibatkan oleh kerusakan-kerusakan tersebut sangat diperlukan karena bertujuan untuk mengembalikan daya dukung konstruksi beton kepada kondisi yang direncanakan. Kerusakan atau perubahan yang terjadi pada permukaan struktur dan massa struktur beton tidak serta merta merusak konstruksi beton secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi penggunaan SiO2 dan superplasticizer sebagai bahan injeksi untuk memperbaiki kerusakan beton. Pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Teknik Sipil UKI Toraja. Benda uji menggunakan model silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Penggunaan superplasticizer 1% dan SiO_2 1,2%, 1,4% dan 1,6% terhadap berat semen. Sampel beton umur 28 hari diuji tekan untuk mengetahui nilai kuat tekan awal. Beton yang telah retak kemudian diinjeksi menggunakn SiO2 dan superplasticizer. Sampel beton kemudian didiamkan dan diuji kembali pada umur 28 hari. Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa penggunaan superplazticizer 1% dan SiO_2 1,2%, 1,4% dan 1,6% sebagai bahan injeksi efektif memberikan perbaikan beton pada beton yang mengalami kerusakan berupa retak dengan nilai kuat tekan beton mengalami perbaikan berturut–turut sebesar 64.64%, 80.17% dan 78.47% dari kekuatan awal.

Kata kunci : *Injeksi, Kerusakan Beton, Retak, SiO2, Superplasticiser, Kuat Tekan,*.

PENGGUNAAN KARANG JAHE PADA *SELF COMPACTING CONCRETE (SCC)* MENGGUNAKAN METODE EFNARC

Rully Angraeni Safitri[1] dan Intan Sarafina[2]

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Tangerang, Jl. Perintis Kemerdekaan I, Tangerang*
***e-mail**: rullyangraenisafitri@gmail.com*

[2] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Tangerang, Jl. Perintis Kemerdekaan I, Tangerang*
e-mail: Intnsrfn07@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, memiliki kekayaan biota laut termasuk karang. Karang mati dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, termasuk sebagai bahan penyusun beton. Beton, terutama Self-Compacting Concrete (SCC) yang sering disebut Beton Memadat Sendiri, adalah material konstruksi yang populer karena kemudahan pengerjaan dan kekuatannya. SCC memiliki kemampuan mengalir dan memadat sendiri, dengan rasio air-semen rendah dan penggunaan superplasticizer. Penggunaan karang jahe diharapkan dapat menjadi alternatif pengganti sebagian material penyusun beton, mengurangi penggunaan agregat konvensional, dan menghasilkan beton ramah lingkungan dengan kuat tekan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan karang jahe sebagai agregat halus terhadap kuat tekan dan persentase capaiannya. Karang jahe yang dihancurkan menyerupai agregat halus atau pasir yaitu gradasi 2. Karang jahe digunakan sebagai subsitusi agregat halus dengan variasi persentase 0%, 10%, dan 15%. Dengan harapan kuat tekan yang dihasilkan pada penelitian ini adalah 30 MPa. Metode eksperimental dalam penelitian ini mengacu kepada EFNARC untuk membuat perancangan kebutuhan campuran SCC. Pada campuran SCC penelitian ini menambahkan penggunaan superplasticizer Sika Viscocrete-3115N untuk mengurangi kebutuhan air. Dari hasil penelitian diperoleh kuat tekan 30.87 MPa, 31.28 MPa, dan 29.94 MPa untuk variasi campuran karang jahe 0%, 10%, dan 15%. Dengan capaian peresentase dari masing-masing variasi yaitu 102.90%, 104.28%, dan 99.79%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa subsitusi penambahan karang jahe sebanyak 10% dapat meningkatkan kuat tekan SCC dari yang direncanakan.

Kata kunci: Karang Jahe, SCC, Kuat Tekan, EFNARC

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan terdapat 16.771 pulau menurut data Kementerian Kelautan dan Perikanan. Indonesia sendiri menduduki peringkat kedua negara dengan garis pantai terpanjang di dunia dengan total mencapai 99.083 km. Garis pantai merupakan batas antara daratan dan lautan, posisinya terkadang tidak stabil karena dapat tergeser oleh pasang surut air laut dan erosi pantai. Garis pantai diukur mengelilingi seluruh pantai yang menjadi batas suatu negara. Dengan kondisi wilayah tersebut Indonesia memiliki banyak biota laut seperti hewan, maupun tumbuhan atau karang. Karang merupakan salah satu biota yang dilindungi. Namun karang yang berada di bawah tekanan tiada henti akibat berbagai masalah seperti perubahan iklim, menurunnya kualitas air, penangkapan ikan berlebihan, polusi dan pembangunan pesisir yang tidak berkelanjutan mengakibatkan karang menjadi mati. Ketika setres karang mengeluarkan mikroorganisme *zooxanthellae* berupa alga dari jaringannya sehingga karang menjadi lebih sensitif dan menjadi pucat atau putih. Karang yang mati dapat dimanfaatkan untuk berbagai macam, seperti souvenir, hiasan, filter, dan lain-lain. Bahkan banyak studi yang menunjukan bahwa karang dapat digunakan sebagai bahan penyusun beton. Seperti pada jurnal Ramahayati Nuzshi dkk (2019) memanfatkan abu pecahan terumbu karang menjadi solusi bahan tambah semen untuk mendapatkan kuat tekan yang optimal. Kurniawan Adika dkk (2016) memanfaatkan terumbu karang sebagai pengganti agregat halus terhadap kuat tekan beton. Selain itu Fauzan (2022) menjelaskan efek penggunaan limbah terumbu karang pada komposit beton yang menjadikan karang menjadi pengganti agregat kasar.

Beton merupakan material yang sering digunakan dalam bidang konstruksi. Kemudahan dibentuk dan dikerjakan menjadi salah satu faktor utama dalam keunggulannya. Ada beberapa jenis beton yang digunakan dalam proses pekerjaan konstruksi seperti beton ringan, beton non pasir, beton prategang, beton pracetak, beton massa, beton yang dapat memadat sendiri dan lain-lain. Beton yang dapat memadat sendiri sering disebut juga SCC *(Self-Compacting Concrete)*, beton ini sering digunakan karena dapat mengalir dan memadat sendiri namun mempunyai kekuatan yang cukup tinggi. Dengan seiring perkembangan dan tuntutan di lapangan selain harus mudah dikerjakan beton harus mudah mengisi celah-celah tulangan yang terpasang rapat agar tidak menghasilkan rongga yang akan mengakibatkan beton itu kropos. SCC merupakan beton yang memiliki sifat dengan kemampuan alir yang tinggi. SCC juga mempunyai rasio air terhadaap semen yang rendah, dengan penggunaan superplasticizer yang cukup, dan ukuran butir

agregat yang lebih kecil dari beton normal yang biasanya digunakan agar terhidar dari segregasi. Hal ini yang menyebabkan banyak berbagai campuran beton termasuk SCC yang ramah lingkungan dari pemanfaatan sumber daya daur ulang atau sumber daya alam yang punah atau mati seperti karang untuk menghasilkan beton yang mempunyai kuat tekan yang tinggi. Pada umumnya bahan pokok campuran beton meliputi kerikil, pasir, semen, dan air. Dalam kondisi tertentu penambahan bahan tambah diperlukan untuk meningkatkan mutu campuran beton.

Dari latar belakang diatas, tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan karang yang akan dibuat sebagai agregat halus dengan persentase 0%, 10%, dan 15% tehadap kuat tekan SCC. Jenis karang yang digunakan berupa karang jahe yang akan dihancurkan dengan menyerupai pasir yang digunakan yang masuk dalam gradasi 2. Penggunaan karang jahe ini diharapkan dapat mengalami perubahan yang berdampak pada kinerja dan sifat yang diinginkan dan dapat digunakan untuk menggantikan sebagian material utsms penyusun beton. Serta sebagai alternatif mengurangi komposisi penggunaaan agregat dengan ukuran agregat yang lebih kecil agar dapat mengisi celah tulangan. Selain itu penelitian ini juga menggunakan *superplasticizer Sika Viscocrete-3115N* sebagai bahan tambah untuk mengurangi kebutuhan air. Acuan yang digunakan dalam pembuatan campuran SCC yaitu *mix design* EFNARC dengan kuat tekan rencana sebesar 30 MPa.

2. KAJIAN PUSTAKA

Menurut SNI 2847-2013 beton adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atantau tanpa bahan campuran tambahan. Beton mempunyai kelebihan yaitu dapat dengan mudah dibentuk sesuai kebutuhan konstruksi, mampu memikul beban yang berat, tahan terhadap temperatur yang tinggi, dan biaya pemeliharaan yang tinggi. Karena itu beton banyak digunakan sebagai bahan utama bangunan.

SCC

Self Compacting Concrete merupakan beton yang dapat mengalir dengan sendirinya yang dapat dicetak pada bekisting tanpa menggunakan *vibrator*. Menurut Y. Widhiastuti & A. Mujib (2021) suatu beton dikatan SCC apabila dari beton segar memenuhi kriteria *filling ability*, *passing ability*, dan *segregation resistance*. Tujuan penggunaan SCC adalah untuk mendapatkan beton dengan performa tinggi, yaitu ketika dalam keadaan segar *(fresh concrete)*, beton dapat memadat sendiri tanpa melakukan penggetaran. Pada umur dini, beton tidak mudah retak karena penyusutan. Dan pada saat beton keras, mempunyai kuat tekan dan keawetan *(durabilitas)* yang tinggi. Keuntungan penggunaan SCC yaitu mengurangi lamanya konstruksi dan besarnya upah pekerja, pemadatan dan penggetaran beton ysng dimaksudkan untuk memperoleh tingkat kepadatan optimum dapat dieliminir, mengurangi kebisingan dan mengganggu lingkungan sekitarnya, meningkatkan kepadadatan element struktur beton dan bagian yang sulit dijangkau dengan alat pemadat, dan Meningkatkan kualitas struktur beton secara keseluruhan.

EFNARC

EFNARC adalah federasi Eropa yang didedikasikan untuk bahan kimia konstruksi spesialis dan sistem beton. Pada tahun 2002 EFNARC menerbitkan “Spesifikasi & Pedoman Beton Memadat Sendiri” yang pada saat itu memberikan informasi terkini bagi produsien dan pengguna. Acuan dan kriteria mix design yang dikeluarkan oleh EFNARC dapat dilihat dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Acuan *mix design* SCC berdasarkan EFNARC

Parameter	Satuan	Nilai
Powder (Semen+Filler) per m^3	Kg	380-600
Prosentase agregat terhadap volume	%	28-35
Air per m^3	Liter	150-210
Rasio Air terhadap powder dengan volume	-	0,8-1,1
Agregat kasar per m^3	Kg	750-1000
Prosentase agregat halus terhadap total agregat	%	48-55
Superplastisizer dari powder (semen+filler)	%	1-1,5
Ukuran agregat kasar	mm	< 20

KARANG JAHE

Karang yang berasal dari terumbu karang adalah ekosistem bawah laut yang terdiri dari sekelompok binatang karang yang membentuk struktur kalsium karbonat, semacam baru kapur. Terumbu karang umumnya berupa batu kapur sehingga agregat yang berasal dari batuan ini memiliki kandungan kimia berupa $CaCO_3$ sehingga masuk dalam kelompok batuan kapur. $CaCO_3$ merupakan salah satu bahan penting dalam proses pembuatan semen (Mulyono, 2003).



Gambar 1. Karang Jahe

3. METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan studi literatur untuk mendapatkan pengetahuan dan referensi mendasar untuk melakukan campuran SCC. Dengan referensi yang ada selanjutnya dijadikan acuan dalam pembuatan perencanaan campuran sebagai dasar metode experimental pada penelitian ini. Pada penelitian ini karang jahe mati dengan ciri sudah berwarna putih seperti kapur diambil dari bibir pantai Sangrila Tanjung Kait, Mauk, Kabupaten Tangerang. Karang jahe tersebut dicuci terlebih dahulu lalu dikeringkan dan kemudian ditumbuk untuk mendapatkan ukuran butir sesuai gradasi yang diinginkan. Apabila sudah hancur dan mencapai gradasi yang diinginkan yaitu gradasi no 2 maka selanjunya dilakukan pengajuan berat jenis, pengujian gradasi, dan penyerapan kadar air pada karang jahe tersebut yang nantinya akan dijadikan sebagai bahan tambah subsitusi dengan agregat halus yaitu pasir. Pasir, krikil, semen pada penelitian ini menggunakan material yang disediakan oleh PT Bumi Prima Abadi sehingga berat jenisnya mengikuti data yang sudah tersedia. Ukuran butir agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan ukuran 10mm. Setelah pengujian material dilakukan langkah selanjutnya melakukan perhitungan untuk kebutuhan material pencampuran dengan menggunakan metode EFNARC. Kebutuhan sampel yang akan dibuat adalah sebanyak 30 dengan variasi 10 sampel untuk SCC tanpa subsitusi karang jahe (SCC A), 10 sampel selanjutnya untuk 10% subsitusi karang jahe terhadap pasir (SCC B), dan 10 sampel lagi untuk 15% subsitusi karang jahe terhadap pasir (SCC C). Setelah perhitungan kebutuhan dilakukan pencampuran, beton basah sebelum dimasukan dalam cetakan silender 15 x 30 cm dicek slumpnya agar minimal mencapai diameter 60cm. Beton yang mengering dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan perawatan dalam bak perendaman sebelum nantinya akan di uji kekuatan tekannya. Kuat tekan pada sampel benda uji akan diuji pada umur beton 7, 14, dan 28 hari. Sampel yang di uji masing-masing 3 buah diumur 7 hari, 3 buah hari diumur 14 hari dan 4 buah diumur 28 hari. Sampel yang ditekan datanya kemudian diolah untuk melihat capaian persentase kuat tekan dan persentase karang jahe berapakah yang mempunyai pengaruh besar terhadap kuat tekan SCC.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Mix Design SCC

Perencanaan perhitungan campuran SCC per m^3 menggunakan acuan EFNARC dapat dilihat dari **Tabel 1** dengan mengikuti tahapan Ngudiyono,dkk (2021) diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 2. Proporsi Campuran SCC untuk 1 m^3

Material	Nilai	Satuan
Semen	550	kg
Pasir	770	kg
Krikil	880	kg
Air	198	liter
Superplasticizer Sika Visscocrete-3115N	7,15	kg

Dari data proporsi campuran pada **Tabel 2** karena sampel yang digunakan hanya ada 10 silinder, maka terlebih dahulu menghitung volume silinder untuk mengetahui kebutuhan campuran setiap 10 silinder dengan dan tanpa campuran karang jahe. Sehingga kebutuhan material yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Proporsi Campuran SCC untuk 0,053 m^3

Proporsi	Proporsi Campuran Karang Jahe sebagai Substitusi Agregat Halus			Satuan
	Karang Jahe 0%	Karang Jahe 10%	Karang Jahe 15%	
Semen	32,07	32,07	32,07	kg
Pasir	44,89	40,4	38,16	kg
Kerikil	51,3	51,3	51,3	kg
Air	11,54	11,54	11,54	liter
Superplasticizer	0,42	0,42	0,42	kg
Karang	0	4,49	6,73	kg

Hasil Pengujian

Pengujian kuat tekan beton dilakukan sesuai dengan umur yang sudah ditentukan yaitu 7, 14, daan 28 hari. Pengujian kuat tekan benda uji dilakukan bertujuan untuk memperoleh nilai kuat tekan SCC terhadap sampel yang dibuat.

1. Variasi tanpa subsitusi karang jahe

Hasil uji tekan dan persentase dacapaian kuat tekan yang diproleh dari tanpa penggunaan karang jahe dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Tabel Kuat Tekan dan Persentasi Capaian SCC Tanpa Penggunaan Karang Jahe

Umur	Beban	Kuat Tekan	Rata-rata Kuat tekan	Capaian	Rata-rata Capaian
Hari	kN	MPa	MPa	%	%
7	430	24.35	22.46	124.87	115.18
7	415	23.5		120.51	
7	345	19.53		100.15	
14	520	29.44	29.72	111.52	112.59
14	595	33.69		127.61	
14	460	26.04		98.64	
28	550	31.14	30.87	103.80	102.90
28	565	31.99		106.63	
28	535	30.29		100.97	
28	531	30.06		100.20	

Dari Tabel 4 didapatkan hasil pengujian kuat tekan mengalami penurunan persentase disetiap umur pengujian namun kuat tekan yang diperoleh mencapai kuat tekan yang diharapkan. Untuk umur beton 7 hari mendapatkan kuat tekan rata-rata sebesar 22,46 MPa, usia 14 hari diperoleh kuat tekan 29,72 MPa, dan umur 28 hari memperoleh kuat tekan 30,87 MPa. Sehingga persentase capaian yang dihasilkan oleh beton tanpa tambahan karang jahe pada umur 28 hari yaitu 102,90% dari target kuat tekan yang diharapkan sebesar 30 MPa.

2. Variasi dengan 10% subsitusi karang jahe

Pada variasi kedua ini penggunaan karang jahe sebanyak 10% dari jumlah kebutuhan agregat halus atau pasir yang digunakan. Nantinya total jumlah agregat halus yang digunakan akan dikurangi dan ditambah dengan 10% karang jahe tersebut. Baik agregat halus maupun karang jahe ukuran butirnya disamakan yaitu masuk dalam gradasi no 2. Hasil uji tekan dan persentase capaian 10% penggunaan karang jahe dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Tabel Kuat Tekan dan Persentasi Capaian SCC Dengan 10% Penggunaan Karang Jahe

Umur	Beban	Kuat Tekan	Rata-rata Kuat tekan	Capaian	Rata-rata Capaian
Hari	kN	MPa	MPa	%	%
7	385	21.8	23.03	111.79	118.09
7	470	26.61		136.46	
7	365	20.67		106.00	
14	565	31.99	30.95	121.17	117.23
14	550	31.14		117.95	
14	525	29.72		112.58	
28	560	31.71	31.28	105.70	104.28
28	550	31.14		103.80	
28	545	30.86		102.87	
28	555	31.42		104.73	

Dari **Tabel 5** diatas menunjukan bahwa penggunaan subsitusi 10% karang jahe sama seperti tanpa menggunakan

karang jahe mengalami penurunan persentase kuat tekan capaiannya disetiap umur pengujian namun masih mencapai kuat tekan yang diharapkan. Akan tetapi hasil kuat tekan meningkat dari hasil kuat tekan SCC tanpa tambahan karang jahe. Peningkatan mencapai 2,3% untuk umur 7 hari, 3,9% untuk umur 14 hari dan 1,3% untuk umur 28 hari. Persentase capaianpun mencapai 104,28% dari target 30 MPa yaitu sebesar 31,28 MPa.

3. Variasi dengan 15% subsitusi karang jahe

Pada variasi ketiga ini penggunaan karang jahe yang dilebihkan setengah dari variasi kedua yaitu sebanyak 5%. Sehingga penambahan subsitusi karang jahe pada variasi ketiga ini adalah sebanyak 15%. Hasil uji tekan dan persentase capaian 10% penggunaan karang jahe dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Tabel Kuat Tekan dan Persentasi Capaian SCC Dengan 15% Penggunaan Karang Jahe

Umur	Beban	Kuat Tekan	Rata-rata Kuat tekan	Capaian	Rata-rata Capaian
Hari	kN	MPa	MPa	%	%
7	345	19.53	19.53	100.15	100.17
7	340	19.25		98.72	
7	350	19.82		101.64	
14	460	26.04	26.33	98.64	99.72
14	465	26.33		99.73	
14	470	26.61		100.80	
28	520	29.44	29.94	98.13	99.79
28	515	29.16		97.20	
28	530	30.01		100.03	
28	545	31.14		103.80	

Dari **Tabel 6** diperoleh penurunan kuat tekan diumur 14 hari, namun dihari ke 28 mengalami kenaikan yang tidak signifikan. Diumur 7 hari beton mencapai capaian target untuk umur 7 hari yaitu 65% dari target harapan sehingga persentase yang di peroleh 100,17%. Namun di umur 14 dan 28 hari target tidak mencapai capaian 30 MPa, kuat tekan yang dihasilkan yaitu hanya 29,94 MPa di umur 28 hari dengan persentase capaian 99,79%.

5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian diperoleh kuat tekan SCC pada umur 28 hari untuk variasi penggunaan subsitusi karang jahe 0%, 10%, dan 15% adalah 30.87 MPa, 31.28 MPa, dan 29.94 MPa. Dengan capaian peresentase dari masing-masing variasi yaitu 102.90%, 104.28%, dan 99.79%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa subsitusi penambahan karang jahe sebanyak 10% dapat meningkatkan kuat tekan SCC dari yang direncanakan. Akan tetapi untuk subsitusi penambahan karang jahe yang lebih dari itu dapat mengurangi kuat tekan yang diharapkan. Untuk keberlanjutan kemajuan inovasi dalam pengamatan campuran SCC perlu adanya tambahan variasi campuran untuk mendapatkan nilai optimum untuk mendapatkan kuat tekan dengan penambahan karang jahe sebagai agregat halus. Selain itu karena keterbatasan alat pengujian perlu dilakukan pengujian *L-shape Box Test* dan *V-Funnel Test* untuk mengetahui kemampuan SCC segar melewati celah-celah antar besi tulangan dan mengetahui ketahanan SCC segar terhadap segregasi.

DAFTAR PUSTAKA

B. S. Nasional, SNI 2847:2013, Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2013.

Chelvia, C., dkk, 2024, Analisis Pengaruh Abu Tempurung Kelapa terhadap Kuat Tekan Beton Memadat Sendiri *(Self Compating Concrete [SCC])*, J. Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil, Vol.8 No.2 (2024) pp. 255 - 262.

EFNARCH. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. In Magazine of Concrete Research (Vol. 64, Issue 5).

Fauzan., & Suciati, H., 2022, Efek Penggunaan Limbah Terumbu Karang pada Komposit Beton, Sigma Teknika, Vol.5 No.1, Juni 2022, pp. 119 – 127.

Kurniawan, A., dkk., 2016, Pengaruh Pemanfaatan Pecahan Terumbu Karang sebagai Pengganti Agregat Halus terhadap Kuat Tekan Beton, *Jurnal Inersia*, Vol.8 No.2, Oktober 2016, pp. 17 – 24.

Mulyono, T. 2003. Teknologi Beton. Yogyakarta. Andi Publishing.

Ningrum, N. P. A., dkk. (2024) Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Campuran Beton Memadat Sendiri (Self Compacting Concrete) Mutu Tinggi, J. Teknik Sipil Dan Arsitektur, Vol.29 No.2, Juli 2024, pp. 73 – 80.

Ngudiyono, dkk. (2021). Kajian Eksperimental Kuat Lekat Tulangan Beton Memadat Sendiri (Self Compaction Concrete). Prosiding SAINTEK LPPM Universitas Mataram. Vol.3. Januari 2021, pp. 328 – 338.

Ramahayati, N., dkk., 2019, Pengaruh Pemanfaatan Abu Pecahan Terumbu Karang dan Abu Sekam Padi debagai

Pengganti Semen terhadap Kuat Tekan Beton, J. Inersia, Vol.11 No.2, November 2019, pp. 12 – 16.

Widhiastuti, Y., & Mujib, A., 2021, Studi Perencanaan Beton Mutu Tinggi SCC dengan Tambahan Limbah Karbit dan Silicafume, De'Teksi Jurnal Teknik Sipil Unigoro, Vol.6 No.2, Juli 2021, pp. 1 – 16.

PENGGUNAAN KARANG JAHE PADA *SELF COMPACTING CONCRETE (SCC)* MENGGUNAKAN METODE EFNARC

Rully Angraeni Safitri[1] dan Intan Sarafina[2]

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Tangerang, Jl. Perintis Kemerdekaan I, Tangerang*
***e-mail**: rullyangraenisafitri@gmail.com*

[2] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Tangerang, Jl. Perintis Kemerdekaan I, Tangerang*
e-mail: Intnsrfn07@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, memiliki kekayaan biota laut termasuk karang. Karang mati dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, termasuk sebagai bahan penyusun beton. Beton, terutama Self-Compacting Concrete (SCC) yang sering disebut Beton Memadat Sendiri, adalah material konstruksi yang populer karena kemudahan pengerjaan dan kekuatannya. SCC memiliki kemampuan mengalir dan memadat sendiri, dengan rasio air-semen rendah dan penggunaan superplasticizer. Penggunaan karang jahe diharapkan dapat menjadi alternatif pengganti sebagian material penyusun beton, mengurangi penggunaan agregat konvensional, dan menghasilkan beton ramah lingkungan dengan kuat tekan tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan karang jahe sebagai agregat halus terhadap kuat tekan dan persentase capaiannya. Karang jahe yang dihancurkan menyerupai agregat halus atau pasir yaitu gradasi 2. Karang jahe digunakan sebagai subsitusi agregat halus dengan variasi persentase 0%, 10%, dan 15%. Dengan harapan kuat tekan yang dihasilkan pada penelitian ini adalah 30 MPa. Metode eksperimental dalam penelitian ini mengacu kepada EFNARC untuk membuat perancangan kebutuhan campuran SCC. Pada campuran SCC penelitian ini menambahkan penggunaan superplasticizer Sika Viscocrete-3115N untuk mengurangi kebutuhan air. Dari hasil penelitian diperoleh kuat tekan 30.87 MPa, 31.28 MPa, dan 29.94 MPa untuk variasi campuran karang jahe 0%, 10%, dan 15%. Dengan capaian peresentase dari masing-masing variasi yaitu 102.90%, 104.28%, dan 99.79%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa subsitusi penambahan karang jahe sebanyak 10% dapat meningkatkan kuat tekan SCC dari yang direncanakan.

Kata kunci: Karang Jahe, SCC, Kuat Tekan, EFNARC

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan terdapat 16.771 pulau menurut data Kementerian Kelautan dan Perikanan. Indonesia sendiri menduduki peringkat kedua negara dengan garis pantai terpanjang di dunia dengan total mencapai 99.083 km. Garis pantai merupakan batas antara daratan dan lautan, posisinya terkadang tidak stabil karena dapat tergeser oleh pasang surut air laut dan erosi pantai. Garis pantai diukur mengelilingi seluruh pantai yang menjadi batas suatu negara. Dengan kondisi wilayah tersebut Indonesia memiliki banyak biota laut seperti hewan, maupun tumbuhan atau karang. Karang merupakan salah satu biota yang dilindungi. Namun karang yang berada di bawah tekanan tiada henti akibat berbagai masalah seperti perubahan iklim, menurunnya kualitas air, penangkapan ikan berlebihan, polusi dan pembangunan pesisir yang tidak berkelanjutan mengakibatkan karang menjadi mati. Ketika setres karang mengeluarkan mikroorganisme *zooxanthellae* berupa alga dari jaringannya sehingga karang menjadi lebih sensitif dan menjadi pucat atau putih. Karang yang mati dapat dimanfaatkan untuk berbagai macam, seperti souvenir, hiasan, filter, dan lain-lain. Bahkan banyak studi yang menunjukan bahwa karang dapat digunakan sebagai bahan penyusun beton. Seperti pada jurnal Ramahayati Nuzshi dkk (2019) memanfatkan abu pecahan terumbu karang menjadi solusi bahan tambah semen untuk mendapatkan kuat tekan yang optimal. Kurniawan Adika dkk (2016) memanfaatkan terumbu karang sebagai pengganti agregat halus terhadap kuat tekan beton. Selain itu Fauzan (2022) menjelaskan efek penggunaan limbah terumbu karang pada komposit beton yang menjadikan karang menjadi pengganti agregat kasar.

Beton merupakan material yang sering digunakan dalam bidang konstruksi. Kemudahan dibentuk dan dikerjakan menjadi salah satu faktor utama dalam keunggulannya. Ada beberapa jenis beton yang digunakan dalam proses pekerjaan konstruksi seperti beton ringan, beton non pasir, beton prategang, beton pracetak, beton massa, beton yang dapat memadat sendiri dan lain-lain. Beton yang dapat memadat sendiri sering disebut juga SCC *(Self-Compacting Concrete)*, beton ini sering digunakan karena dapat mengalir dan memadat sendiri namun mempunyai kekuatan yang cukup tinggi. Dengan seiring perkembangan dan tuntutan di lapangan selain harus mudah dikerjakan beton harus mudah mengisi celah-celah tulangan yang terpasang rapat agar tidak menghasilkan rongga yang akan mengakibatkan beton itu kropos. SCC merupakan beton yang memiliki sifat dengan kemampuan alir yang tinggi. SCC juga mempunyai rasio air terhadaap semen yang rendah, dengan penggunaan superplasticizer yang cukup, dan ukuran butir

agregat yang lebih kecil dari beton normal yang biasanya digunakan agar terhidar dari segregasi. Hal ini yang menyebabkan banyak berbagai campuran beton termasuk SCC yang ramah lingkungan dari pemanfaatan sumber daya daur ulang atau sumber daya alam yang punah atau mati seperti karang untuk menghasilkan beton yang mempunyai kuat tekan yang tinggi. Pada umumnya bahan pokok campuran beton meliputi kerikil, pasir, semen, dan air. Dalam kondisi tertentu penambahan bahan tambah diperlukan untuk meningkatkan mutu campuran beton.

Dari latar belakang diatas, tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan karang yang akan dibuat sebagai agregat halus dengan persentase 0%, 10%, dan 15% tehadap kuat tekan SCC. Jenis karang yang digunakan berupa karang jahe yang akan dihancurkan dengan menyerupai pasir yang digunakan yang masuk dalam gradasi 2. Penggunaan karang jahe ini diharapkan dapat mengalami perubahan yang berdampak pada kinerja dan sifat yang diinginkan dan dapat digunakan untuk menggantikan sebagian material utsms penyusun beton. Serta sebagai alternatif mengurangi komposisi penggunaaan agregat dengan ukuran agregat yang lebih kecil agar dapat mengisi celah tulangan. Selain itu penelitian ini juga menggunakan *superplasticizer Sika Viscocrete-3115N* sebagai bahan tambah untuk mengurangi kebutuhan air. Acuan yang digunakan dalam pembuatan campuran SCC yaitu *mix design* EFNARC dengan kuat tekan rencana sebesar 30 MPa.

2. KAJIAN PUSTAKA

Menurut SNI 2847-2013 beton adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atantau tanpa bahan campuran tambahan. Beton mempunyai kelebihan yaitu dapat dengan mudah dibentuk sesuai kebutuhan konstruksi, mampu memikul beban yang berat, tahan terhadap temperatur yang tinggi, dan biaya pemeliharaan yang tinggi. Karena itu beton banyak digunakan sebagai bahan utama bangunan.

SCC

Self Compacting Concrete merupakan beton yang dapat mengalir dengan sendirinya yang dapat dicetak pada bekisting tanpa menggunakan *vibrator*. Menurut Y. Widhiastuti & A. Mujib (2021) suatu beton dikatan SCC apabila dari beton segar memenuhi kriteria *filling ability*, *passing ability*, dan *segregation resistance*. Tujuan penggunaan SCC adalah untuk mendapatkan beton dengan performa tinggi, yaitu ketika dalam keadaan segar *(fresh concrete)*, beton dapat memadat sendiri tanpa melakukan penggetaran. Pada umur dini, beton tidak mudah retak karena penyusutan. Dan pada saat beton keras, mempunyai kuat tekan dan keawetan *(durabilitas)* yang tinggi. Keuntungan penggunaan SCC yaitu mengurangi lamanya konstruksi dan besarnya upah pekerja, pemadatan dan penggetaran beton ysng dimaksudkan untuk memperoleh tingkat kepadatan optimum dapat dieliminir, mengurangi kebisingan dan mengganggu lingkungan sekitarnya, meningkatkan kepadadatan element struktur beton dan bagian yang sulit dijangkau dengan alat pemadat, dan Meningkatkan kualitas struktur beton secara keseluruhan.

EFNARC

EFNARC adalah federasi Eropa yang didedikasikan untuk bahan kimia konstruksi spesialis dan sistem beton. Pada tahun 2002 EFNARC menerbitkan “Spesifikasi & Pedoman Beton Memadat Sendiri” yang pada saat itu memberikan informasi terkini bagi produsien dan pengguna. Acuan dan kriteria mix design yang dikeluarkan oleh EFNARC dapat dilihat dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Acuan *mix design* SCC berdasarkan EFNARC

Parameter	Satuan	Nilai
Powder (Semen+Filler) per m^3	Kg	380-600
Prosentase agregat terhadap volume	%	28-35
Air per m^3	Liter	150-210
Rasio Air terhadap powder dengan volume	-	0,8-1,1
Agregat kasar per m^3	Kg	750-1000
Prosentase agregat halus terhadap total agregat	%	48-55
Superplastisizer dari powder (semen+filler)	%	1-1,5
Ukuran agregat kasar	mm	< 20

KARANG JAHE

Karang yang berasal dari terumbu karang adalah ekosistem bawah laut yang terdiri dari sekelompok binatang karang yang membentuk struktur kalsium karbonat, semacam baru kapur. Terumbu karang umumnya berupa batu kapur sehingga agregat yang berasal dari batuan ini memiliki kandungan kimia berupa $CaCO_3$ sehingga masuk dalam kelompok batuan kapur. $CaCO_3$ merupakan salah satu bahan penting dalam proses pembuatan semen (Mulyono, 2003).



Gambar 1. Karang Jahe

3. METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan studi literatur untuk mendapatkan pengetahuan dan referensi mendasar untuk melakukan campuran SCC. Dengan referensi yang ada selanjutnya dijadikan acuan dalam pembuatan perencanaan campuran sebagai dasar metode experimental pada penelitian ini. Pada penelitian ini karang jahe mati dengan ciri sudah berwarna putih seperti kapur diambil dari bibir pantai Sangrila Tanjung Kait, Mauk, Kabupaten Tangerang. Karang jahe tersebut dicuci terlebih dahulu lalu dikeringkan dan kemudian ditumbuk untuk mendapatkan ukuran butir sesuai gradasi yang diinginkan. Apabila sudah hancur dan mencapai gradasi yang diinginkan yaitu gradasi no 2 maka selanjunya dilakukan pengajuan berat jenis, pengujian gradasi, dan penyerapan kadar air pada karang jahe tersebut yang nantinya akan dijadikan sebagai bahan tambah subsitusi dengan agregat halus yaitu pasir. Pasir, krikil, semen pada penelitian ini menggunakan material yang disediakan oleh PT Bumi Prima Abadi sehingga berat jenisnya mengikuti data yang sudah tersedia. Ukuran butir agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan ukuran 10mm. Setelah pengujian material dilakukan langkah selanjutnya melakukan perhitungan untuk kebutuhan material pencampuran dengan menggunakan metode EFNARC. Kebutuhan sampel yang akan dibuat adalah sebanyak 30 dengan variasi 10 sampel untuk SCC tanpa subsitusi karang jahe (SCC A), 10 sampel selanjutnya untuk 10% subsitusi karang jahe terhadap pasir (SCC B), dan 10 sampel lagi untuk 15% subsitusi karang jahe terhadap pasir (SCC C). Setelah perhitungan kebutuhan dilakukan pencampuran, beton basah sebelum dimasukan dalam cetakan silender 15 x 30 cm dicek slumpnya agar minimal mencapai diameter 60cm. Beton yang mengering dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan perawatan dalam bak perendaman sebelum nantinya akan di uji kekuatan tekannya. Kuat tekan pada sampel benda uji akan diuji pada umur beton 7, 14, dan 28 hari. Sampel yang di uji masing-masing 3 buah diumur 7 hari, 3 buah hari diumur 14 hari dan 4 buah diumur 28 hari. Sampel yang ditekan datanya kemudian diolah untuk melihat capaian persentase kuat tekan dan persentase karang jahe berapakah yang mempunyai pengaruh besar terhadap kuat tekan SCC.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Mix Design SCC

Perencanaan perhitungan campuran SCC per m^3 menggunakan acuan EFNARC dapat dilihat dari **Tabel 1** dengan mengikuti tahapan Ngudiyono,dkk (2021) diperoleh data sebagai berikut:

Tabel 2. Proporsi Campuran SCC untuk 1 m^3

Material	Nilai	Satuan
Semen	550	kg
Pasir	770	kg
Krikil	880	kg
Air	198	liter
Superplasticizer Sika Visscocrete-3115N	7,15	kg

Dari data proporsi campuran pada **Tabel 2** karena sampel yang digunakan hanya ada 10 silinder, maka terlebih dahulu menghitung volume silinder untuk mengetahui kebutuhan campuran setiap 10 silinder dengan dan tanpa campuran karang jahe. Sehingga kebutuhan material yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Proporsi Campuran SCC untuk 0,053 m^3

Proporsi	Proporsi Campuran Karang Jahe sebagai Substitusi Agregat Halus			Satuan
	Karang Jahe 0%	Karang Jahe 10%	Karang Jahe 15%	
Semen	32,07	32,07	32,07	kg
Pasir	44,89	40,4	38,16	kg
Kerikil	51,3	51,3	51,3	kg
Air	11,54	11,54	11,54	liter
Superplasticizer	0,42	0,42	0,42	kg
Karang	0	4,49	6,73	kg

Hasil Pengujian

Pengujian kuat tekan beton dilakukan sesuai dengan umur yang sudah ditentukan yaitu 7, 14, daan 28 hari. Pengujian kuat tekan benda uji dilakukan bertujuan untuk memperoleh nilai kuat tekan SCC terhadap sampel yang dibuat.

1. Variasi tanpa subsitusi karang jahe

Hasil uji tekan dan persentase dacapaian kuat tekan yang diproleh dari tanpa penggunaan karang jahe dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Tabel Kuat Tekan dan Persentasi Capaian SCC Tanpa Penggunaan Karang Jahe

Umur	Beban	Kuat Tekan	Rata-rata Kuat tekan	Capaian	Rata-rata Capaian
Hari	kN	MPa	MPa	%	%
7	430	24.35	22.46	124.87	115.18
7	415	23.5		120.51	
7	345	19.53		100.15	
14	520	29.44	29.72	111.52	112.59
14	595	33.69		127.61	
14	460	26.04		98.64	
28	550	31.14	30.87	103.80	102.90
28	565	31.99		106.63	
28	535	30.29		100.97	
28	531	30.06		100.20	

Dari Tabel 4 didapatkan hasil pengujian kuat tekan mengalami penurunan persentase disetiap umur pengujian namun kuat tekan yang diperoleh mencapai kuat tekan yang diharapkan. Untuk umur beton 7 hari mendapatkan kuat tekan rata-rata sebesar 22,46 MPa, usia 14 hari diperoleh kuat tekan 29,72 MPa, dan umur 28 hari memperoleh kuat tekan 30,87 MPa. Sehingga persentase capaian yang dihasilkan oleh beton tanpa tambahan karang jahe pada umur 28 hari yaitu 102,90% dari target kuat tekan yang diharapkan sebesar 30 MPa.

2. Variasi dengan 10% subsitusi karang jahe

Pada variasi kedua ini penggunaan karang jahe sebanyak 10% dari jumlah kebutuhan agregat halus atau pasir yang digunakan. Nantinya total jumlah agregat halus yang digunakan akan dikurangi dan ditambah dengan 10% karang jahe tersebut. Baik agregat halus maupun karang jahe ukuran butirnya disamakan yaitu masuk dalam gradasi no 2. Hasil uji tekan dan persentase capaian 10% penggunaan karang jahe dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Tabel Kuat Tekan dan Persentasi Capaian SCC Dengan 10% Penggunaan Karang Jahe

Umur	Beban	Kuat Tekan	Rata-rata Kuat tekan	Capaian	Rata-rata Capaian
Hari	kN	MPa	MPa	%	%
7	385	21.8	23.03	111.79	118.09
7	470	26.61		136.46	
7	365	20.67		106.00	
14	565	31.99	30.95	121.17	117.23
14	550	31.14		117.95	
14	525	29.72		112.58	
28	560	31.71	31.28	105.70	104.28
28	550	31.14		103.80	
28	545	30.86		102.87	
28	555	31.42		104.73	

Dari **Tabel 5** diatas menunjukan bahwa penggunaan subsitusi 10% karang jahe sama seperti tanpa menggunakan

karang jahe mengalami penurunan persentase kuat tekan capaiannya disetiap umur pengujian namun masih mencapai kuat tekan yang diharapkan. Akan tetapi hasil kuat tekan meningkat dari hasil kuat tekan SCC tanpa tambahan karang jahe. Peningkatan mencapai 2,3% untuk umur 7 hari, 3,9% untuk umur 14 hari dan 1,3% untuk umur 28 hari. Persentase capaianpun mencapai 104,28% dari target 30 MPa yaitu sebesar 31,28 MPa.

3. Variasi dengan 15% subsitusi karang jahe

Pada variasi ketiga ini penggunaan karang jahe yang dilebihkan setengah dari variasi kedua yaitu sebanyak 5%. Sehingga penambahan subsitusi karang jahe pada variasi ketiga ini adalah sebanyak 15%. Hasil uji tekan dan persentase capaian 10% penggunaan karang jahe dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Tabel Kuat Tekan dan Persentasi Capaian SCC Dengan 15% Penggunaan Karang Jahe

Umur	Beban	Kuat Tekan	Rata-rata Kuat tekan	Capaian	Rata-rata Capaian
Hari	kN	MPa	MPa	%	%
7	345	19.53	19.53	100.15	100.17
7	340	19.25		98.72	
7	350	19.82		101.64	
14	460	26.04	26.33	98.64	99.72
14	465	26.33		99.73	
14	470	26.61		100.80	
28	520	29.44	29.94	98.13	99.79
28	515	29.16		97.20	
28	530	30.01		100.03	
28	545	31.14		103.80	

Dari **Tabel 6** diperoleh penurunan kuat tekan diumur 14 hari, namun dihari ke 28 mengalami kenaikan yang tidak signifikan. Diumur 7 hari beton mencapai capaian target untuk umur 7 hari yaitu 65% dari target harapan sehingga persentase yang di peroleh 100,17%. Namun di umur 14 dan 28 hari target tidak mencapai capaian 30 MPa, kuat tekan yang dihasilkan yaitu hanya 29,94 MPa di umur 28 hari dengan persentase capaian 99,79%.

5. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian diperoleh kuat tekan SCC pada umur 28 hari untuk variasi penggunaan subsitusi karang jahe 0%, 10%, dan 15% adalah 30.87 MPa, 31.28 MPa, dan 29.94 MPa. Dengan capaian peresentase dari masing-masing variasi yaitu 102.90%, 104.28%, dan 99.79%. Hal ini dapat disimpulkan bahwa subsitusi penambahan karang jahe sebanyak 10% dapat meningkatkan kuat tekan SCC dari yang direncanakan. Akan tetapi untuk subsitusi penambahan karang jahe yang lebih dari itu dapat mengurangi kuat tekan yang diharapkan. Untuk keberlanjutan kemajuan inovasi dalam pengamatan campuran SCC perlu adanya tambahan variasi campuran untuk mendapatkan nilai optimum untuk mendapatkan kuat tekan dengan penambahan karang jahe sebagai agregat halus. Selain itu karena keterbatasan alat pengujian perlu dilakukan pengujian *L-shape Box Test* dan *V-Funnel Test* untuk mengetahui kemampuan SCC segar melewati celah-celah antar besi tulangan dan mengetahui ketahanan SCC segar terhadap segregasi.

DAFTAR PUSTAKA

B. S. Nasional, SNI 2847:2013, Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2013.

Chelvia, C., dkk, 2024, Analisis Pengaruh Abu Tempurung Kelapa terhadap Kuat Tekan Beton Memadat Sendiri *(Self Compating Concrete [SCC])*, J. Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil, Vol.8 No.2 (2024) pp. 255 - 262.

EFNARCH. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. In Magazine of Concrete Research (Vol. 64, Issue 5).

Fauzan., & Suciati, H., 2022, Efek Penggunaan Limbah Terumbu Karang pada Komposit Beton, Sigma Teknika, Vol.5 No.1, Juni 2022, pp. 119 – 127.

Kurniawan, A., dkk., 2016, Pengaruh Pemanfaatan Pecahan Terumbu Karang sebagai Pengganti Agregat Halus terhadap Kuat Tekan Beton, *Jurnal Inersia*, Vol.8 No.2, Oktober 2016, pp. 17 – 24.

Mulyono, T. 2003. Teknologi Beton. Yogyakarta. Andi Publishing.

Ningrum, N. P. A., dkk. (2024) Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Campuran Beton Memadat Sendiri (Self Compacting Concrete) Mutu Tinggi, J. Teknik Sipil Dan Arsitektur, Vol.29 No.2, Juli 2024, pp. 73 – 80.

Ngudiyono, dkk. (2021). Kajian Eksperimental Kuat Lekat Tulangan Beton Memadat Sendiri (Self Compaction Concrete). Prosiding SAINTEK LPPM Universitas Mataram. Vol.3. Januari 2021, pp. 328 – 338.

Ramahayati, N., dkk., 2019, Pengaruh Pemanfaatan Abu Pecahan Terumbu Karang dan Abu Sekam Padi debagai

Pengganti Semen terhadap Kuat Tekan Beton, J. Inersia, Vol.11 No.2, November 2019, pp. 12 – 16.

Widhiastuti, Y., & Mujib, A., 2021, Studi Perencanaan Beton Mutu Tinggi SCC dengan Tambahan Limbah Karbit dan Silicafume, De'Teksi Jurnal Teknik Sipil Unigoro, Vol.6 No.2, Juli 2021, pp. 1 – 16.

PEMANFAATAN PASIR DAN AIR LAUT SEBAGAI SELF COMPACTING CONCRETE (SCC) DENGAN SERAT BAJA

Adnan[1], M. Tumpu[2], Parea R. Rangan[3] dan Mansyur[4]
[1]Program Studi Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah, Pare-Pare, Indonesia
[2]Program Studi Magister Manajemen Bencana, Sekolah Pascasarjana, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
[3]Program Studi Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia, Toraja, Indonesia
[4]Program Studi Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Sembilanbelas November, Kolaka, Indonesia
ferlywijaya774@gmail.com

ABSTRACT

Beton telah lama digunakan baik pada bangunan yang bersifat structural maupun pada bangunan yang bersifat nonstructural. Beton merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan diseluruh dunia dan kebutuhan akan beton semakin hari semakin meningkat. Pembangunan konstruksi beton yang mempunyai ketahanan membutuhkan pemadatan yang baik, dimana pemadatan tersebut dilakukan oleh tenaga-tenaga kerja terampil. SCC merupakan konsep inovatif teknologi beton yang efektif dan efisien, dimana SCC memiliki karakter memiliki sifat kecairan (fluidity) yang tinggi sehingga mampu mengalir dan mengisi ruang-ruang di dalam cetakan dengan sedikit/tanpa proses pemadatan. Penelitian ini berupa penelitian eksperimental di laboratorium. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh serat baja terhadap sifat mekanik SCC yang menggunakan air laut dan air tawar sebagai air pencampur serta pasir laut dan pasir sungai sebagai agregat halus. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah penggunaan material laut sebagai material utama pembentuk SCC dan mendapatkan gambaran mengenai sifat mekanik SCC menggunakan air laut dan pasir laut yang diperkuat dengan serat baja.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan campuran dari bahan penyusunnya yang terdiri dari semen, agregat kasar, agregat halus, air dengan atau tanpa bahan tambah. Beton yang berkualitas jika beton mempunyai sifat mekanik dan ketahanan yang baik. Sifat mekanik beton yang paling penting adalah kuat tekan. Karakteristik ini sangat berhubungan dengan karakteristik lainnya, dengan kata lain jika kuat tekannya tinggi maka karakteristik lainnya juga baik.

Salah satu material penyusun adukan beton adalah air yang digunakan untuk bereaksi dengan semen dan sebagai bahan pelumas diantara butir-butir agregat agar mudah dikerjakan. Data dari Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) dan Organisasi Meteorologi Dunia (WMO) memprediksikan pada tahun 2050 sekitar 5 Miliyar orang akan kekurangan air bersih bahkan air minum (Sumber : *Conference on Our World in Concrete and Structure* di Singapura Tahun 2011). Nobuaki Otsuki *et al* [1] dalam konferensi tersebut juga mengatakan bahwa di tahun 2025 setengah dari umat manusia akan tinggal di daerah yang kekurangan air bersih atau air tawar. Jelas ini akan sangat berpengaruh dalam Dunia Konstruksi Beton.

Pruckner, F. dan Gjorv, O.E. (2003) [2], air laut yang mengandung NaCl memberikan efek pada beton, dimana penambahan natrium klorida pada beton segar akan membentuk kristal *friedel's salt* ($3CaO.\ Al_2O3.\ CaCl_2.\ 10H_2O$) yang dapat meningkatkan pH lebih tinggi, dan alkalinitas meningkat sehingga akan mengaktifkan hidrasi semen serta memberikan struktur pasta lebih padat dengan pori-pori yang lebih kecil. Otsuki, N., dkk (2011, 2012) [1,3], aman menggunakan air laut sebagai air pencampur dalam beton serta air laut memiliki pengaruh kecil pada kekuatan dan korosi. Kaushik, S.K. dan Islam, S (1995) [4], Falah M. W. (2010) [5] telah meneliti beton menggunakan air laut sebagai *mixing water dan curing*, dengan hasil tidak begitu banyak perbedaan dengan beton dicampur dengan air segar ataupun dicampur dengan air laut. Kumar, S. (2000) [6], campuran *fly ash* pada semen telah meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan air laut serta tipe *Ordinary Cement* yang dimodifikasi dengan penambahan pozolan yang sesuai untuk pembangunan struktur laut. Aburawy, MM dan Swamy, R.N. (2008) [7], Kehadiran klorida mempercepat perkembangan kekuatan usia dini pada beton dengan slag sampai sekitar 7-14 hari. Setelah usia ini, ada kerugian yang berbeda pada kekuatan beton dengan klorida tetapi pengurangan kekuatan itu tidak signifikan. Shetty (1982) [8], air laut atau kualitas air bukan faktor yang mempengaruhi korosi dalam beton melainkan yang mempengaruhi korosi adalah faktor permeabilitas beton dan minimnya penutup beton/selimut beton.

Pembangunan konstruksi beton yang mempunyai ketahanan membutuhkan pemadatan yang baik, dimana pemadatan tersebut dilakukan oleh tenaga-tenaga kerja terampil. Semakin berkurangnya tenaga-tenaga kerja terampil dalam dunia konstruksi mengakibatkan beton kadang-kadang tidak terpadatkan dengan baik sehingga menurunkan mutu pekerjaan konstruksi. Okamura & Ouchy (2003) [9], salah satu pemecahan untuk memperoleh struktur beton yang memiliki ketahanan yang baik adalah dengan menggunakan SCC *(Self Compacting Concrete)*. *SCC* merupakan konsep inovatif teknologi beton yang efektif dan efisien, dimana SCC memiliki karakter memiliki sifat kecairan *(fluidity)* yang tinggi sehingga mampu mengalir dan mengisi ruang-ruang di dalam cetakan dengan sedikit/tanpa proses pemadatan. Hal ini

dapat mengurangi waktu proses pemadatan karena tingkat kecairan yang tinggi, sehingga SCC mampu diangkat dan dibawa dengan mudah melalui pompa ke tingkat yang tinggi pada pengecoran bangunan berlantai banyak serta pada struktur yang memiliki tulangan sangat padat.

Karakteristik beton sangat ditentukan pada mikrostruktur beton. Furuya, D. dkk (2009) [10], Otsuki dkk (2011, 2012) [1,3], pencampuran air laut pada beton yang menggunakan *Blast-Furnace Slag Cement* (BFS) menghasilkan produk *friedel's salt* dan total volume pori menurun serta kekuatan meningkat dibandingkan dengan air tawar. Heikal M. dkk., (2012) [11], kehadiran superplasticiser SCC menampilkan pengaturan mikrostruktur lebih padat dan mikrokristal *calcium silicate hydrate (CSH)* sebagai produk utama hidrasi dengan lembar *calcium hydroxide (CH)*.

Beton serat (*fiber reinforced concrete*) merupakan modifikasi beton konvensional dengan menambah serat pada adukannya. Bahan-bahan serat yang dapat digunakan untuk perbaikan sifat beton pada beton serat antara lain baja, plastik, kaca, karbon, serta serat dari bahan alami seperti ijuk, rami, maupun serat dari tumbuhan lain (*American Concrete Institute*, 1982) [12]. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh serat baja pada mikrostruktur beton dan hubungan mikrostruktur SCC dengan sifat mekanik sebagai hasil proses hidrasi semen terhadap pembentukan *calcium silicate hydrate* (*tobermorite*), *calcium hydroxide* (*portlandite*), *calcium sulfoaluminates hydrates*/*ettringate* dan ukuran pori serta porositas, menganalisis hubungan mikrostruktur SCC yang menggunakan serat baja sebagai hasil proses dan merumuskan model hubungan mikrostruktur dengan sifat mekanik SCC yang menggunakan serat baja sebagai bahan tambah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

a. Teori *Self Compacting Concrete* (SCC)

SCC merupakan beton segar plastis yang mudah mengalir karena berat sendirinya mengisi keseluruh cetakan yang dikarenakan beton tersebut memiliki sifat-sifat untuk memadat sendiri, tanpa adanya bantuan alat penggetar untuk pemadatan. Dengan tingkat kecairan yang tinggi, maka *SCC* mampu diangkat dan dibawa dengan mudah melalui pompa ke tingkat yang tinggi pada pengecoran bangunan berlantai banyak. Salah satu bahan kimia yang mempengaruhi kemampuan *SCC* untuk mengalir adalah superplastisizer.

Menurut Okamura and Ouchi (2003) [9], satu solusi untuk mendapatkan suatu struktur beton tahan lama yang terikat pada kemampuan pekerjaan konstruksi adalah kemampuan sendiri beton untuk memadat, yang dapat mengalir ke dalam tiap-tiap sudut suatu cetakan, karena berat sendiri dan tanpa kebutuhan akan alat penggetar, dengan komposisi campuran agregat kasar 50% dari volume beton, agregat halus 40% dari volume mortar dan faktor air semen antara 0,25 – 0,40.

b. Material Pembentuk *Self Compacting Concrete* (SCC)

1. Agregat

SNI 03-2847-2002 [13], agregat halus adalah agregat yang mempunyai ukuran butir terbesar 5 mm. Agregat halus dapat berupa pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu. Agregat kasar dapat diidentifikasi sebagai kerikil yang merupakan hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm. EFNARC (2005) [14], *self compacting conrete* (SCC) agregat kasar dibatasi jumlahnya sekitar kurang lebih 50 % dari total volume beton supaya bisa mengalir dan memadat sendiri tanpa alat pemadat. Agregat kasar yang digunakan pada SCC umumnya dibatasi antara 12 - 20 mm.

2. Semen

Menurut SNI 15-2049-2004 [15], semen Portland adalah semen hidrolis dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambahan dengan tambahan lain.

3. Air

Air diperlukan untuk pembuatan beton agar terjadi proses kimiawi dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas campuran agar mudah saat proses pengerjaan atau biasa dikenal dengan *workability*. Selain itu, air merupakan bahan utama selain dari agregat yang digunakan untuk membuat beton. Pada umumnya air minum dapat dipakai untuk campuran beton maupun mortar.

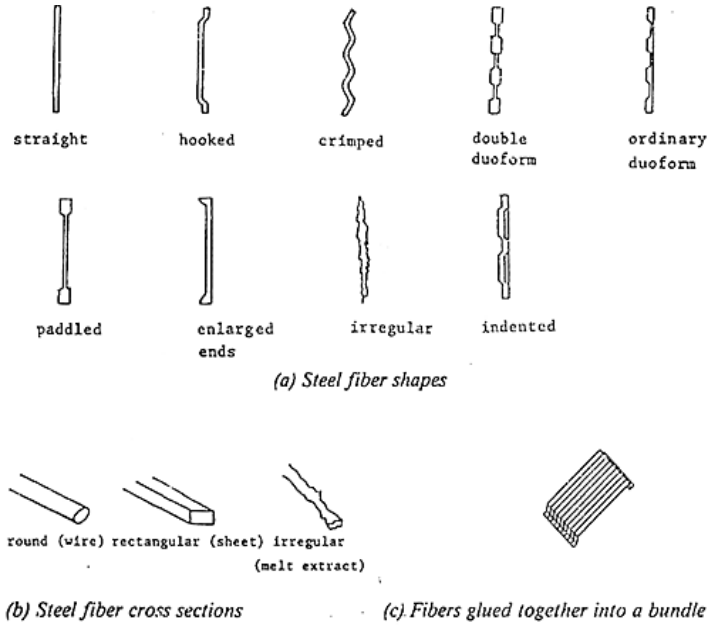
4. Bahan Tambah

Secara umum bahan tambah yang digunakan dalam beton dapat dibedakan menjadi dua yaitu bahan tambah yang bersifat kimiawi *(chemical admixture)* dan bahan tambah yang bersifat mineral *(additive).* Bahan tambah *admixture*

ditambahkan saat pengadukan dan atau saat pelaksaaan pengecoran *(placing)* sedangkan bahan tambah aditif yaitu yang bersifat mineral ditambahkan saat pengadukan dilaksanakan (Mulyono, T. 2005) [16].

5. Serat Baja

Serat baja (*steel fibre*) adalah serat baja yang diproduksi melalui proses penarikan dingin (*cold drawn*) dengan lekukan pada bagian ujung yang akan memberikan pengikatan yang optimal pada beton. Dengan penambahan serat baja pada beton akan memberikan daktalitas dan kemampuan menerima beban yang tinggi (*high load bearing capacity*). Selain itu juga akan memberikan aplikasi yang cepat dan mudah serta memberikan solusi yang jauh lebih efektif dan ekonomis. Gambar 1 memperlihatkan jenis-jenis serat baja.



Gambar 1. Jenis-jenis serat baja

c. Perilaku Tegangan-Regangan Beton

Tegangan merupakan perbandingan antara gaya yang bekerja pada beton dengan luas penampang beton. Regangan adalah perbandingan antara pertambahan panjang (ΔL) terhadap panjang mula-mula (L) regangan dinotasikan dengan ε dan tidak mempunyai satuan. Regangan yang terjadi pada beton dinyatakan dalam persamaan 1.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

Dimana : ΔL = perubahan panjang, L = panjang awal

Jika hubungan tegangan dan regangan dibuat dalam bentuk grafik dimana setiap nilai tegangan dan regangan yang terjadi dipetakan kedalamnya dalam bentuk titik-titik, maka titik-titik tersebut terletak dalam suatu garis lurus sehingga terdapat kesebandingan antara hubungan tegangan dan regangan. Analisa yang diusulkan untuk digunakan merupakan rumus kuat tekan yang digunakan untuk mengukur masonry, dimana rumus-rumus tersebut adalah:

1. Persamaan Engesser, 1907 yang direview oleh Huerta

$$fc = \frac{1}{3} fcu + \frac{2}{3} fcm \quad (2)$$

Dimana:
fc = Kuat tekan beton masonry, dalam penelitian ini beton yang menggunakan batu basalt sebagai agregat kasar
fcu = Kuat tekan batu basalt
fcm = Kuat tekan mortar

2. Persamaan Francis

$$fc = \frac{1}{1+\frac{\alpha\phi(\beta Vm - Vu)}{\beta(1-Vm)}} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{hm}{hu} \quad \beta = \frac{Eu}{Em} \quad \phi = \frac{fcu}{ftu} \quad (4)$$

3. Persamaan Khoo dan Hendry

$$Afc^3 + Bfc^2 + Cfc + D = 0 \quad (5)$$

Dimana:

$$A = -0.2487ftu \left(\frac{1}{fcu}\right)^3 + 0.0018\alpha\left(\frac{1}{fcm}\right)^2 \quad (6)$$

$$B = 1.2781ftu \left(\frac{1}{fcu}\right)^2 - 0.05290\alpha\left(\frac{1}{fcm}\right) \quad (7)$$

$$C = -2.0264ftu \left(\frac{1}{fcu}\right) - 0.1126\alpha \quad (8)$$

$$D = 0.9968ftu + 0.1620\alpha fcm \quad (9)$$

4. Persamaan Ohler

$$fc = fcm + \frac{Sfcu - fcm}{1+\frac{thmfcu}{mhufm}} \quad (10)$$

Pengembangan dari rumus-rumus kuat tekan masonry diharapkan dapat diadopsi sebagai rumus untuk menganalisa kuat tekan beton SCC yang menggunakan material laut sebagai bahan pencampur.

3. METODOLOGI PENELITIAN

a. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini rencana di laksanakan di Laboratorium riset Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Pare-Pare. Penelitian ini rencana dilaksanakan selama 4 bulan dimulai dari bulan September 2024 sampai Desember 2024.

b. Pengambilan Material Penelitian

Adapun bahan atau material yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Material agregat kasar berupa batu sungai diperoleh dari sekitar sungai Bili-Bili, Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan.
2. Air tawar yang digunakan berasal dari PDAM Makassar.
3. Air laut dan pasir laut yang digunakan berasal dari Pantai Barombong, Kota Makassar Provinsi Sulawesi Selatan.
4. Agregat halus berupa pasir sungai yang digunakan adalah pasir dari daerah Bili-Bili, Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan.
5. Additive (bahan tambah) adalah Superplaticiezer viscocrete 3115 ID diperoleh dari salah satu distributor di Makassar.

c. Rancangan Uji

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian ekperimental tentang karakteristik sifat mekanik dan mikrostruktur SCC yang menggunakan batu laterit sebagai agregat kasar. Penelitian ini dimulai dengan studi literatur sebagai acuan dalam penelitian, selanjutnya diikuti pemeriksaan karakteristik material bahan campuran SCC. Dari hasil karakteristik material merupakan acuan dalam desain komposisi campuran SCC. Data yang terkumpul digunakan untuk menganalisis karakteristik mekanik dan karakteristik mikrostruktur beton.

a. Pemeriksaan Karakteristik Material

Pemeriksaan karakteristik material yang dilakukan berupa karakteriksik agregat (agregat kasar berupa batu pecah dan agregat halus berupa pasir) yang digunakan.

1. Pemeriksaan Karakteristik Agregat

Tabel 1. Metode pengujian karakteristik agregat

Pengujian	Metode Pengujian	
	Agregat Kasar	Agregat Halus
Analisa Saringan	SNI 03-1968-1990	
Berat jenis dan penyerapan agregat	SNI 03-1969-2008	SNI 03-1970-2008
Kadar lumpur	SNI 03-4142-1996	
Keausan agregat kasar dengan mesin Los Angeles	SNI 2417-2008	
Indeks Kepipihan	SNI 03-4137-1996	
Sand Equivalent		SNI 03-4428-1997

Agregat yang akan diuji berupa agregat kasar berupa batu pecahdan agregat halus berupa pasir yang pengambilan materialnya berasal dari Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan. Adapun pengujian dan metode pengujian yang digunakan dalam penelitian ini dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

2. Alat Penelitian

Alat yang digunakan adalah 1) analisis *x-ray power diffraction* (XRD) menggunakan alat *Rigaku Miniflex II XRD*; 2) analisis *scanning electron microscope-energy dispersive X-ray* (SEM-EDX) menggunakan alat vega3tescan SEM-EDX; 3) uji *petrography* menggunakan alat mikroskop *polarisasi Olympus BX 51-P;* 4) uji mekanik menggunakan *universal testing machine (UTM), 5*) *mixer*, cetakan silinder serta alat bantu lainnya.

3. Rancangan Campuran SCC dan Perawatan Benda Uji

Sebelum pembuatan sampel, dilakukan mix design dengan menggunakan metode EFNARC [14]. Benda uji dibuat dengan variasi agregat kasar (batu laterit dan batu sungai), air yang digunakan untuk perawatan/*curing* benda uji (air tawar, udara dan rendam angkat) dan lama perendaman (1 hari, 3 hari, 7 hari, 28 hari dan 90 hari). Sebelum adukan di masukkan dalam silinder, dilakukan pengujian beton segar SCC yakni *Slump flow* dan T500 dengan menggunakan metode *The Europan Guidelines for SCC (2005)* [14]. Ada 16 jenis beton yang dibuat yakni SCC-AT-PS0, SCC-AT-PS1, SCC-AT-PS2, SCC-AT-PS3, SCC-AT-PL0, SCC-AT-PL1, SCC-AT-PL2, SCC-AT-PL3, SCC-AL-PS0, SCC-AL-PS1, SCC-AL-PS2, SCC-AL-PS3, SCC-AL-PL0, SCC-AL-PL1, SCC-AL-PL2 dan SCC-AL-PL3. Benda uji dibuat dengan berbentuk silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm untuk benda uji pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah, sedangkan benda uji balok dengan ukuran 100 mm x 100 mm x 400 mm.

Setelah 24 jam, benda uji dibuka dari cetakan kemudian dilakukan perawatan beton. Perawatan beton dilakukan di bak air yang terdiri dari 1 bak dengan ukuran 2 m x 1,5 m x 0,5 m yaitu bak air laut yang dilakukan untuk perawatan dengan rendam air. Seluruh variasi benda uji dirawat pada bak air yang berisi air laut. Selain itu seluruh variasi benda uji juga dilakukan perawatan yaitu di simpan dalam ruangan (*curing* udara) dan curing rendam angkat.

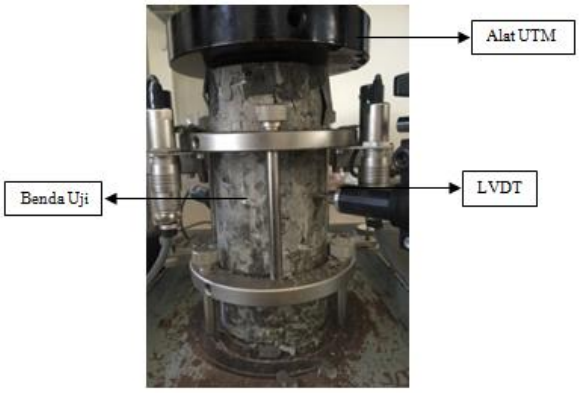
d. Pengujian Benda Uji

Pengujian mekanik yang telah dilakukan adalah kuat tekan (ASTM-C39 [17]) dan kuat tarik belah (ASTM-C496/C496M[18]). Pengujian sifat mekanik (kuat tekan dan kuat tarik belah) dilakukan pada umur 1, 3, 7, 28, dan 90 hari. Analisis mikrostruktur dilakukan uji *Scanning Electro Microscope* (SEM) dan uji *X-ray Diffraction* (XRD) dan metode petrografi. Uji SEM digunakan untuk menganalisis morfologi mikrostruktur SCC, UJI XRD menganalisis kuantitas fase mikrostruktur SCC *(tobermorite, portlandite, ettringite, alite, belite, aluminate dan ferrite)* dan uji petrografi digunakan untuk menganalisis jenis dan ukuran pori serta porositas SCC.

e. Pengujian Karakteristik Mekanik Beton SCC

a. Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan SNI-03-6825-2002 [19], pengujian kuat tekan yaitu memberi beban monoton secara terus menerus dengan laju yang konstan pada benda uji di antara dua batang pembebanan yang akan menciptakan tegangan tekan pada benda uji yang diberi beban. Pada pengujian kuat tekan posisi benda uji yang berbentuk silnder pada saat dibebani yaitu dalam keadaan berdiri/tegak. Tegangan tekan yang dialami benda uji lama kelamaan akan menyebabkan benda uji runtuh/hancur. Sehingga, kuat tekan adalah tegangan tekan pada pembebanan maksimum yang menyebabkan benda uji mengalami runtuh/hancur. Gambar 2 memperlihatkan posisi benda uji pada pengujian kuat tekan beton silinder SCC.



Gambar 2. Posisi benda uji pengujian kuat tekan (*Compressive strength*)

b. Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

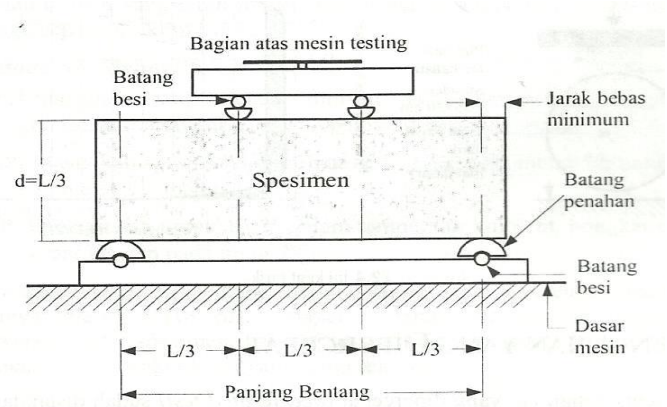
Pengujian kuat tarik belah,dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (*Tokyo Testing Machine Inc*.) kapasitas 1000 kN dan LVDT (*Longitudinal Variable Diferencial Tranducer*) 25 mm yang di sambungkan ke*data logger* dan *switching box* serta satu set komputer. Gambar 3 menunjukkan posisi benda uji pada pengujian kuat tarik belah SCC.



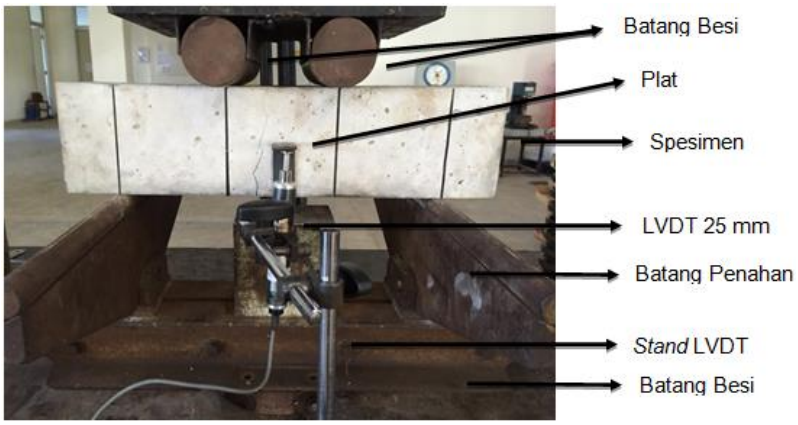
Gambar 3. Posisi benda uji pada pengujinan kuat tarik belah beton

c. Pengujian Kuat Lentur Beton

Gambar 4 memperlihatkan sketsa pengujian kuat lentur beton dan Gambar 5 memperlihatkan pengujian kuat lentur beton SCC yang dilakukan di laboratorium, dimana menggunakan *Linear Variable Displacement Transducers* (LVDT) untuk mengukur lendutan dari benda uji akibat beban yang diberikan.



Gambar 4. Sketsa pengujian kuat lentur



Gambar 5. Pengujian kuat lentur beton

4. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian singkat di atas, hasil yang diharapkan dalam penelitian antara lain: Penggunaan material laut dapat digunakan sebagai material beton. Air laut dan pasir laut dapat menjadi salah satu alternatif pemilihan material beton Self Compacting Concrete (SCC). Memberikan gambaran hubungan kekuatan SCC berbahan material laut dengan mikrostruktur SCC. Memberikan gambaran hubungan kekuatan SCC terhadap rasio persentase jumlah serat baja yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Otsuki, N., Furuya, D., Saito, T. And Tadokor, Y. 2011. *Possibility Of Sea Water As Mixing Water In Concrete*, 36th Conference on Our world in Concrete & Structures, Singapore.
2. Pruckner, F. dan Gjorv, O.E. (2003), Effect of CaCl2 and NaCl Additions on Concrete Corrosivity, *Cement and Concrete Research*, 34 (2004) 1209–1217.
3. Otsuki, N., Saito, T. and Tadokoro, Y. (2012), Possibility of Sea Water as Mixing Water in Concrete, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, ISSN 1934-7359, Vol 6, No. 10 (Serial No. 59), pp. 1273–1279, USA.
4. Islam, Md.S, Kaushik, S.K., and Islam, Md.M. 2005. Physical and Mechanical Behaviour Of Concrete In Sea Water Under Hydrostatic Pressure, *Journal-The Institution of Engineers*, Vol.66 No.2, Malaysia.
5. Falah, M. W. 2010. Effect of seawater for mixing and curing on structural concrete, The IES Journal Part A: *Civil & Structural Engineering*, Vol. 3, No. 4, 235–243.
6. Kumar, S. (2000). Influence of Water Quality on the Strength of Plain and Blended Cement Concretes in Marine Environments, *Cement and Concrete Research*, 30 (3), 345–350.
7. Aburawy, M.M. and Swamy, R. N. 2008. Influence Of Salt Weathering On The Properties Of Concrete", *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 33, Number 1B.
8. Shetty, M.S. 1982. *Concrete Technology Teori and Practice*, chap4, Chand & Company, New Delhi.
9. Okamura, H. and Ouchi, M. 2003. Self Compacting Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.1, No.5 – 15, April 2003.

10. Furuya, D., Otsuki, N., Saito, T., Lee Yun. 2009. *A Study On The Effects Of Seawater as Mixing Water on The Hydration Characteristics of Blast-Furnace Slag Cement*, 34thConference on Our World In COncrete & Structure: 16 - 18 August 2009, Singapore.
11. Heikal, M., Zohdy, K.M. and Abdelkreem, M. 2012. Mechanical, Microstructure and Rheological Characteristics of High Performance Self-Compacting Cement Pastes and Concrete Containing Ground Clay Bricks, *Construction and Building Materials*, 38 : 101-109.
12. ACI Committee 544, 2002. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*, ACI 544.1R-96, American Concrete Institute.
13. Badan Standardisasi Nasional. 2002. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2847-2002 Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, Beta version, Bandung.
14. *EFNARC* (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use, UK (www.efnarc.org), May, 2005.
15. Badan Standardisasi Nasional. 2002. Standar Nasional Indonesia (SNI) 15-2049-2004. *Semen Portland*, Badan Standardisasi Nasional (BSN).
16. Mulyono, T. 2005, *Teknologi Beton*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
17. ASTM C39/C39M − 12a, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, October 2012.
18. ASTM C496/C496M-11,2011 *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimen*, August 2011.
19. Badan Standardisasi Nasional. 2002. Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-6825-2002 Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil. Jakarta : Dewan Standardisasi Nasional.

PENGGUNAAN FLY ASH SEBAGAI BAHAN PENSTABILISASI TANAH LUNAK YANG DIPERKUAT DENGAN SERAT ALAMI

M. Tumpu[1], Parea R. Rangan[2] dan Mansyur[3]
[1]Program Studi Magister Manajemen Bencana, Sekolah Pascasarjana, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
[2]Program Studi Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia, Toraja, Indonesia
[3]Program Studi Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Sembilanbelas November, Kolaka, Indonesia
tumpumiswar@gmail.com

ABSTRACT

Penggunaan tanah lempung sebagai lapisan penutup pada sistem landfill adalah menjadi pilihan material alternative yang banyak digunakan di hampir seluruh sistim landfill yang ada di Indodonesia maupun di dunia. Selain biaya pengadaan yang relative murah juga tersedia di hampir di seluruh wilayah Indonesia. Namun alternative lapisan penutup landfill yang handal belum banyak dibahas dan diteliti. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang suatu lapisan penutup yang ideal pada landfil. Penelitian ini meliputi: (1) menyelidiki sifat geoteknik dan perilaku tanah stabilisasi fly ash dan serat sebagai lapis penutup landfill, (2) mengukur kinerja lapisan lempung stabilisasi berdasarkan komposisi campuran optimum sebagai lapisan penutup landfill, (3) merekomendasikan lapisan penutup akhir alternative pada sistim landfill. Telah banyak penelitian eksperimental pada penguatan tanah dengan menggunakan serat alami maupun serat sintetis. Penelitian sebelumnya menunjukan bahwa penambahan serat pada tanah tidak memperbaiki potensi pengembangan pada tanah, bahwa semakin besar prosentase serat ditambahkan pada tanah semakin besar terjadi perubahan volume tanah. Pada uji potensi penyusutan, dengan penambahan serat memberi kontribusi pada berkurangnya patahan (cracks) dari dalam, baik secara horisontal maupun vertikal. Kuat tekan, modulus elastis dan regangan batas meningkat ketika prosentase serat ditambahkan pada tanah. Sebuah tinjauan umum penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa hampir semua penelitian hanya mengevaluasi efect dari serat sintetis pada perilaku lempung, dan banyak penelitian sebelumnya meninggalkan pertanyaan bagaimana mengatasi tentang dilema peningkatan kekuatan tanah pada lempung yang sekaligus dikuti penurunan hidrolik konduktifitas pada tanah yang distabilisasi dengan serat alami. Secara garis besar, penelitian ini nantinya akan mencoba menyelidiki kinerja lempung yang distabilisasi fly ash dan perkuatan serat alam (serat buah tandang sawit). Serangkaian tes akan dilakukan untuk melihat kinerja lempung sebagai lapis penutup landfill. Morfologi karakteristik lempung stabilisasi akan dianalisis secara makro dan mikro dengan SEM. Pengaruh potensi pengembangan dan penyusutan tanah yang diperkuat serat akan diteliti dan Efek dari prosentase dan panjang serat akan dipelajari, Simulasi design lapisan lempung stabilisasi pada sistim lapisan penutup landfill akan dikemukakan.

1. PENDAHULUAN

a. Latar Belakang

Perilaku retak pada tanah lempung yang digunakan sebagai *Compacted clay liners* adalah masalah utama dari struktur tanah lempung. karena akan menyebabkan celah-celah di lapisan penutup landfill. dan akibatnya akan mengurangi fungsi penyegelan lapisan penutup secara dramatis. Dari sudut pandang teknik, bahan penutup landfill harus memiliki sifat teknis yang memadai, seperti konduktivitas hidrolik yang rendah, kuat tekan yang cukup, kekuatan tarik tinggi, dan Fleksibilitas yang tinggi. Proses Pengeringan akan menyebabkan perilaku retak pada tanah lempung yang akan menyebabkan bermigrasinya cairan permukaan ke dalam landfill sehingga menyebabkan meningkatnya limbah cair maupun gas. Pada akhirnya potensi pencemaran tanah dan air tanah akan meningkat [12].

Beberapa peneliti telah menunjukkan bahwa konduktivitas hidrolik dari tanah yang mempunyai intensitas keretakan yang tinggi, sementara kekuatan tanah menurun. Albrecht dan Benson menemukan bahwa tingkat retakan dipengaruhi oleh peningkatan konduktivitas hidrolik sekitar 3 kali lipat [16]. Saat ini ada beberapa kemungkinan dalam penggunaan bahan lain untuk meningkatkan kinerja tanah lempung sebagai hambatan hidrolik pada landfill. Efect dari serat pada kekuatan dari tanah residual kapur yang dipadatkan dengan menggunakan 3 serat yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekuatan meningkat sekitar 25% dan jenis serat yang digunakan tidak memberi pengaruh yang significan terhadap kekuatan tanah [9]. Sementara efek dari serat pada konduktivitas hidrolik dari kaolinit-serat komposit. Pengaruh serat dapat menurunkan konduktivitas hidrolik dari komposit dan penurunan tersebut terjadi pada kondisi kandungan serat yang lebih tinggi (hingga 4% dari berat total). Terlepas dari penurunan tersebut, konduktivitas hidrolik komposit masih cukup tinggi untuk dipertimbangkan sebagai lapisan penutup landfill [11].
Penelitian terakhir telah menunjukkan bahwa penambahan serat dalam tanah dapat meningkatkan kekuatan geser maksimum dari tanah dan dapat mengurangi kehilangan kekuatan geser setelahnya. Peningkatan kekuatan geser tanah akibat penambahan serat biasanya diukur oleh peningkatan dari sudut geser dan kohesi. Bahwa Intensitas keretakan

berkurang dengan adanya serat. Namun, dibandingkan dengan perilaku mekanik dan kekuatan tanah tidak significant, informasi terkini terkait dengan perilaku retak tanah yang diperkuat serat relatif terbatas. Studi kuantitatif diperlukan untuk pemahaman yang lebih baik rentang keretakan dan peningkatan karakteristik dari serat perkuatan tanah [9].

Sebuah tinjauan umum penelitian sebelumnya mengungkapkan bahwa hampir semua penelitian hanya mengevaluasi efect dari serat sintetis pada perilaku lempung, dan banyak penelitian sebelumnya meninggalkan pertanyaan bagaimana mengatasi tentang dilema peningkatan kekuatan tanah pada lempung yang sekaligus dikuti penurunan hidrolik konduktifitas pada tanah.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki kinerja lempung yang distabilisasi fly ash dan perkuatan serat alam (serat buah tandang sawit). Serangkaian tes akan dilakukan untuk melihat kinerja lempung sebagai lapis penutup landfill. Morfologi karakteristik lempung akan dianalisis secara makro dan mikro dengan SEM. Efek dari prosentase dan panjang serat akan dipelajari, Simulasi design lapisan lempung padat (*Compacted Clay Liners*) pada sistim lapisan penutup akhir landfill akan dikemukakan.

b. Rumusan Masalah

Ketika limbah padat terurai didalam landfill, maka akan menghasilkan campuran dari beberapa gas. Gas yang utama dihasilkan adalah berupa gas metana (sekitar 40 - 60%) dan karbon dioksida (CO_2). Gas metana (CH_4) adalah gas rumah kaca dimana pelepasan gas metana ini ke atmosfer akan menciptakan beberapa masalah pemanasan global. Menurut USEPA (1999), tempat pembuangan sampah adalah sumber dominan emisi gas metan, dimana sekitar 37% dari total limbah. Banyak faktor yang menentukan gas yang dilepaskan di tempat pembuangan sampah. Salah satu faktor yaitu lemahnya kinerja lapisan penutup landfill akibat intensitas keretakan dan konduktivitas yang tinggi [17].

Sebuah penelitian untuk menguji pengaruh potensi pengembangan dan penyusutan tanah yang diperkuat serat kelapa sawit, menunjukan bahwa penambahan serat pada tanah tidak memperbaiki potensi pengembangan pada tanah, bahwa semakin besar prosentase serat ditambahkan pada tanah semakin besar terjadi perubahan volume tanah akibat dari penyerapan air yang lebih besar karena meningkatnya permebilitas tanah. Pada uji potensi penyusutan, dengan penambahan serat memberi kontribusi pada berkurangnya patahan (cracks) dari dalam, maupun secara horisontal maupun vertikal akibat peningkatan dari prosentase serat. Kuat tekan, modulus elastis dan regangan batas meningkat ketika prosentase serat ditambahkan pada tanah [2]. Pemanfaatan serat alami dari tandang buah kelapa sawit sebagai bahan perkuatan yang dilakukan Omid Azedegan (2012) dan yang dimodifikasi dengan penambahan bahan stabilisasi fly ash pada penelitian ini diharapkan bisa mengatasi meningkatnya volume air dan naiknya konduktivitas hidrolik pada tanah lempung.

c. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dan perilaku dari fly ash dan serat alami sebagai bahan stabilisasi dan perkuatan tanah lempung Kalukubula, sehingga bisa memenuhi syarat sebagai lapisan penutup landfill. adapun tujuan utama pada penilitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengevaluasi sifat geoteknis dari tanah yang dicampur serat alam-fly ash. Adapun parameter tanah lempung yang dibutuhkan untuk desain lapisan penutup landfill adalah antara lain: karakteristik pemadatan, kuat tekan batas, kohesi, sudut gesek dalam, kuat tekan dan konduktivitas hidrolik. Hal tersebut akan diteliti untuk mengevaluasi kesesuaian campuran lempung-serat alam-fly ash.
2. Untuk menyelidiki pengaruh serat alam-fly ash pada tanah lempung Kalukubula yang dipadatkan apakah berpotensi digunakan sebagai bahan untuk sistem penutup lapisan penghalang landfill. Tes laboratorium akan dilakukan untuk menyelidiki efek dari serat alam-fly ash pada prilaku retak dan perilaku penyusutan volume tanah lempung Kalukubula yang dipadatkan.
3. Untuk melakukan simulasi lapisan penutup akhir landfill dalam mitigasi perpindahan limbah cair dan gas. kriteria desain lapisan penutup akhir berdasarkan kandungan optimum serat dan fly ash. Adapun kriteria desain berdasarkan lima parameter desain di mana benda uji yang dipadatkan akan memiliki nilai konduktivitas hidrolik yang rendah ($\leq$ 1.0x10-5 cm/detik), memiliki sifat mekanik yang cocok untuk integritas struktural, dan tahan terhadap retak karena siklus pengeringan.

d. Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penelitian dalam disertasi ini adalah:

1. Jenis tanah yang digunakan adalah tanah lunak (lempung Kalukubula).
2. Bahan stabilisator yang digunakan adalah Fly Ash hasil pembakaran batu bara pada PLTU Mpanau Kota Palu.
3. Bahan Perkuatan yang digunakan adalah Serat Alami dari tandang buah sawit yang berada di Kab. Donggala.
4. Pengujian adalah uji sifat fisis dan struktur mikro bahan, Karakteristik kepadatan, kuat tekan benda uji, kuat geser, konduktivitas hidrolik dengan suction test, struktur mikro benda uji, dan pengaruh perubahan volume, dan keretakan pada proses pembasahan dan pengeringan.

2. LANDASAN TEORI

a. Isu Strategis Lapis Penutup Landfill

Kesadaran masyarakat maupun pemerintah dalam hal pengelolaan persampahan masih sangat rendah, hal ini tercermin dari masih minimnya ketersediaan TPA yang memadai di setiap daerah. Masih banyak pemerintah daerah membuang sampahnya dengan sistim *open dumping* atau pembuangan terbuka dimana sampah hanya dihamparkan pada suatu lokasi dan dibiarkan terbuka tanpa pengamanan. Cara ini tidak direkomendasikan lagi mengingat banyaknya potensi pencemaran lingkungan yang dapat ditimbulkannya. Metode yang paling direkomendasikan saat ini adalah metoda S*anitary Landfill*, metode ini merupakan peningkatan dari *open dumping* dan control landfill.

Lapisan kedap air pada landfill berfungsi untuk mencegah rembesan air lindi yang terbentuk di dasar landfill dalam lapisan tanah di bawahnya. Untuk itu lapisan ini harus dibentuk di seluruh permukaan dalam landfill baik dasar maupun dinding. Bila tersedia di tempat, tanah lempung setebal + 50 cm merupakan alternatif yang baik sebagai lapisan kedap air. Namun bila tidak dimungkinkan, dapat diganti dengan lapisan sintetis lainnya dengan konsekuensi biaya yang relatif tinggi. Gas yang terbentuk di dalam landfill umumnya berupa gas karbon dioksida dan metan dengan komposisi hampir sama; disamping gas-gas lain yang sangat sedikit jumlahnya. Kedua gas tersebut memiliki potensi besar dalam proses pemanasan global terutama gas metan; karenanya perlu dilakukan pengendalian agar gas tersebut tidak dibiarkan lepas bebas ke atmosfer.

b. Stabilisasi Tanah dengan Bahan Pozzolanic

Stabilisasi tanah dengan bahan pozzolan atau disebut juga stabilisasi dengan bahan kimia merupakan salah satu pemecahan problem struktur konstruksi sipil yang terletak pada tanah lempung lembek dan tanah yang mengembang. Stabilisasi dengan bahan pozzolan untuk tanah liat antara lain Portland Cement, hydrated lime, bitumen, fly ash dll. Ketika pengikat seperti kapur, semen, dan fly ash dicampur dengan tanah dan air, maka satu reaksi terjadi akan mengakibatkan disosiasi kapur (CaO) di binder dan pembentukan sementasi dan gel pozzolanic (kalsium silikat hidrat gel (CSH) dan kalsium aluminat silikat hidrat gel (KAS): Reaksi antara tanah dipadatkan dengan fly ash batubara dan air dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (1)$$
$$Ca^{2+} (OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2(OH)^- \quad (2)$$
$$Ca^{2+} + 2(OH) + SiO_2 \rightarrow CSH \quad (3)$$
$$Ca^{2+} + 2(OH)^- + Al_2O_3 \rightarrow CASH \quad (4)$$

Dimana CSH adalah kalsium silikat hidrat gel dan CASH adalah kalsium aluminat silikat hidrat gel. Reaksi-reaksi ini disebut sebagai sementasi dan/atau reaksi pozzolan yang menghasilkan pembentukan gel semen. Peningkatan kekuatan ditemukan secara kasar berhubungan dengan jenis dan kuantitas reaksi produk (yaitu, reaksi semen produk, CSH untuk kekuatan jangka pendek dan produk reaksi pozzolan, KAS untuk keuntungan kekuatan jangka panjang).

1. Fly Ash

Fly ash adalah produk sampingan dari proses pembakaran batubara pembangkit listrik tenaga uap. partikel fly ash yang berlubang dan bulat, hampir serupa dengan ukuran partikel semen portland dan kapur. analisis mineralogi dari fly ash menunjukkan bahwa sekitar 70-90% dari abu terdiri dari silikon, aluminium, besi, magnesium, dan kalsium.
Fly ash dapat dibagi menjadi 2 kategori:

1. Fly ash class-C atau Self Hardening
   * Fly ash dengan high calcium content
   *Akan bereaksi dengan air membentuk cementitious product tanpa penambahan lime
2. Fly Ash Class-F
   * Fly ash dengan low calcium content
   * Memerlukan penambahan lime dan / atau cement untuk membentuk cementitious product,

Bahwa interaksi kandungan kalsium yang tinggi pada fly ash dengan air mendorong hidrasi kapur dan gipsum untuk mengalami reaksi pozzolan. Dengan lebih banyak oksidasi kalsium di dalam fly ash, reaksi pozzolan mendorong konduktivitas hidrolik menurun dan peningkatan kekuatan [3]. Fly ash batubara memiliki potensi aplikasi dalam pengelolaan asam hasil tambang (*acid mine tailing*), karena kandungan kimia dan mineralogi fly ash memiliki potensi netralisasi, ketika itu dicampur dengan tambang tailing lumpur, reaksi asam-basa mengkonsumsi Potensi asam tailing. Dengan meningkatnya pH, logam dalam larutan. kehilangan mobilitas mereka. Jika proses ini terbukti efektif, dapat menjadi pendekatan biaya-efektif dalam pengelolaan pembangkit asam tailing tambang, karena fly ash dapat diperoleh dalam jumlah besar dengan biaya yang relatif rendah [16].

Konduktivitas hidrolik Nanticoke fly ash menurun lebih dari tiga kali lipat dari 1x10-6 ke 1x10-9 cm/s, hal terjadi

terutama karena reaksi kimia antara zat padat abu dan air asam tambang. Selanjutnya, gradien hidrolik diperlukan untuk air asam tambang untuk menerobos abu terbang batubara meningkat hingga sepuluh kali dari 17 ke 150. dibandingkan dengan yang untuk air. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa lindi dari fly ash menetralkan cairan pori asam tailing tambang [18]. Kuat tekan bebas tanah organik dapat ditingkatkan menggunakan fly ash, tetapi jumlah kenaikan tergantung pada jenis tanah dan karakteristik dari fly ash. peningkatan besar dari qu (dari 30 kPa tanpa fly ash ke > 400 kPa dengan fly ash) dimana diperoleh untuk dua tanah liat dengan OC kurang dari 10% bila dicampur dengan beberapa fly ash. lebih sederhana peningkatan qu (dari 15 kPa tanpa fly ash ke> 100 kPa dengan fly ash) yang diperoleh untuk tanah gambut berpasir yang sangat organik dengan OC sekitar 27% [7].

Nilai dari k menurun dengan peningkatan kandungan fly ash. Penurunan dari nilai konduktivitas hidrolik berkorelasi baik dengan peningkatan dari tingkat kepadatan kering maksimum sebesar 5% dengan peningkatan jumlah fly ash sebesar 20%. Batas cair menurun dan batas plastik meningkat dengan peningkatan volume fly ash. Indeks plastisitas menurun hingga 50% ketika volume fly ash sebesar 20%. [3]. Bahwa konduktivitas hidrolik fly ash memenuhi spesifikasi untuk digunakan sebagai lapisan pada landfill (1×10^{-7} cm/s). Keuntungan dari fly ash adalah bahwa kekasaran partikelnya sehingga tahan terhadap retak dan mengalami perubahan volume yang kecil dengan perubahan kadar air pada variasi tekanan. Karena sifat pozzolanic fly ash meningkatkan kekuatan dengan waktu. kapasitas adsorpsi yang kecil dikompensasi oleh sifat alkali, dimana dapat membantu untuk mengendapkan ion dan mencegah mereka melewati lapisan [15].

c. Perilaku Keretakan Pada Tanah Diperkuat Serat

Neraca pengolahan sawit di pabrik kelapa sawit kurang lebih seperti gambar neraca massa di bawah ini. Dari setiap ton TBS yang diolah dapat menghasilkan 140 – 200 kg CPO. Selain CPO pengolahan ini juga menghasilkan limbah/produk samping, antara lain : limbah cair (POME = Palm Oil Mill Effluent), cangkang sawit, fiber/serat, dan tandan kosong kelapa sawit.



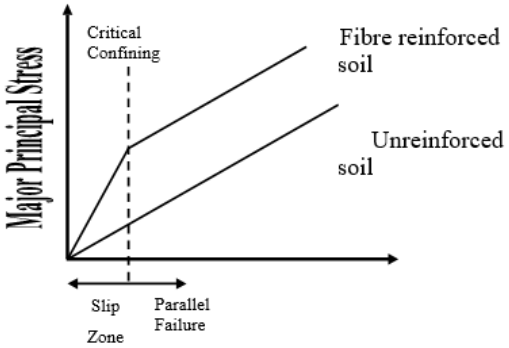
Gambar 1. Proses Pengolahan Kelapa Sawit

Suatu penelitian untuk menguji pengaruh potensi pengembangan dan penyusutan tanah yang diperkuat serat kelapa sawit, menunjukan bahwa penambahan serat pada tanah tidak memperbaiki potensi pengembangan pada tanah, bahwa semakin besar prosentase serat ditambahkan pada tanah semakin besar terjadi perubahan volume tanah akibat dari penyerapan air yang lebih besar karena meningkatnya permebilitas tanah. Pada uji potensi penyusutan, dengan penambahan serat memberi kontribusi pada berkurang patahan (cracks) dari dalam, maupun secara horisontal maupun vertikal akibat peningkatan dari prosentase serat. Kuat tekan, modulus elastis dan regangan batas meningkat ketika prosentase serat ditambahkan pada tanah [2]. Perkuatan serat juga telah digunakan untuk stabilisasi tanah ekspansif. Serat telah ditemukan dapat mengurangi potensi penyusutan (*shrinkage*) dan pengembangan dari tanah lempung ekspansif. Penggunaan serat juga telah dilaporkan dapat meningkatkan potensi ketahanan dari tanah terhadap pengembangan (*swelling*) [9].

Studi perkuatan tanah dengan menggunakan elemen jaring, hasilnya elemen-elemen jaring tersebut mampu meningkatkan kekuatan tanah, menaikan regangan runtuh dan menaikan daktilitas tanah. Perilaku “kohesi” pada komposit tanah pasir dengan elemen jaring bisa diidentifikasi, namun untuk apllikasinya perlu pertimbangan yang teliti [1]. Percobaan perkuatan lanau kepasiran dengan serat tandang buah kosong kelapa sawit. Terjadi kenaikan kekuatan geser tanah yng diperkuat serat dalam uji kondisi drained maupun undrained dengan prosentase serat sebesar 0.25% and 0.5% dengan panjang serat yang berbeda yaitu 15mm, 30mm and 45mm [8].

Pengujian dengan menggunakan serat polypropylene pada tanah lempung guna melihat potensi perbaikan tanah terhadap perilaku keretakan. Bahwa Faktor intensitas Keretakan (*Crack Intensity Factor* (CIF)) tanah tanpa serat aditif jauh lebih besar dari tanah dengan serat aditif. Perilaku retak signifikan dipengaruhi oleh perubahan kadar air dalam tanah untuk kandungan fiber (FC = 0%). Nilai CIF yang diamati untuk tanah dengan serat aditif untuk FC = 0,6% dan 0,8% adalah nol, hal ini menunjukkan bahwa faktor fiber secara efektif mengurangi perilaku retakan. sejumlah kecil retakan ditemukan untuk FC 0,2%, 0,4%, 1,0%, dan 1,2% [9].

Peningkatan ketahanan retak tanah lempung dengan penguat serat diselidiki menggunakan spesimen tanah yang diperkuat serat. Teknik pengolahan citra digunakan untuk menggambarkan pengaruh penambahan serat secara kuantitative pada karakteristik geometris dan morfologi dari pola retak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku retak pada siklus pengeringan tanah secara signifikan dipengaruhi oleh serat. Intensitas keretakan berkurang secara signifikan dan jumlah retak kering secara signifikan berkurang dengan penambahan serat [4]. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa perkuatan dengan serat dapat meningkatkan puncak kekuatan geser tanah dan membatasi penurunan dari perlawanan geser tanah dan menurunkan kekakuan tanah. Sebagian besar studi eksperimental dilakukan dengan menggunakan tanah granular [9].



Gambar 2. Kekuatan Geser tanah diperkuat serat (Gray dan Ohashi, 1983)

Bawah *critical confining pressure*, tanah yang diperkuat serat menunjukkan sudut geser lebih tinggi dari pada tanah tanpa perkuatan. *critical confining pressure* adalah fungsi dari sifat gesekan permukaan serat dan tanah. Nataraj dan McManis (1997) menggunakan tes geser langsung di lapangan untuk tanah lempung dan pasir diperkuat dengan serat polypropylene fibrillated [9]. Suatu percobaan perkuatan tanah lunak dengan mencampur empat persentase yang berbeda dari serat kelapa sawit yaitu: 0,25%, 0,5%, 0,75% dan 1% dari berat tanah. Penyelidikan meliputi efek dari serat kelapa sawit dalam tanah pada percobaan pemadatan dan perilaku kekuatan geser. Hasil percobaan menunjukkan terjadi peningkatan yang signifikan dalam kegagalan runtuh dan parameter kekuatan geser (C dan Φ) dari tanah yang diteliti [18].

Efek dari serat pada konduktivitas hidrolik dari kaolinit-serat komposit. Pengaruh serat dapat meningkatkan konduktivitas hidrolik dari komposit dan peningkatan tersebut lebih kelihatan pada kandungan serat yang lebih tinggi (hingga 4 % dari berat total). Terlepas dari peningkatan tersebut, konduktivitas hidrolik komposit masih cukup rendah untuk dipertimbangkan untuk beberapa aplikasi landfill [11]. Uji pengaruh kandungan serat untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung kompresif. Serangkaian tes tekan bebas dilakukan pada serat poliester polos dan berkerut yang didistribusikan secara acak. Kuat tekan bebas tanah lempung meningkat dengan penambahan serat dan lebih meningkat lagi ketika serat dicampur dalam campuran tanah lempung berpasir [3]. Serangkaian tes tekan bebas di laboratorium, splitting tension, three-point-bending, dan tes konduktivitas hidrolik pada tanah lempung kaolinit diperkuat dengan serat, dan melaporkan bahwa serat yang didistribusikan secara acak dapat meningkatkan puncak kuat tekan bebas, keuletan, kuat tarik belah (splitting tensile strength) dan kekuatan lentur (flexural toughness) dari lempung kaolinit [11].

d. Pemetaan Teoritis Studi Terdahulu

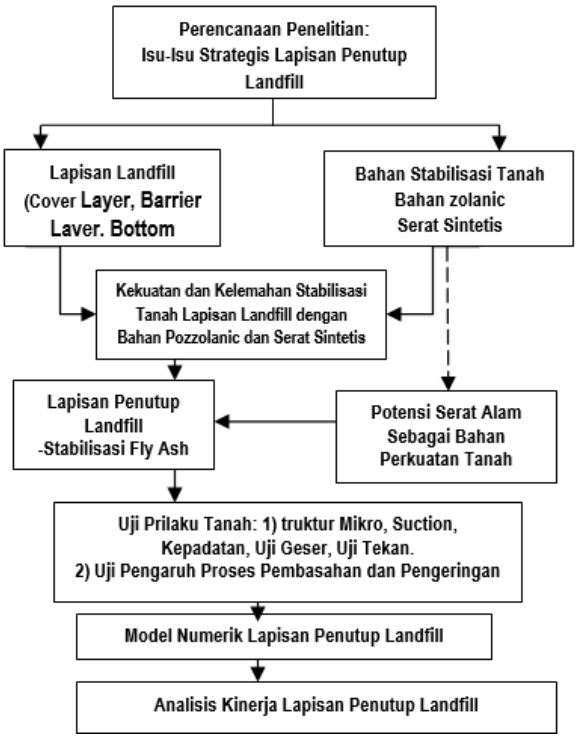
Penggunaan bahan polypropylene diskrit ke dalam tanah kapur. Enam sampel tanah disusun pada persentase yang berbeda dari serat dan kadar kapur. Empat pengujian dilakukan yaitu uji kompresi, uji geser, uji potensi pengembangan (swelling) serta uji potensi penyusutan (shrinkage). Dari hasil pengujian menunjukan bahwa kehadiran serat memberikan andil pada kenaikan kekuatan dan plastisitas tanah kapur, dengan penambahan serat dapat mengubah modus kegagalan tanah kapur dari kerapuhan ke daktile. Selain itu, penambahan serat menyebabkan penurunan dari potensi swelling serta menyebabkan peningkatan potensi penyusutan [5]. Interaksi Antarmuka antara serat dan tanah memainkan peran penting dalam memperkuat tanah. Ditemukan bahwa kekuatan ikatan antara serat dan matriks tanah dan gesekan antarmuka adalah mekanisme yang dominan serat diperkuat tanah. Hal ini tampaknya dikendalikan oleh sifat-sifat tanah dan kondisi antarmuka (mikro struktur, komposisi tanah, kekasaran permukaan serat, dll) [16].

e. Kerangka Pikir Penelitian

Potensi pengembangan dan penyusutan tanah yang diperkuat serat telah banyak dilakukan, bahwa penambahan serat pada tanah tidak memperbaiki potensi pengembangan pada tanah, bahwa semakin besar prosentase serat ditambahkan pada tanah semakin besar terjadi perubahan volume tanah akibat dari penyerapan air yang lebih besar karena meningkatnya permebilitas tanah. Pada uji potensi penyusutan, dengan penambahan serat memberi kontribusi pada berkurangnya patahan (cracks) dari dalam, baik secara horisontal maupun vertikal akibat peningkatan dari prosentase

serat [2].

Sementara hasil tes pemadatan terhadap spesimen tanah lanau berlempung yang diperkuat dengan serat. Disimpulkan bahwa kehadiran serat menurunkan kemampuan tanah untuk menjadi padat [10]. Solusi yang diusulkan untuk mengatasi hal ini adalah dengan menggunakan fly ash sebagai Bahan stabilisator dan perkuatan serat buah tandang sawit akan diuji pada tanah lempung lunak Kalukubula. Adapun keranka pikir pada penelitian ini disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kerangka pikir penelitian

3. METODOLOGI PENELITIAN

a. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian di Laboratorium Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Makassar. Waktu penelitian mengacu pada interval dan durasi yang telah ditetapkan berdasarkan standar pengujian yang digunakan, dengan total waktu lebih kurang 60 hari kalender.

b. Rancangan Penelitian

1) Bahan yang dibutuhkan

Tanah Lempung Kalukubula yang berada di daerah Kota Palu di bagian selatan, sedangkan bahan Fly ash diambil dari sisa pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap di Palu Utara. Serat Yang digunakan dalam Program Pengujian Eksperimel adalah Serat kelapa buah tandang kelapa sawit. Gambar 4 diekstraksi dengan proses retting pada tandang buah kosong tersebut. Serat dipotong sesuai panjang yang diperlukan dari 15, 30 dan 45 mm untuk dicampur dengan massa tanah.



Gambar 4. Serat tandang buah sawit

2) Peralatan Laboratorium

Mesin uji tarik yang universal Instron 3367, *Scanning Electron Microscope (SEM)*, *Energy Diespersive Spectroscopy (EDS*, *The X-ray Diffraction* (XRD), Cetakan benda uji, *Standard Proctor test*, *Direct Shear test*, *Hydrometer*, *Casagrande*, *Unconfined test*. Suction test.

3) Rancangan Benda Uji

Tanah diperkuat serat disiapkan dengan empat persentase yang berbeda dari konten serat. Sementara prosentase Fly Ash disiapkan dengan 4 persentase berbeda. Campuran optimum akan dicoba dengan 3 ukuran panjang fiber yang berbeda sebanyak 3 buah.

Tabel 1. Mix design benda uji

Fly Ash / Serat	0%	5%	10%	20%
0%	S1	S2	S3	S4
0,5%	S5	S6	S7	S8
1,0%	S9	S10	S11	S12
2,0%	S13	S14	S15	S16

Tabel 2. Rancangan pembuatan benda uji untuk stabilisasi tanah lempung

No.	Nama Sampel	3 hr	7 hari	28 hari	Jumlah Sampel
		TR	R	R	
1	S1	5	5	5	15
2	S2	5	5	5	15
3	S3	5	5	5	15
4	S4	5	5	5	15
5	S5	5	5	5	15
6	S6	5	5	5	15
7	S7	5	5	5	15
8	S8	5	5	5	15
9	S9	5	5	5	15
10	S10	5	5	5	15
11	S11	5	5	5	15
12	S12	5	5	5	15
13	S13	5	5	5	15
14	S14	5	5	5	15
15	S15	5	5	5	15
16	S16	5	5	5	15
Jumlah BU (buah)		80	80	80	240

S = Kode Benda Uji TR = tidak direndam R = direndam

4) Rancangan Pengujian

Pengujian bahan sebelum mendapat perlakuan (uji fisis dan struktur mikro), kemudian pengujian benda uji (uji mekanis dan struktur mikro). Rancangan pengujian sebagaimana Tabel 3.

Tabel 3. Rancangan pengujian

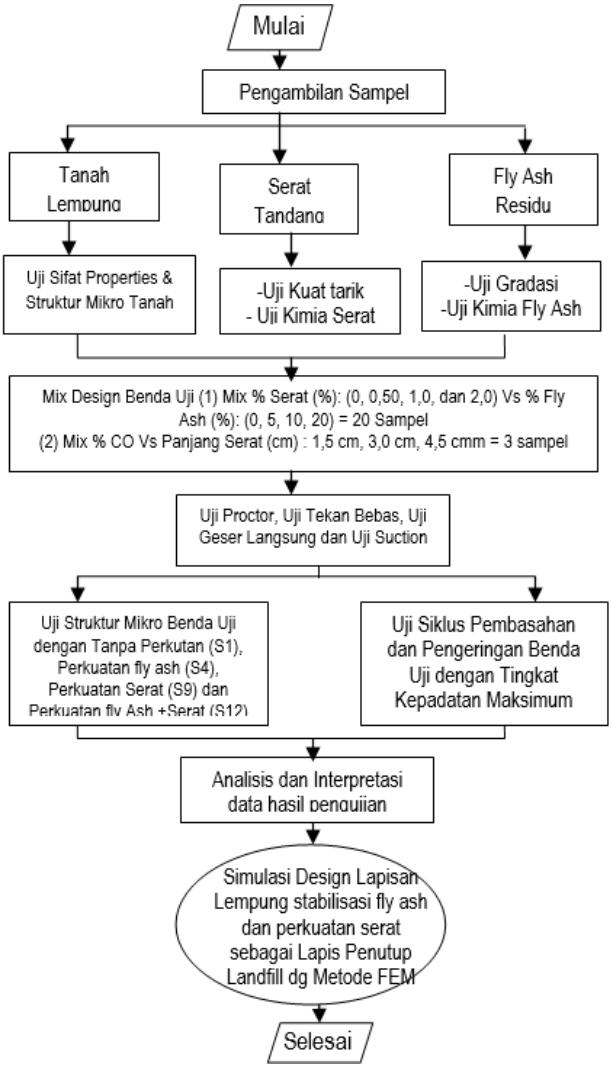
No	Bahan dan Benda uji	Pengujian karakteristik			
		Mekanis	Fisis	Mikrost	*Suction*
1	Fly Ash Batu bara	-	1	1	-
2	Serat Tandang Buah Sawit	1	-	1	-
3	Lempung (S1)	1	1	1	1
4	S5, S9, dan S13 (tanpa fly ash)	12	1*	1*	1*
5	S2, S3 dan S4 (tanpa serat)	12	1*	1*	3

6	S6, S7, S8, S10, S11, S12, S14, S15 dan S16 (Fly Ash dan Serat)	36	1*	1*	9
	Jumlah pengujian	58	5	6	14

1* = Diuji untuk sampel dengan tingkat kepadatan kering maksimum

e. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagan alir penelitian

4. KESIMPULAN

Berdasarkan kajian literature yang telah disajikan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan sementara bahwa nilai karakteristik tanah meningkat dan rasio keretakan tanah menurun dengan ditambahkannya fiber dan fly ash sebagai bahan perkuatan tanah. Lebih lanjut dapat disimpulkan bahwa: Penambahan serat-fly ash pada tanah lempung Kalukubula akan meningkatkan antara lain : Tingkat Kepadatan kering, kekuatan geser, kuat tekan, dan Konduktifitas Hidrolik; Potensi pengembangan dan penyusutan tanah yang diperkuat serat-fly ash akan berkurang signifikan, hal ini akan menyebabkan menurunnya potensi keretakan pada tanah yang diperkuat; Aspek teknis tanah yang diperkuat serat-Fly Ash sebagai lapis penutup Landfill akan menjadi lebih layak digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Adi, A.D, 1999, Stabilisasi Tanah Dengan Fiber Elemen-elemen Jaring, *Prosiding Seminar nasional Geoteknik ‘ 99*, Universitas Gadjah Mada, Jogjakarta.
2. Azadegan O., dkk (2012), Laboratory *Study on the Swelling, Cracking and Mechanical Characteristics of the*

Palm Fiber Reinforced Clay, EJGE Journal, Vol. 17, Bund. A.
3. B.R. Phani Kumar, dkk., (2004). Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. ASCE Journal, 130:7.
4. Chao-Sheng Tang, dkk, 2012., Desiccation cracking behavior of polypropylene fiber–reinforced clayey soil., *Canadian Geotechnical Journal*, 2012, 49(9): 1088-1101, 10.1139/t2012-067.
5. CAI Yi, dkk., 2006, *Experimental study on engineering properties of fibre-lime treated soils, Chinese Journal of Geotechnical Engineering*., Vol.28 No.10.
6. Erdem O. Tastan, dkk., 2011., Stabilization of Organic Soils with Fly Ash, journal of American Society of Civil Engineers.
7. Fauziah Ahmad*, Farshid Bateni, Mastura Azmi, (2010), *Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres*, Geotextiles and Geomembranes journal 28. 93–99.
8. Freitage DR. Soil randomly reinforced with _bers. J Geotech Eng-ASCE 1986; 112: 823{826.
9. Harianto, T., Hayashi, S., Du, Y.J., and Suetsugu, D. (2007). Studies on compacted soil with fiber reinforcement as a landfill cover system. *Proceedings of the 22nd International Conference on Solid Waste Technology and Management*, Philadelphia,USA, pp. 1000-1009.
10. Hong, Zhenshun,Tateishi, Yoshitaka Han, Jie. 2006, *Experimental Study of Macro- and Microbehavior of Natural Diatomite*., journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 132.
11. Maher, M. H. and Ho, Y. C. (1994). Mechanical properties of kaolinite fiber soil composite. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(8), 1381-1393.
12. Mercer, F.B, Andrawes, K.Z, McGown, A., and hytiris, N., 1984., *A New Method of Soil Stabilization*, proc,Sym.Polymer Grid Reinfor cement,Thomas Telford Ltd., London.
13. Miller, C. J. and Rifai, S. (2004). Fiber reinforcement for waste containment soil liners. *Journal of Environmental Engineering* ASCE, 8, 891-895.
14. P. V. Sivapullaiah, dkk, (2004), *Properties of Fly Ash as Hydraulic Barrier*., *Soil & Sediment Contamination*, 13:391–406, 2004.
15. Rao, G.V,dkk, (2000), *Strength Characteristic of Sand Reinforced with Coir Fibres and Coir Geotextiles*, Journal of Geotechnical Engineering.
16. TANG Chaosheng, dkk., 2011., *microstructural study on interfacial interactions between fiber reinforcement and soil*., Journal of Engineering Geology, 1004－9665/19(4) -0610-05,China.
17. USEPA (1999a). U.S. methane emission 1990-2020: inventories, projections, and opportunities for reductions. Office of Air and Radiation, Washington, D.C.
18. Zalipah Jamellodin, dkk., 2010., *The Effect Of Oil Palm Fibre On Strength Behaviour Of Soil*., Procedings of the 3rd SANREM Conference, Malaysia.

KUAT LENTUR BALOK BETON YANG MENGGUNAKAN BATANG POHON AREN SEBAGAI TULANGAN

Israel Padang[1*], Zwengly Lodi Honta[2], Jufri Manga[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jl. Jendral Sudirman No.9, Makale*
***e-mail**: israelpadang@ukitoraja.ac.id*

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jl. Jendral Sudirman No.9, Makale*
***e-mail**: zwengly@ukitoraja.ac.id*

[3]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jl. Jendral Sudirman No.9, Makale
e-mail: jufri@ukitoraja.ac.id

ABSTRAK

Dalam penelitian ini, batang pohon aren (Arenga pinnata) diusulkan sebagai alternatif tulangan pada balok beton untuk memberikan solusi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan di industri konstruksi. Penggunaan material konvensional seperti baja memiliki dampak lingkungan yang signifikan, terutama dalam proses produksinya yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Dengan meningkatnya kesadaran terhadap isu lingkungan dan keterbatasan sumber daya alam, pencarian alternatif material yang lebih efisien dan mudah diakses menjadi sangat penting. Selain itu, biaya material baja relatif tinggi dan sering kali memerlukan impor dari luar wilayah. Batang pohon aren dipilih karena merupakan material lokal yang dapat diperbarui, memiliki kekuatan mekanis yang baik, seperti kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang cukup tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi batang pohon aren (Arenga pinnata) sebagai alternatif tulangan pada balok beton dalam rangka menciptakan solusi konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Batang pohon aren dipilih karena sifat mekanisnya yang unggul, seperti kekuatan tarik dan tekan yang signifikan, serta modulus elastisitas yang cukup tinggi, sehingga memungkinkan penggunaannya dalam aplikasi struktural. Dalam penelitian ini, dilakukan serangkaian uji lentur terhadap balok beton yang ditulangi dengan batang kayu aren, yang kemudian dibandingkan dengan balok beton yang tidak memiliki tulangan untuk mengetahui kontribusi tulangan dari batang pohon aren terhadap kuat lentur balok beton. Hasil uji menunjukkan bahwa balok beton dengan tulangan batang pohon aren memiliki kekuatan dan daya lentur yang cukup baik, dimana nilai kuat lentur rata-rata untuk balok BLTA adalah 4,93 MPa, sementara untuk balok BLK hanya 3,20 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan tulangan batang pohon aren pada balok BLTA meningkatkan kapasitas lentur sebesar 1,73 MPa. Jika dihitung dalam persentase, peningkatan kapasitas lentur tersebut adalah sekitar 54,06% dibandingkan dengan balok BLK tanpa tulangan. Temuan ini menunjukkan bahwa batang pohon aren memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai material tulangan alternatif, yang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada baja tetapi juga memberikan solusi yang lebih ramah lingkungan dalam industri konstruksi.

Kata kunci: batang kayu aren, tulangan, balok beton, kapasitas lentur, konstruksi.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan pesat industri konstruksi telah meningkatkan permintaan akan material konstruksi, terutama baja sebagai bahan tulangan. Namun, keterbatasan sumber daya alam dan dampak lingkungan yang signifikan dari produksi baja telah mendorong pencarian alternatif yang lebih berkelanjutan. Proses produksi baja secara global berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, sehingga pengurangan penggunaannya dalam konstruksi dapat berperan penting dalam upaya menurunkan jejak karbon industri ini (Olugbenga et al., 2022). Selain itu, biaya penggunaan baja sebagai tulangan relatif tinggi.

Dalam perkembangan terkini, telah muncul penggunaan material alami sebagai substitusi tulangan baja pada beton. Misalnya, batang bambu dan batang pohon aren kini dipertimbangkan sebagai alternatif tulangan, yang mendukung konsep daur ulang dan penggunaan material lokal, serta mengurangi ketergantungan pada material yang harus diimpor dari lokasi yang jauh. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengeksplorasi penggunaan bambu sebagai pengganti tulangan, dengan fokus pada kapasitas lentur balok beton. Sifat mekanis bambu menjadikannya alternatif yang layak untuk menggantikan baja, di mana perkuatan dengan bambu mampu meningkatkan kapasitas beban lentur maksimum pada balok beton. Kekuatan tarik bambu yang tinggi, yang hampir sebanding dengan baja, juga mendukung kapabilitas beban tersebut (Nuralinah D., 2016).

Namun, secara umum, performa balok bertulangan bambu masih di bawah balok beton bertulangan baja. Sebagai contoh, dalam penelitian yang dilakukan oleh Suryani & Budi (2016), diperoleh kekuatan lentur 3,98 N/mm² untuk bambu dan 12,3693 N/mm² untuk baja, menunjukkan bahwa kapasitas lentur balok tulangan baja sekitar tiga kali lebih baik daripada tulangan bambu. Temuan ini mendorong para peneliti untuk terus mencari solusi yang dapat

meningkatkan kekuatan lentur bambu hingga mencapai potensi optimalnya sebagai tulangan. Salah satu solusi yang telah dicoba adalah laminasi bambu dengan plastik, sebagaimana yang dilakukan oleh Artanto (2022), yang menunjukkan bahwa kuat lentur rata-rata balok tulangan bambu laminasi lingkaran mencapai 63,68% dari tulangan baja, sedangkan balok tulangan bambu laminasi persegi mencapai 64,90% dari balok tulangan baja.

Gagasan penggunaan batang pohon aren sebagai alternatif tulangan pada balok didasari oleh kemiripannya dengan bambu. Penelitian yang dilakukan oleh Sri et al. mengkaji sifat mekanis dan kekuatan lentur balok bertulangan kayu panggoh (aren) secara teoritis dan eksperimental, dengan hasil yang tidak jauh berbeda. Hasil uji sifat mekanis menunjukkan nilai modulus elastisitas sebesar 131.649,6 kg/cm², yang menurut Tata Cara Perencanaan Konstruksi Kayu (PKKI 2002) menempatkan kayu panggoh atau aren pada kategori mutu E18, hampir setara dengan bambu.

Pohon aren secara umum tumbuh secara lokal di berbagai wilayah tropis dengan ketinggian 100 – 1.400 meter di atas permukaan laut (MDPL), terutama di daerah Tana Toraja dan Toraja Utara. Masyarakat Toraja memanfaatkan aren dan lidi dari pohon aren untuk kerajinan sapu, memanfaatkan arak dari pohon aren untuk minuman pada acara adat, serta memanfaatkan batangnya untuk konstruksi bangunan. Penelitian menunjukkan bahwa tanaman aren memiliki potensi besar dalam berbagai aspek, termasuk sebagai bahan konstruksi. Batang pohon aren dikenal memiliki sifat ringan dan kuat, yang membuatnya potensial sebagai material tulangan yang mampu memberikan dukungan struktural memadai. Selain itu, sifat daur ulang dan biodegradabel pohon aren juga mendukung prinsip-prinsip keberlanjutan, mengurangi limbah dan dampak lingkungan setelah penggunaannya (ArsitekHijau) (Green Indonesia). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pemahaman mengenai potensi penggunaan batang pohon aren sebagai tulangan pada balok beton, serta merangsang inovasi dalam pengembangan konstruksi berkelanjutan yang ramah lingkungan. Penelitian ini juga diharapkan dapat mencakup pengembangan desain konstruksi yang mempertimbangkan karakteristik unik batang ijuk, sekaligus memastikan keberlanjutan dan keamanan strukturalnya.

2. LANDASAN TEORI

Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang merupakan elemen struktural yang esensial dalam konstruksi bangunan modern, menggabungkan beton dan tulangan baja untuk mengatasi beban lentur dan geser. Beton, yang kuat dalam menahan tekan namun lemah dalam tarik, diperkuat dengan tulangan baja untuk meningkatkan kapasitas lenturnya. Kombinasi antara beton dan baja ini memungkinkan balok menahan beban besar dan mendistribusikan tekanan secara merata di seluruh elemen bangunan. Balok beton bertulang sering digunakan untuk menahan beban struktural utama, seperti lantai dan atap. Beton berperan sebagai material kompresi, sementara baja berperan dalam menahan tegangan tarik. Penelitian oleh Putra (2020), menyoroti pentingnya pemilihan material yang tepat dan perancangan yang baik untuk memastikan kinerja balok beton bertulang dalam kondisi beban maksimum. Beton bertulang merupakan solusi yang ekonomis dan tahan lama, menjadikannya pilihan utama dalam konstruksi.

Seiring dengan perkembangan teknologi, penelitian tentang balok beton bertulang juga mengalami kemajuan signifikan. Salah satu inovasi penting adalah penggunaan bahan alam sebagai pengganti tulangan baja. Bambu dan serat alam telah menjadi fokus penelitian dalam beberapa tahun terakhir karena ketersediaannya yang melimpah dan sifat mekanis yang baik. Penelitian oleh Wijaya (2021), menunjukkan bahwa bambu memiliki kuat tarik yang sebanding dengan baja, menjadikannya alternatif yang layak untuk tulangan beton. Selain itu, penggunaan bambu sebagai tulangan dapat mengurangi biaya produksi dan dampak lingkungan, mengingat bambu adalah material yang dapat diperbarui dengan siklus pertumbuhan yang cepat. Selain itu, serat alam seperti serat kelapa dan arenjuga telah diteliti sebagai alternatif tulangan. Penelitian ini mengungkapkan bahwa serat alam dapat meningkatkan kinerja balok beton dalam hal ketahanan terhadap retak dan deformasi, sekaligus mendukung keberlanjutan dalam konstruksi. Penggunaan bahan alam ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada baja, tetapi juga berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi jejak karbon dan mempromosikan penggunaan material lokal.

Kinerja balok beton bertulang sangat bergantung pada desain dan implementasi yang tepat. Kesalahan dalam perancangan atau pemasangan dapat menyebabkan kegagalan struktural yang fatal. Penelitian oleh Hidayat dan Setiawan (2021) menekankan pentingnya uji laboratorium sebelum penerapan di lapangan untuk memastikan kinerja optimal dari balok beton bertulang. Di sisi lain, penggunaan material alam seperti bambu dan serat alam dalam balok beton bertulang juga mendukung prinsip keberlanjutan. Penggunaan bahan-bahan ini membantu mengurangi limbah dan emisi karbon, sekaligus mendukung ekonomi lokal dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia secara melimpah di berbagai wilayah Indonesia. Balok beton bertulang adalah elemen kunci dalam konstruksi bangunan yang menawarkan kombinasi kekuatan, ketahanan, dan efisiensi biaya. Perkembangan teknologi dan inovasi dalam penggunaan bahan alam terus meningkatkan kinerja dan keberlanjutan balok ini. Penelitian lebih lanjut dalam desain dan material yang digunakan akan terus berkontribusi pada peningkatan kualitas dan efisiensi balok beton bertulang di masa depan.

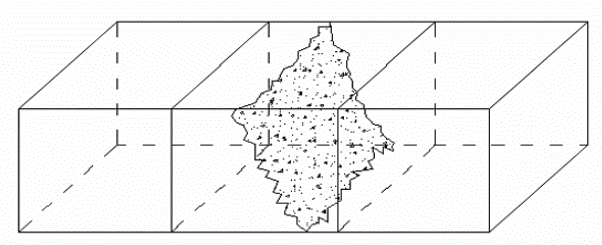
Kuat Lentur Balok

Menurut SNI 4431-2011 kuat lentur balok beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan

untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan kepadanya, sampai benda uji patah, dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas. Rumus-rumus perhitungan yang digunakan adalah :

a. Untuk pengujian dimana bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), maka kuat lentur beton dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

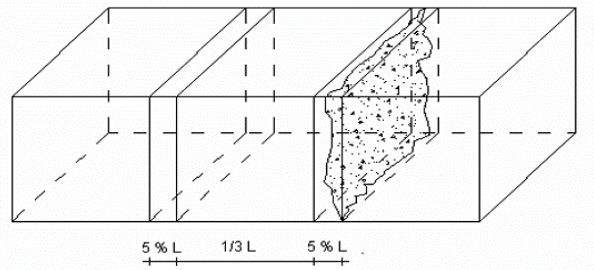
$$\sigma_1 = \frac{\boldsymbol{P.L}}{\boldsymbol{b.h^2}} \quad (1)$$



Gambar 1. Patah pada 1/3 bentang tengah

b. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan, maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan sebagai berikut:

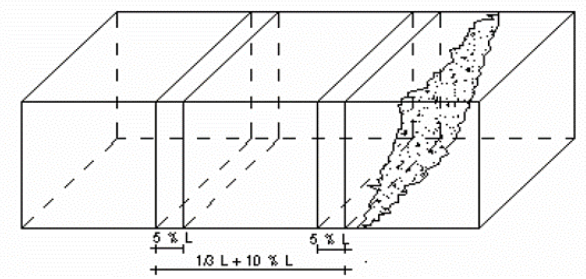
$$\sigma 1 = \frac{\boldsymbol{P.a}}{\boldsymbol{b.h^2}} \quad (2)$$



Gambar 2. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang

Dimana, σ_1 = Kuat lentur benda uji (MPa), P = Beban uji (kN), L = Jarak (bentang) antara dua garis perletakan (mm), b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm), h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm), a = jarak rata-rata antar tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada 4 tempat pada sudut dari bentang (mm), 1 Kg = 9,8 N dan 1 kN = 101,97 kg.

c. Untuk benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah lebih dari 5%, hasil pengujian tidak digunakan.



Gambar 3. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang

Batang Pohon Aren dan Sifat Mekanis

Batang pohon aren (Arenga pinnata) adalah material alami yang telah banyak diteliti karena potensinya sebagai

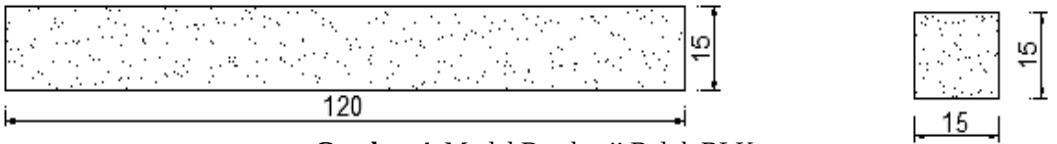
alternatif material konstruksi di wilayah tropis. Kayu ini memiliki tekstur keras dan serat yang kuat, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi struktural. Berdasarkan penelitian Sri et al. (2022), modulus elastisitas batang pohon aren tercatat sebesar 131,649.6 kg/cm², menunjukkan kekuatannya yang sebanding dengan kayu berkualitas tinggi seperti bambu. Kuat tekan batang pohon aren berkisar antara 40 hingga 60 MPa, sedangkan kuat tariknya berkisar antara 80 hingga 120 MPa, menunjukkan kemampuan signifikan sebagai material alternatif dalam konstruksi (Indriani & Setiawan, 2021). Penelitian lain oleh Sutrisno et al. (2020) mengindikasikan bahwa penambahan serat batang pohon aren pada beton dapat meningkatkan kuat lentur sebesar 12%, sementara Yusuf & Nanda (2021) menemukan bahwa batang pohon aren memiliki kekuatan yang cukup untuk digunakan sebagai tulangan pada struktur beton ringan. Selain itu, Wahyu & Priyadi (2023) menunjukkan bahwa dengan pengawetan yang tepat, batang pohon aren mampu bertahan dalam kondisi lembap dan memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan beton ringan. Sifat mekanis yang unggul ini menjadikan batang pohon aren sebagai alternatif yang layak untuk material bangunan konvensional seperti baja, terutama dalam aplikasi yang memerlukan bahan alami yang ringan namun kuat.

METODE PENELITIAN

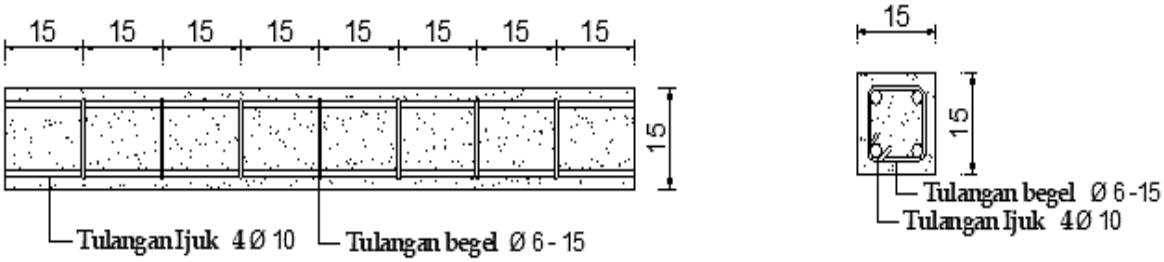
Penelitian ini dilakukan dengan metode studi eksperimental di laboratorium. Benda uji balok beton tanpa tulangan BLK dan balok beton tulangan batang pohon aren BLTA dibuat untuk mengetahui kontribusi kuat lentur dari pemanfaatan batang pohon aren sebagai tulangan. Balok beton dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 120 cm masing-masing variasi dibuat 2 benda uji antara lain 2 buah balok beton tanpa tulangan dan 2 buah balok dengan tulangan dari batang pohon aren. Mutu beton direncanakan 20 Mpa. Batang pohon aren dipilih dari batang kayu yang sudah tua, dibentuk berdiameter 10 mm dan diaplikasikan sebagai tulangan lentur. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian karakteristik agregat kasar dan halus menggunakan standar *American Society For Testing and Materials (ASTM),* pengujian kuat tekan benda uji silinder 15x30 sebanyak 3 buah pada umur 28 hari, uji tarik tulangan batang pohon aren dilakukan di Laboratorium Universitas Kristen Indinesia Paulus Makassar dan uji lentur balok dilakukan di laboratorium Universitas Kristen Indonesia Toraja. Desain model dan penampang benda uji mengacu pada Buku Saku Petunjuk Konstruksi Bangunan Sederhana Dinas PUPR 2022.

Tabel 1 . Benda uji balok

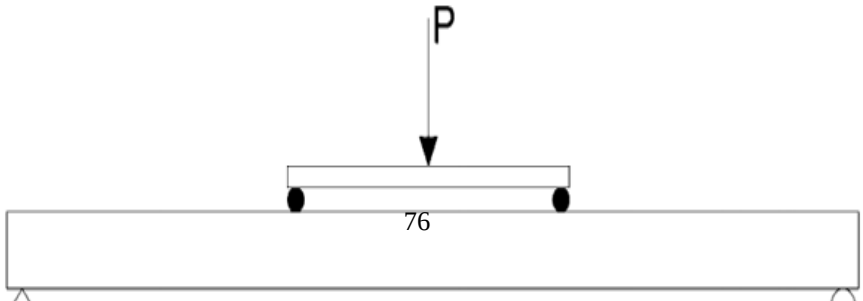
No.	Kode Benda Uji	D Tulangan	Jumlah
1	BLK	-	2 buah
2	BLTA	10 mm	2 buah



Gambar 4. Model Benda uji Balok BLK



Gambar 5. Model Benda uji Balok BLTA



Gambar 6. Model Pembebanan Benda Uji

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Tabel 2. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar

No.	Jenis Pengujian	Standar	Hasil	Keterangan
1	Kadar Lumpur	0.2 % - 6 %	0,671 %	Memenuhi
2	Bobot Isi			
	Kondisi Padat	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,629 gr/cm³	Memenuhi
	Kondisi Lepas	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,447 gr/cm³	Memenuhi
3	Kadar Air	0.5 % - 5 %	1,215 %	Memenuhi
4	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Oven)	1.6 - 3.1 gr	2,673 gr	Memenuhi
5	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Permukaan)	1.6 - 3.1 gr	2,684 gr	Memenuhi
6	Berat Jenis Semu	1.6 - 3.1 gr	2,704 gr	Memenuhi
7	Penyerapan Air	0.2 % - 5 %	0,433 %	Memenuhi
8	Abrasi (Keausan)	15 – 40 %	20,020 %	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar menunjukkan bahwa semua parameter uji memenuhi standar yang ditetapkan *American Society For Testing and Materials (ASTM).*

Hasil Pengujian Karekteristik Agregat Halus

Tabel 3. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus

NO.	Jenis Pengujian	Standar	Hasil	Keterangan
1	Kadar Lumpur	0.2 % - 6 %	2,459 %	Memenuhi
2	Bobot Isi			
	Kondisi Padat	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,424 gr/cm³	Memenuhi
	Kondisi Lepas	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,233 gr/cm³	Memenuhi
3	Kadar Air	0.5 % - 5 %	4,458 %	Memenuhi

NO.	Jenis Pengujian	Standar	Hasil	Keterangan
4	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Oven)	1.6 - 3.1 gr	2,269 gr	Memenuhi
5	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Permukaan)	1.6 - 3.1 gr	2,360 gr	Memenuhi
6	Berat Jenis Semu	1.6 - 3.1 gr	2,496 gr	Memenuhi
7	Penyerapan Air	0.2 % - 5 %	4,024 %	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar menunjukkan bahwa semua parameter uji memenuhi standar yang ditetapkan *American Society For Testing and Materials (ASTM)*.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton normal silinder 15 cm x 30 cm sebanyak 3 buah benda uji dilakukan setelah mencapai umur 28 hari. Pengujian kuat tekan beton normal dapat dilihat pada **Tabel 4**.



Gambar 7 . Pengujian kuat tekan beton

Tabel 4 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton normal

No	Berat (kg)	Beban (N)	Luas Penampang Silinder (mm^2)	Kuat Tekan f'_c (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata f'_c (MPa)
BN 1	12,049	340000	17662,5	19,25	18,68
BN 2	12,124	320000	17662,5	18,12	
BN 3	12,057	330000	17662,5	18,68	

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Uji mutu beton dilakukan di umur 28 hari untuk mengetahui apakah mutu rencana tercapai sebelum aplikasi pada balok beton. Berdasarkan hasil uji tekan diperoleh mutu beton rata-rata sebesar 18,68 Mpa. Hasil memperlihatkan mutu rencana tercapai 94,3%.

Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan



Gambar 8 . Pengujian kuat tarik tulangan batang aren

Tabel 5 Hasil pengujian kuat tarik tulangan

Jenis Kayu	No. Kode	Beban (kN)	Luas Penampang Tul. As (Cm^2)	Kuat Tarik (Kg/Cm^2)	Kuat Tarik Rata-rata (Kg/Cm^2)
Kayu Aren	W-Ta-1	9,1	1	927,93	907,54
	W-Ta-2	8,7	1	887,14	

Sumber : Hasil Pengujian di Laboratorium Teknik Sipil UKIP Makassar , 2024

Hasil uji tarik tulangan batang pohon aren diperoleh kuat tarik rata-rata sebesar 907,54 kg/cm^2 atau sekitar 89,016 Mpa.

Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok

Tabel 6 Hasil pengujian kuat lentur balok

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Dari tabel hasil uji lentur balok memperlihatkan kinerja lentur rata-rata balok BLTA dengan tulangan batang pohon

Kode Benda Uji	L (mm)	h (mm)	b (mm)	P (KN)	P(Kg)	$\sigma 1$	
						Kg/mm^2	Mpa
BLK 1	450	150	150	24	2447,28	0,326	3,20
BLK 2	450	150	150	24	2447,28	0,326	3,20
		Rata – rata				0,326	**3,20**
BLTA 1	450	150	150	36	3670,92	0,489	4,80
BLTA 2	450	150	150	38	3874,86	0,517	5,06
		Rata – rata				0.503	**4,93**

aren mencapai 0,503 Kg/mm^2 atau sekitar 4,93 Mpa. Kontribusi kuat lentur jika dibandingkan dengan BLK dengan kuat lentur rata-rata sebesar 0,326 Kg/mm^2 atau sekitar 3,20 Mpa adalah 1,73 Mpa atau meningkatkan perfoma lentur balok sebesar 54,06%.

Kondisi Benda Uji Pasca Pembebanan



Gambar 9. Kondisi benda uji BLK pasca pembebanan



Gambar 10. Kondisi benda uji BLTA pasca pembebanan

Berdasarkan gambar kondisi benda uji pasca pembebanan, terlihat bahwa balok BLK yang tidak memiliki tulangan mengalami retakan yang signifikan di tengah bentang, menunjukkan ketidakmampuannya dalam menahan beban lentur yang diberikan. Hal ini mengindikasikan bahwa balok tanpa tulangan memiliki keterbatasan kekuatan struktural terhadap gaya tarik yang terjadi pada saat pembebanan. Sebaliknya, balok BLTA yang menggunakan tulangan batang kayu arenmemperlihatkan adanya retakan yang lebih terkontrol dan tidak separah retakan pada balok BLK. Ini menunjukkan bahwa penggunaan tulangan kayu aren memberikan kontribusi dalam meningkatkan kekuatan tarik dan daktilitas balok, sehingga mampu menahan pembebanan dengan lebih baik dibandingkan balok tanpa tulangan. Tulangan batang pohon aren berfungsi untuk mendistribusikan tegangan tarik yang terjadi, mengurangi konsentrasi tegangan di satu titik, dan memperlambat keruntuhan.

Pembahasan

- Keunggulan Kekuatan Lentur: Penggunaan tulangan kayu aren mampu meningkatkan kekuatan lentur balok beton hingga 54,06% dibandingkan dengan balok tanpa tulangan. Hal ini menunjukkan bahwa kayu aren dapat memberikan dukungan struktural yang signifikan.
- Keberlanjutan: Kayu aren adalah material yang terbarukan dan ramah lingkungan, berbeda dengan baja yang memerlukan proses produksi yang intensif energi dan menghasilkan emisi gas rumah kaca.
- Ketersediaan Lokal: Kayu aren banyak ditemukan di wilayah tropis, sehingga dapat menjadi solusi material yang lebih mudah diakses dan ekonomis di wilayah seperti Indonesia.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan :

1. Nilai kuat lentur rata-rata untuk balok BLTA adalah 4,93 MPa, sementara untuk balok BLK hanya 3,20 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan tulangan batang kayu arenpada balok BLTA meningkatkan kapasitas lentur sebesar 1,73 MPa. Jika dihitung dalam persentase, peningkatan kapasitas lentur tersebut adalah sekitar 54,06% dibandingkan dengan balok BLK tanpa tulangan. Peningkatan yang signifikan ini menegaskan efektivitas penggunaan tulangan batang pohon aren dalam meningkatkan kekuatan lentur balok.
2. Balok tanpa tulangan (BLK) mengalami keretakan yang lebih besar dan terpusat di tengah bentang, menunjukkan kegagalan struktural yang signifikan akibat ketidakmampuan balok tersebut menahan beban lentur. Sementara itu, balok dengan tulangan batang pohon aren (BLTA) menunjukkan keretakan yang lebih terkendali dan tersebar, yang mengindikasikan bahwa tulangan batang pohon aren berhasil meningkatkan kapasitas lentur balok, mengurangi konsentrasi tegangan, dan memperlambat keruntuhan.

DAFTAR PUSTAKA

Ampangallo, B. A. (2022). “Studi Perilaku Balok Beton dengan Tulangan Bambu Laminasi Limbah Plastik”. Journal on Education, Vol. 4, 1639-1649.

Green Indonesia. (n.d.). “Aren Komoditi yang Menjanjikan”. Green Indonesia. https://greenindonesia.co

Hidayat, R., & Setiawan, B. (2021). “Evaluasi Kinerja Struktural Balok Beton Bertulang pada Bangunan Bertingkat”. Jurnal Rekayasa Struktur, Vol. 5, 120-135.

Indriani, M., & Setiawan, A. (2021). “Kekuatan Tekan dan Tarik Pohon arensebagai Material Alternatif dalam Konstruksi”. Jurnal Teknologi Kayu, Vol. 10, 23-30.

Nuralinah, D. (2016). “Eksperimen dan Analisis Beban Lentur pada Balok Beton Bertulangan Bambu Rajutan”. Rekayasa Sipil, Vol. 10, 197-208.

Olugbenga, T., et al. (2022). “Structural Integrity and Environmental Impact of Sustainable Building Materials”. Journal of Cleaner Production, Vol. 362, 132377.

Putra, D. (2020). “Pengaruh Kualitas Material Terhadap Kinerja Balok Beton Bertulang di Indonesia”. Jurnal Teknik Sipil Indonesia, Vol. 10, 45-59.

Sri, W., et al. (2022). “Analisis Sifat Mekanis Pohon aren(Arenga pinnata) dan Potensinya dalam Konstruksi”. Jurnal Material Alami, Vol. 8, 45-52.

Suryani, I., Budi, A. S., & Sunarmasto. (2016). “Kuat Lentur Balok Beton Tulangan Bambu Petung Vertikal”. e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL, Desember, 1251.

Sutrisno, A., Wijaya, R., & Yuliani, S. (2020). "Pengaruh Serat Batang Pohon Aren Sebagai Penguat Pada Beton." *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 10(2), 45-52.

Wahyu, D., & Priyadi, A. (2023). "Analisis Kekuatan Mekanis Batang Pohon Aren Sebagai Tulangan Pada Struktur Beton Ringan." *Jurnal Inovasi Konstruksi*, 12(1), 25-33.

Wijaya, T. (2021). “Penggunaan Bambu sebagai Pengganti Tulangan Baja pada Balok Beton”. Jurnal Konstruksi dan Material, Vol. 9, 102-110.

Yusuf, A., & Nanda, D. (2021). "Eksplorasi Batang Pohon Aren Sebagai Material Tulangan Pada Beton." *Jurnal Material dan Konstruksi Tropis*, 8(3), 101-110.

INOVASI PEMBUATAN GEOPOLIMER SEBAGAI ALTERNATIF MATERIAL ORNAMEN ARSITEKTUR TRADISIONAL BALI BERKELANJUTAN

I Nyoman Sutarja[1*], I Nyoman Susanta[2], Muhammad Maheswara Aryasatya[3] dan Ngurah Sedana Putra[4]

[1]Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. PB. Sudirman Denpasar*
***e-mail**: nsutarja@unud.ac.id*
[2]Program Studi Arsitektur, Universitas Udayana, Jimbaran, Badung, Bali
e-mail: susanta@unud.ac.id
[3] Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jimbaran, Badung, Bali
e-mail: aryasatya.2205511013@student.unud.ac.id
[4]Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. PB. Sudirman Denpasar
e-mail: nsedana9@gmail.com

ABSTRAK

Inovasi penggunaan tanah batu apung sebagai bahan dasar ornamen tradisional Bali semakin luas, terutama pada fasilitas umum dan tempat suci, seperti pura. Salah satunya adalah Pemugaran Pura Dalem Penegil Dharma di Desa Kubutambahan, Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng. Dalam praktiknya, tanah batu apung alami dicampur dengan semen pozzolan sebagai pengikat sebelum dicetak dan diukir. Namun, untuk memenuhi standar Bangunan Hijau yang berkelanjutan, penggunaan semen pozzolan perlu dikurangi dan diganti dengan bahan yang lebih ramah lingkungan. Penelitian laboratorium telah menguji geopolimer sebagai pengganti 100% semen pozzolan. Campuran prekursor dan aktivator memiliki perbandingan 75%:25% (SP-2) dan 80%:20% (SP-3), menggunakan tanah batu apung dari Desa Bungkulan serta aktivator alkali Na2SiO3 dan NaOH dengan rasio 2:1. Uji berat volume dan kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari, sementara uji kuat tarik belah pada 28 hari. Sebagai kontrol, spesi dengan perbandingan 1 semen: 3 tanah batu apung (SP-1) diuji sesuai praktik lapangan. Hasil menunjukkan sifat mekanis geopolimer hampir setara dengan spesi semen pozzolan. Pada umur 28 hari, berat volume spesi semen pozzolan (SP-1) 1608,3 kg/m³, geopolimer (SP-2: 1645,9 kg/m³, SP-3: 1825,5 kg/m³), serta kuat tekan spesi semen pozzolan (SP-1) 9,93 MPa dan geopolimer (SP-2: 9,53 MPa, SP-3: 14,87 MPa). Kuat tarik belah geopolimer (SP-2: 1,36 MPa, SP-3: 1,47 MPa) tidak berbeda signifikan dengan spesi semen pozzolan. Geopolimer dapat menjadi alternatif material ornamen Bali yang ramah lingkungan.

Kata kunci : inovasi, geopolimer, Arsitektur Tradisional Bali, keberlanjutan

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu karakteristik arsitektur tradisonal Bali (ATB) dalam pelaksanaannya berupa berbagai macam hiasan berbahan batu padas tuff vulkanik berjenis batuan hasil kegiatan vulkanik yang berbutir sangat halus hingga lanau, dengan kenampakan struktur batuan sedimen yang sudah menghadapi proses pemadatan (Pranajaya I.K., dkk, 2022). Inovasi penggunaan tanah batu apung sebagai bahan dasar ornament tradisional Bali telah banyak digunakan, baik untuk fasilitas umum maupun tempat suci, seperti pura. Salah satunya adalah dalam Pemugaran Pura Dalem Penegil Dharma (Pura Penyusuan) yang berlokasi di Desa Kubutambahan Kecamatan Tejakula kabupaten Buleleng. Dalam prakteknya di lapangan tanah batu apung (orang lokal menyebut tanah batu kembung) alami masih dicampur dengan semen pozoland sebagai bahan pengikat, sebelum dicetak dan diukir.

Untuk memenuhi standar Bangunan Hijau yang berkelanjutan, penggunaan semen pozoland hendaknya mulai dikurangkan, dan diganti dengan bahan lain yang lebih ramah terhadap lingkungan. Bahan tersebut salah satu alternatifnya yaitu dengan pembuatan perekat atau spesi Geopolimer. Perekat geopolimer adalah perekat geosintetik yang menggunakan bahan yang bukan berasal dari semen. Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits pada tahun 1978 yang menemukan ikatan polimerisasi antara aktivator alkalin dengan bahan utama berupa *fly ash* dan abu sekam padi. Geopolimer adalah sintesis bahan alam melalui proses polimerisasi dengan bahan utama dalam pembuatan bahan geopolimer adalah bahan yang mengandung unsur silika dan alumina (Davidovits, 2015). Beberapa sifat mekanis geopolimer yang harus diuji sebelum dipergunakan adalah berat volume, kuat tekan dan kuat tarik.

Dalam penelitian ini dilakukan inovasi pembuatan material campuran antara Prekursor-Aktivator Perekat Geopolimer menggunakan Tanah Batu Apung yang berasal dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng (selanjutnya disebut Tanah Batu Apung Desa Bungkulan). Pemilihan bahan dasar tersebut berkaitan dengan ketersediaannya yang masih cukup berlimpah di desa tersebut. Sebagai pembanding telah dilakukan juga pengujian spesi tanah batu apung dengan perekat semen pozoland dengan campuran sesuai yang sudah dilaksanakan dilapangan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa berat volume, kuat tekan dan kuat Tarik belah spesi tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng dengan perekat semen pozolad
2. Berapa berat volume, kuat tekan dan kuat tarik belah spesi campuran antara Prekursor-Aktivator perekat Geopolimer menggunakan tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk menguji berat volume, kuat tekan dan kuat tarik belah spesi tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng dengan perekat semen pozilad
2. Untuk menguji berat volume, kuat tekan dan kuat tarik belah spesi campuran antara Prekursor-Aktivator perekat Geopolimer menggunakan tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng

1.4 Manfaat Penelitian

1. Dapat mengetahui berat volume, kuat tekan dan kuat tarik belah spesi tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng dengan perekat semen pozilad
2. Dapat mengetahui berat volume, kuat tekan dan kuat tarik belah spesi campuran antara Prekursor-Aktivator perekat Geopolimer menggunakan tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng

1.5 Batasan Masalah

Pada penelitian ini masalah dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :
1. Tanah batu apung yang diteliti berasal dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula, Kabupaten Buleleng.
2. Campuran semen pozolad dan tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng dengan perbandingan 1 semen : 3 tanah batu apung
3. Komposisi campuran prekursor dan aktivator direncanakan yaitu 75%:25% dan 80%:20%
4. Perbandingan alkali aktivator Na2SiO3 dan NaOH (NS/NH) direncanakan yaitu 2 : 1.
5. Pengujian berat volume dan kuat tekan pada umur 7, 14, 21 dan 28 hari, dengan benda uji kubus 50 mm x 50 mm x 50 mm
6. Pengujian kuat tarik belah pada umur 28 hari, dengan benda uji silinder 75 mm x 150 mm

2. MATERI DAN METODE

2.1 Geopolimer

Geopolimer adalah bentuk anargonik alumina – silica yang disentesa dari material yang banyak mengandung silica (SI) dan alumina (AI) yang berasal dari alam atau dari material hasil sampingan industri (Firdaus, 2019). Dalam (Badan Standarisasi Nasional, 2002) mortar didefinisikan sebagai campuran agregat halus (pasir), perekat (tanah liat, kapur, Portland semen) dan air dengan komposisi tertentu. Sedangkan mortar Geopolimer merupakan bahan bangunan yang fungsinya masih sama dengan mortar normal, yaitu sebagai bahan perekat. Dalam hal ini yang membedakan antara mortal normal dengan mortar geopolimer adalah bahan campurannya, yang mana mortar geopolimer akan menghilangkan 100% dari penggunaan porland semen sebagai pengikatnya (Hermawan, 2019).

2.2 Prekursor

Prekursor merupakan bahan utama penyusun geopolimer yang memiliki kandungan silikat dan alumina yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai bahan pengganti utama pembuatan mortar yaitu semen portland. Umumnya prekursor geopolimer terdiri atas fly ash, slag, metakolin dan alumina silikat terkalsinasi (kaolinite)(Osio-Norgaard et al., 2018). Prekursor adalah bahan utama perekat dalam pembentukan geopolimer yang berasal dari material alami atau limbah industri. Prekursor bisa berasal dari bahan yang mengandung senyawa alumina dan silika yang tinggi. Jenis prekursor yang digunakan untuk penelitian ini adalah tanah batu apung dari Desa Tejakula Kabupaten Buleleng. Bahan lain yang bisa dijadikan prekursor adalah fly ash, abu cangkang telur, lumpur merah, yang mengandung silika (Si), alumina (Al), dan oksigen (O2) (Anastasia, 2020).

2.3 Alkali Aktivator

Alkalin aktivator dibutuhkan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. Alkali mengaktifkan prekursor dengan mendisolusikan mereka ke dalam monomer (SiO_4) dan (AlO_4). Selama proses curing, monomer–monomer tadi terkondensasi dan membentuk jaringan polimer tiga dimensi yang memberikatan silang (Putra et al., 2014). Kombinasi cairan sodium silikat (Na_2SiO_3) dan sodium hidroksida (NaOH) digunakan untuk membantu terjadinya reaksi kimia dengan alumunina dan silika yang terdapat pada tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng. Sodium hidroksida yang digunakan sebagai alkalin aktivator, berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Alumina dan Silika yang terkandung dalam tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng sehingga dapat menghasilkan suatu ikatan polimer yang kuat, sedangkan sodium silikat berfungsi untuk mempercepat proses polimerisasi (Putra et al., 2015)

2.3.1 Natrium Hidroksida

Natriutm Hidroksida (NaOH) adalah oksidasi alkali yang reaktif dan bahan basa kuat. Natrium Hidroksida dihasilkan melalui larutan NaCl. Na (Natrium) merupakan logam alkali pada golongan 1 (satu) pada tabel periodik. Natrium Hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur Al dan Si yang terkandung dalam prekursor sehingga menghasilkan ikatan polimerasasi yang kuat. Natrium Hidroksida (NaOH) juga dikenal sebagai soda kaustik yang kuat apabila dilarutkan didalam air. Natrium Hidroksida murni memiliki tekstur padat dan putih. NaOH dapat larut dalam air dan melepaskan panas ketika dilarutkan. NaOH berfungsi untuk mereaksikan unsur Al dan Si yang terkandung dalam prekursor sehingga dapat menghasilkan ikatan polimerisasi yang kuat. Natrium Hidroksida sebagai aktivator akan dilarutkan ke air dengan menentukan molaritas larutan. Molaritas adalah satuan untuk mengukur konsentrasi larutan. Molaritas NaOH dapat ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Molaritas} = \frac{\text{Jumlah mol zat terlarut}}{\text{1 liter larutan}} = \frac{Berat\ NaOH}{40\ (Ar\ dari\ NaOH)} \text{ x } \frac{\text{1 liter}}{\text{volme air (liter)}} \quad (2.1)$$

2.3.2 Natrium Silikat

Natrium silikat (Na_2SiO_3) adalah padatan kaca atau kristal yang tidak berwarna, atau bubuk putih. Natrium silikat terbentuk dalam 2 bentuk yaitu padatan dan larutan. Natrium silikat lebih banyak digunakan dalam campuran perekat dan mortar dengan bentuk larutan. Pada awalnya Natrium Silikat sering digunakan dalam pembuatan bahan dasar sabun, namun dalam perkembangannya natrium silikat dapat digunakan dalam campuran semen, pengikat keramik, campuran cat serta dalam keperluan tekstil. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa natrium silikat dapat digunakan dalam campuran beton. Dalam penelitian ini, natrium silikat digunakan sebagai aktivator alkali dalam campuran perekat geopolimer. Natrium silikat merupakan salah satu larutan alkali yang berperan penting dalam proses polimerisasi. Hal tersebut dikarenkan natrium silikat dapat mempercepat reaksi polimerisasi. Reaksi yang terjadi secara cepat ketika larutan silikat dan hidroksida dilarutkan bersamaan.

2.4 Tanah Batu Apung

Pada penelitian ini menggunakan tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng. Pada desa tersebut menggunakan tanah batu apung sebagai bahan dasar membuat ornamen arsitektur Bali seperti dan pelinggih oleh pengerajin dari daerah tersebut. Spesi tanah batu apung menggunakan campuran 1 semen portland : 3 tanah batu apung.



Gambar 1. Area Tambang Tanah Batu Apung Di Desa Bungkulan,



Gambar 2. Tanah Batu Apung Dari Desa Bungkulan, Kemudian Diayak



Gambar 3. Semen Dicampur Tanah Batu Apung (Campuran 1:3), Dicetak dan Diukir



Gambar 4. *Finishing* ATB (Candi Bentar) Dengan Bahan Dasar Tanah Batu Apung Dari Desa Bungkulan Di Pura Penyusuan Penegil Dharma Buleleng

2.5 Berat Volume

Berat volume adalah perbandingan antara berat terhadap volumenya. Berat volume dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$\gamma c = W/V$ (2.2)

dimana :

γc = Berat volume spesi [gr/mm3]
W = berat [gr]
V = Volume [mm3]

2.6 Kuat Tekan

Kuat tekan adalah kemampuan spesi dalam bentuk benda uji untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Kuat tekan mengidentifikasikan mutu dari spesi tersebut. Semakin tinggi kekuatan tekannya, semakin tinggi pula mutu spesi yang dihasilkan. Nilai kuat tekan spesi didapat dari pengujian standar dengan benda uji yang lazim digunakan berbentuk silinder atau kubus. Tata cara pengujian yang umumnya dipakai adalah standar ASTM C39-86. Kuat tekan masing-masing benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tinggi (P) yang dicapai benda uji umur 28 hari akibat beban tekan selama percobaan (Dipohusodo, 1996).

Sifat yang diperhitungkan pada spesi sebagai elemen bangunan adalah kuat tekannya. Untuk mengetahui kuat tekan diperlukan pengujian pada laboraturium dengan membuat benda uji kubus atau silinder. Perosedur pembuatan benda uji harus memenuhi persyaratan pada (Badan Standarisasi Nasional, 2000) dan prosedur mengenai pengujian kuat tekan menurut (SNI 03-1974-1990, 1990). Adapun perhitungan kuat tekan spesi dapat dihitung melalui persamaan.

$f'ci = P/A$ (2.3)

dimana :

$f'ci$ = Kuat tekan spesi [MPa]
P = Beban runtuh yang diterima oleh benda uji [N]
A = Luas bidang tekan [mm2]

2.7 Kuat Tarik Belah

Benda uji yang digunakan adalah benda uji silinder, dikerjakan secara merata dalam arah diameter disepanjang benda uji. Benda uji akan terbelah dua pada saat tercapainya kekuatan tarik belah. Kekuatan tarik belah dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$f'sp = 2P/\pi LD$ (2.4)

dimana :

$f'sp$ = Kuat tarik belah spesi [MPa]
P = Beban maksimum pada saat benda uji terbelah [N]
L = Panjang benda uji [mm]
D = Diameter benda uji [mm]
π = Phi (22/7)

2.8 Rancangan Penelitian

Penelitan ini dilakukan dengan melakukan eksperimen membuat spesi campuran semen pozoland dan tanah batu

apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng (SP-1 dengan campuran 1 semen pozoland : 3 tanah batu apung) serta geopolimer dengan material tanah batu apung dari Desa Bungkulan Kecamatan Tejakula Kabupaten Buleleng sebagai prekursor dengan aktivator alkali Na_2SiO_3 dan NaOH. Terdapat beberapa variasi yang dibuat dengan persentase masing-masing tanah batu apung dengan aktivator yaitu 75%:25% (SP-2), dan 80%:20% (SP-3). Aktivator alkali yang digunakan yaitu Na_2SiO_3 dan NaOH dengan perbandingan 2 : 1 (NS/NH), dengan larutan NaOH menggunakan konsentrasi molaritas sebesar 12 M. Benda uji dibuat dalam bentuk kubus ukuran 50x50x50 mm untuk pengujian kuat tekan dan berat volume pada umur 7 hari, 14 hari, 21 hari dan 28 hari. Benda uji silinder 75 mm x 150 mm untuk uji kuat tarik pada umur 28 hari. Untuk mempercepat proses pengeringan benda uji geopolimer (SP-2 dan SP-3), sehari setelah mencetak benda uji, semua benda uji di oven pada temperatur 90oC selama tiga kali dua puluh empat jam.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Berat Volume

Berat volume dihasilkan dari menimbang berat kubus 50 x 50 x 50 mm pada umur 7, 14, 21 dan 28 hari. Menimbang berat kubus seperti Gambar 5 dan hasilnya seperti Tabel 1.



Gambar 5, Menimbang Berat Kubus 50 x 50 x 50 mm

Tabel 1, Berat Volume Rata-rata Benda Uji Kubus 50 x 50 x 50 (kg/m3)

No. Urut	Hari	SP-1	SP-2	SP-3
1	7	1663,7	1784,8	1904,8
2	14	1657,9	1724,8	1825,1
3	21	1620,5	1668.8	1825,4
4	28	1608,3	1645.9	1825,5

Berat volume menurun sesuai bertambahnya umur benda uji. Pada umur 21 hari dan seterusnya sampai pada umur 28 hari berat volume hampir sama. Pada umur 28 hari berat volume benda uji berkisar 1608,3 kg/m3 sampai dengan 1825,5 kg/m3. Berat volume spesi (SP-1) 1 semen portland : 3 tanah batu apung tidak berbeda jauh dengan berat volume geopolimer khususnya spesi SP-2.

3.2 Kuat Tekan

Kuat tekan dihasilkan dari pengujian tekan kubus berukuran 50 x 50 x 50 mm pada umur 7 hari, 14 hari, 21 hari dan 28 hari, seperti pada Gambar 6. Hasil kuat tekan seperti pada Tabel 2.



Gambar 6 Uji Tekan Kubus 50 x 50 x 50 mm

Tabel 2. Hasil Uji Tekan Rata-rata Kubus 50 x 50 x 50 mm

No. Urur	Umur/hari	SP-1/MPa	SP-2/MPa	SP-3/MPa
1	7	6,33	5,47	8,67
2	14	9,33	8,93	13,27
3	21	9,87	9,33	14,67
4	28	9,93	9,53	14,87

2.1 Kuat Tarik Belah

Benda uji untuk mengukur kuat tarik belah adalah silinder dengan ukuran diameter 75 mm dan tinggi 150 mm. Silinder diuji pada umur 28 hari seperti Gambar 7, dan hasilnya seperti Tabel 3.



Gambar 7, Uji Kuat Tarik Belah Silinder 75 x 150 mm

Tabel 3, Hasil Uji Kuat Tarik Belah Rata-rata Silinder 75 x 150 mm (MPa)

No. Urut Benda Uji	SP-1	SP-2	SP-3

1	18	22	19
2	17	21	16
3	25	24	26
Rata-rata	1,42	1,36	1,47

Kuat tarik belah untuk benda uji SP-1 sebesar 1,42 MPa dan 1,36 MPa untuk geopolimer (SP-2) serta 1,47 MPa untuk geopolimer (SP-3). Besaran ini berkisaran 10% sampai dengan 14% terhadap kuat tekan, dan ini cukup baik karena berada diatas 10%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh empat simpulan utama. Pertama, berat volume pada umur 28 hari menunjukkan bahwa SP-1 (1 semen portland : 3 tanah batu apung) memiliki berat sebesar 1608,3 kg/m3, sementara spesi geopolimer SP-2 mencapai 1645,9 kg/m3 dan SP-3 sebesar 1825,5 kg/m3. Kedua, kuat tekan pada umur 28 hari mencatat nilai 9,93 MPa untuk SP-1, 9,53 MPa untuk SP-2, dan 14,87 MPa untuk SP-3. Ketiga, kuat tarik belah pada umur 28 hari menunjukkan hasil sebesar 1,42 MPa untuk SP-1, 1,36 MPa untuk SP-2, dan 1,47 MPa untuk SP-3. Keempat, spesi geopolimer dinilai memenuhi syarat untuk menggantikan spesi dengan perekat semen portland, baik dari segi berat volume, kuat tekan, maupun kuat tarik belah.

DAFTAR PUSTAKA

Anastasia, K. (2020). Peningkatan Kuat Tekan Beton Geopolimer Dengan Menggunakan Variasi Abu Cangkang Telur Bebek Melalui Proses Pengovenan. *Jurnal Teknik Sipil, Vol 15 No. 1*, 23–29.

Astariani, N. K., Salain, I. M. A. K., Sutarja, I. N., & Widiarsa, I. B. R. (2021). Mechanical properties and microstructure of geopolymer binder based on umeanyar slatestone powder. *Civil Engineering and Architecture*, *9*(6), 1698– 1716.

Badan Standarisasi Nasional. (2000). *SNI 03-6429-2000*.

Badan Standarisasi Nasional. (2002). *Standar Nasional Indonesia Badan Standardisasi Nasional Metode pengujian kekuatan tekan mortar semen portland untuk pekerjaan sipil*.

Davidovits, J. (2015). *Geopolymer : chemistry and applications* (J. Davidovits, Ed.; 5th Edition).

Firdaus. (2019). Waktu Ikat Mortar " Semen " Geopolymer Berbasis Fly Ash Dan Kapur. *Jurnal Tekno, Vol. 16*, 279–291.

Hermawan, F. (2019). Pengaruh Ratio Perbandingan Sh/Ss Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolymer Kering Dengan Perbandingan Fly Ash/Aktivator 3,5:1. *Jurnal Teknik Sipil*.

Kusuma, A., Steenie, P., Wallah, E., & Dapas, S. O. (2014). Kuat Tarik Belah Beton Geopolymer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, *2*(7), 330– 336.

Mustakim, Y. (2019). Sintesis Dan Karakterisasi Geopolimer Berbahan Dasar Kaolin Capkala Dengan Variasi Rasio Mol Sio2/Al2o. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, *Pure App. Chem. 2(2)*, 84–94.

Osio-Norgaard, J., Gevaudan, J. P., & Srubar, W. V. (2018). A review of chloride transport in alkali-activated cement paste, mortar, and concrete. In *Construction and Building Materials* (Vol. 186, pp. 191–206).

Pranajaya I.K., I Gusti Lanang Bagus Eratodi, (2022), Kreatifitas Ornamen Arsitektur Tradisional Bali Dari Batu Padas Artifisial, Jurnal Patra | ISSN 2684-947X | E-SSN 2684 9461 Vol.4 No.1-Mei 2022|jurnal.idbbali.ac.id/index.php/patra, Publishing: LPPM Institut Desain dan Bisnis Bali

Rustendi, I., Poerwodihardjo, E., & Hudoyo, C. P. (2020). Utilization of iron sand waste and bottom ash as alternate concrete-making materials. *Civil Engineering and Architecture*, *8*(4), 549–556.

Sahana R. (2007). Proceedings of International Conference on Energy and Environment-2013 (ICEE 2013) On 12 th to 14 th December Organized by SETTING TIME, COMPRESSIVE STRENGTH AND MICROSTRUCTURE OF GEOPOLYMER PASTE. In *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology An ISO* (Vol. 3297, Issue 1).

Shasa, (2011), Mengenal Keunikan Arsitektur Rumah Adat Bali, http://www.wacana.co/2011/01/arsitektur-tradisional-bali/

Widnyana, I. N. S., Salain, I. M. A. K., Sutarja, I. N., & Widiarsa, I. B. R. (2022). Setting time of coconut fiber ash-based geopolymer binder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1117*(1)

ANALISIS KETAHANAN *WASHOUT* DAN KUAT TEKAN PADA *UNDERWATER CONCRETE* DENGAN BAHAN TAMBAH *SILICA FUME* DAN LIMBAH *STEEL SLAG* SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN AGREGAT KASAR

Mochamad Solikin[1], Aurelia Hanuun Lintang Mahaputri[2], Yenny Nurchasanah[3], dan Suhendro Trinugroho[4]

[1-4] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Surakarta
e-mail: msolikin@ums.ac.id, d100200099@student.ums.ac.id, yenny.nurchasanah@ums.ac.id , *dan* suhendro.trinugroho@ums.ac.id

Abstrak

Permasalahan yang muncul pada pengecoran struktur beton di bawah air adalah terjadinya kehilangan massa beton akibat aliran air (*washout*), sehingga kekuatan beton menurun. Hal ini terjadi karena beton segar tidak mampu menahan *washout* yang disebabkan oleh air saat proses pengecoran berlangsung. *Underwater Concrete* (UWC) adalah beton yang dirancang khusus untuk bangunan struktur di bawah air. UWC yang akan diaplikasikan di bawah air harus memiliki sifat daya alir tinggi (*high-flowable*) dan ketahanan terhadap air (*washout*). Untuk mengurangi masalah *washout* dan meningkatkan kuat tekan beton maka perlu menggunakan bahan tambah *Anti Washout Agent*, inovasi material dengan penambahan *silica fume* dan substitusi agregat kasar dengan *steel slag.* Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen perencanaan campuran metode ACI dengan f_c' rencana 45 MPa. Substitusi penggunaan *steel slag* 20% dan 25%, penambahan *silica fume* 10% dan *Anti Washout Agent* 1%. Untuk meyakinkan bahwa UWC tidak mengalami *washout* dapat ditinjau dari pengujian pH *Test, Stream Test* dan *Plunge Test.* Pengujian Kuat Tekan Beton menggunakan sampel silinder beton 150 mm x 300 mm berumur 28 hari yang diaplikasikan di darat dan di dalam air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *steel slag* dan *silica fume* untuk UWC tidak menurunkan performa UWC dan tidak terjadi kehilangan massa beton akibat aliran air (*washout*). Pada pengujian pH *test* memenuhi standar, pengujian *Stream Test* dan *Plunge Test* tidak mengalami kehilangan massa beton akibat aliran (*washout*). Penelitian ini mendapatkan hasil kuat tekan optimum pada sampel UWC-SF-SS20% sebesar 47.5 MPa. Dapat disimpulkan bahwa penggunaan limbah *steel slag* pada *underwater concrete* tahan terhadap pengujian ketahanan terhadap aliran air (*washout*) dan dapat menjadi opsi substitusi agregat kasar dengan *steel slag*.

Kata kunci : *underwater concrete, washout, steel slag, silica fume*, kuat tekan.

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah Negara maritim dengan jumlah wilayah perairan yang lebih luas dibandingkan dengan daratannya. Pembangunan dalam bidang konstruksi di Indonesia mengalami kemajuan yang sangat pesat. Pada saat ini pembangunan tidak hanya dilakukan di darat saja melainkan pembangunan di lakukan di dalam perairan juga. Salah satu bagian terpenting dalam suatu bangunan yaitu struktur yang berasal dari beton. Beton segar menjadi pilihan yang tepat untuk digunakan di bawah air yang biasa disebut dengan *Underwater Concrete* (UWC), akan tetapi permasalahan yang muncul pada pengecoran struktur beton di bawah air adalah terjadinya kehilangan massa beton akibat aliran air (*washout*), sehingga kekuatan beton menurun. Hal ini terjadi karena beton segar tidak mampu menahan *washout* yang disebabkan oleh air saat proses pengecoran berlangsung.

Untuk meyakinkan bahwa UWC tidak mengalami *washout* dapat ditinjau dari beberapa pengujian untuk mengetahui sifat kemampuan pengecoran dibawah air, yang berguna untuk mengetahui ketahanan beton dari pencucian aliran air (*washout*) dan untuk mengetahui massa beton segar yang masih tersisa pada saat pengecoran. Pengujian *washout* meliputi: *pH test, Stream test* dan *Plunge test* Lu Hao. dkk, (2022). Pengujian kuat tekan beton juga diperlukan untuk mengetahui kuat tekan beton yang sudah direncanakan. Untuk mengatasi kendala yang dialami saat pengecoran dengan mendapatkan beton yang kuat, maka *underwater concrete* harus menggunakan beton mutu tinggi Korua. dkk, (2019)dan sifat ketahanan terhadap aliran air agar tidak terjadi *washout.*

Menurut Pedoman Konstruksi dan Bangunan PD T-04-2004-C beton mutu tinggi didefinisikan sebagai beton yang memiliki kuat tekan sebesar 40-80 MPa. *Underwater concrete* (UWC) harus memiliki sifat ketahanan yang tinggi terhadap korosi air, kemampuan *self leveling* untuk mengalir ke konstruksi tanpa perlu digetarkan, ketahanan segregasi dan *bleeding* untuk menjamin homogenitas beton, dan waktu pengaturan yang dapat disesuaikan untuk memastikan transportasi dan pengecoran beton. Oleh karena itu, kemampuan daya alir tinggi (*high-flowable*) dan waktu pengaturan *underwater concrete* memerlukan penambahan bahan untuk memenuhi kebutuhan kebutuhan konstruksi. Khayat, (1995), Cui. dkk, (2017).

Penambahan yang digunakan untuk *underwater concrete* adalah *superplasticizer* dan *Anti Washout Agent* (AWA). AWA adalah bahan tambah (*admixture*) untuk beton bawah air yang berfungsi untuk mengurangi terjadinya *washout,*

segregasi, *bleeding* dan peningkatan ketahanan terhadap air pada *underwater concrete* Lu Hao. dkk, (2022). Dengan proporsi campuran yang tepat, beton dapat diaplikasikan di bawah air. Nasr. dkk, (2021).

Penambahan AWA pada beton bawah air perlu ditingkatkan lagi efisiensi dari segi kualitas dan material penyusun, maka digunakan bahan tambah pada semen dengan *silica fume*. Menurut Ganesh Kumar. dkk, (2022) *silica fume* merupakan bahan pozzolan yang mempunyai karakteristik butiran yang sangat halus, *silica fume* ini adalah bahan tambahan yang digunakan ketika memproduksi campuran semen untuk meningkatkan umur beton jangka panjang dan daya tahan komposit. Dimasukkannya *silica fume* ke campuran adukan beton dapat mengurangi *washout* beton. Dalam penelitian tersebut menyatakan bahwa penambahan *silica fume* berdampak positif terhadap keawetan beton. Penggunaan sinergis dari bahan ini memungkinkan tercapainya kemampuan kerja yang lebih baik dan meningkatkan sifat pengerasan beton. Oleh karena itu, dimasukkannya *silica fume* ke dalam campuran beton bawah air dapat mengurangi panas hidrasi semen dan mengurangi penyusutan beton, sehingga menghasilkan daya tahan yang lebih besar Ganesh Kumar. dkk, (2022).

Selain penambahan *silica fume* untuk semen, penggantian agregat kasar menggunakan *steel slag* dapat meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan dengan kerikil Iswardoyo, (2016). Limbah terak baja (*steel slag*) merupakan salah satu hasil sisa dari peleburan besi atau baja. Menurut data tahunan yang dikeluarkan oleh *World Steel Association* menunjukkan bahwa produksi baja mentah global pada tahun 2022 adalah 1878.5 juta ton, perkiraan konservatif emisi *steel slag* melebihi 225 juta ton. Limbah *steel slag* yang tidak dimanfaatkan dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang parah. *Steel slag* dapat bermanfaat untuk mendorong hubungan pembangunan berkelanjutan antara industri beton dan baja. Memanfaatkan terak baja yang telah diolah sebagai agregat kasar dalam produksi beton merupakan solusi yang bernilai tinggi sehingga dapat mengurangi kekhawatiran akan menipisnya sumber daya dan mengatasi dampak negatif penimbunan *steel slag* di tempat pembuangan Ren dan Li, (2023). Menurut Hanif, (2012) *Steel slag* memiliki sifat yang baik untuk penggunaan agregat, ketahanan abrasi yang bagus, dan kekuatan dukung yang tinggi.

Di Indonesia belum banyak artikel dan jurnal yang membahas tentang *Underwater Concrete*, maka penelitian yang akan dilakukan adalah menganalisis ketahanan *washout* dan kuat tekan *underwater concrete* yang diaplikasikan di darat dan di air. Untuk meningkatkan kuat tekan dan ketahanan *washout* pada *underwater concrete* digunakan penambahan *silica fume* 10% dan penggantian agregat kasar menggunakan *steel slag* 20% dan 25% di Laboratorium Bahan Bangunan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta. Presentasi pemakaian *silica fume* dan penggantian agregat kasar diatur sesuai dengan rancangan yang sudah dibuat. Perencanaan campuran untuk beton bawah air menggunakan pedoman dari *American Concrete Institute* (ACI).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan guna untuk mengembangkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yaitu pembuatan *underwater concrete*, dengan mengembangkan penelitian sebelumnya, penelitian ini digunakan kadar dengan substitusi yang lebih tinggi yaitu dengan menggunakan kadar penambahan *silica fume* sebesar 10% dari total berat semen yang digunakan dan penggantian agregat kasar dengan limbah *steel slag* substitusi 20% dan 25%. Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta.

Penelitian dilakukan dalam tujuh tahap: studi literatur, persiapan alat dan bahan, perencanaan campuran, pengujian beton segar dan membuat benda uji, menguji benda uji, melakukan analisis dan kesimpulan hasil dari penelitian. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas agregat kasar, agregat halus dan semen OPC didapatkan dari PT. Adhi Persada Beton, *Anti Washout Agent* dan *Superplasticizer* PT. Sika Indonesia, *Silica Fume* PT. CONSOL Indonesia, *Steel Slag* CV. Andhy Karya Pengecoran Logam Klaten. Semua bahan telah diuji mutunya sehingga memenuhi persyaratan dan dapat dipastikan bahwa bahan tersebut dapat digunakan untuk penelitian sebagai bahan campuran beton.

Perencanaan campuran menggunakan metode *American Concrete Institute* (ACI) dengan f_c' rencana 45 MPa. Setelah perencanaan campuran dibuat selanjutnya melakukan pengujian *slump flow test*, pengujian ketahanan *washout* pada *underwater concrete* dengan pengujian pH *test, Stream Test, Plunge Test* menggunakan alat sesuai dengan standar pengujian dan pengujian kuat tekan beton dengan sampel yang diaplikasikan di darat dan di dalam air menggunakan silinder beton ukuran 150 mm x 300 mm pada beton 28 hari.

Tabel 1. Hasil Perencanaan Campuran Benda Uji (*Mix Design*)

Sampel	AWA	SP	*Silica Fume*	*Steel Slag*	Semen	Air	Agg. Halus	Agg. Kasar
	kg/m^3	l/m^3	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	l/m^3	kg/m^3	kg/m^3
UWC	6.67	23.3	0	0	600	210	1019.29	542.038
UWC-SF-SS20%	6.67	23.3	66.67	101.2	600	210	1019.29	433.63
UWC-SF-SS25%	6.67	23.3	66.67	125.2	600	210	1019.29	406.528

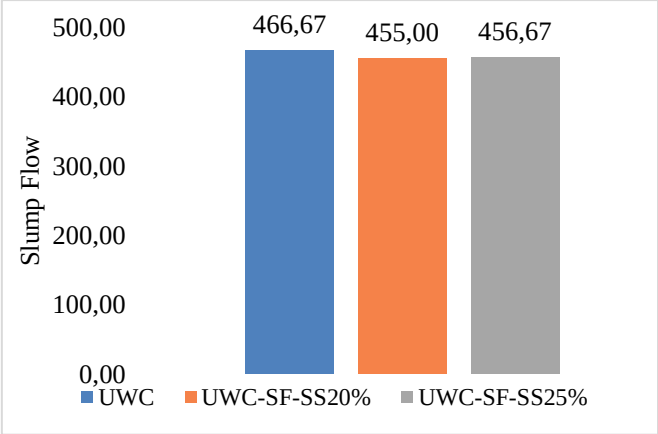
3. HASIL PEMBAHASAN

a. Pengujian *Slump Flow*

Pengujian *Slump Flow* bertujuan untuk memantau *workability*, mengetahui lebar diameter *slump flow* dari campuran adukan beton segar sebelum melakukan pengujian ketahanan terhadap air (*washout*) dan beton segar dimasukkan ke dalam bekisting. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan kerucut *Abram's* yang dibalik kemudian beton segar dimasukkan ke dalam kerucut dan dituangkan di atas plat datar untuk melakukan pengujian *slump flow test*. Pengujian dilakukan sesuai dengan prosedur dari EFNARC. Berikut adalah hasil pengujian *slump flow test* yang dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 1.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Slump Flow Test*

No	Sampel	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	Rata-rata (mm)
1	UWC	450	470	480	466.67
2	UWC-SF-SS20%	450	465	450	455.00
3	UWC-SF-SS25%	450	460	460	456.67



Gambar 1. Hasil Pengujian *Slump Flow Test*

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 1 mendapatkan nilai rata-rata pengujian *slump flow test* pada UWC sebesar 466.67 mm, UWC-SF-SS20% sebesar 455 mm, UWC-SF-SS25% sebesar 456.67 mm. Menurut JSCE syarat yang ditetapkan untuk pengujian *slump flow underwater concrete* sebesar 400-500 mm untuk *underwater concrete* yang ditempatkan ke dalam bentuk sederhana, setelah mendapatkan data hasil pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan semua rata-rata sampel pengujian *slump flow* telah memenuhi persyaratan JSCE.

Penggunaan *Steel Slag* dengan kadar yang lebih banyak dapat meningkatkan nilai *slump flow*, menurut Heniegal dkk, (2015) nilai *slump flow* bertambah besar jika penggunaan *steel slag* bertambah. Hal ini juga selaras dengan penelitian yang dilakukan Handayani dkk, (2023) bahwa substitusi *steel slag* 20% menghasilkan nilai *slump flow* lebih besar dibandingkan *slump flow* tanpa penambahan *steel slag*, hal ini dikarenakan sifat *steel slag* yang mempunyai nilai penyerapan yang lebih kecil dibandingkan dengan penyerapan agregat kasar sehingga dapat mengurangi jumlah air yang masuk ke pori-pori limbah *steel slag*.

Penambahan *silica fume* sebanyak 10% dapat menurunkan nilai *slump flow* pada *underwater concrete*. Menurut Solikin. dkk, (2024) nilai *slump flow* menurun seiring bertambahnya kadar *silica fume*. Kadar *silica fume* yang digunakan sebesar 8% dan 10% dengan mendapatkan hasil *slump flow* terendah di variasi 10%, hal ini dapat terjadi karena partikel *silica fume* sangat halus sehingga memerlukan lebih banyak air yang digunakan untuk membasahi permukaan partikel *silica fume*.

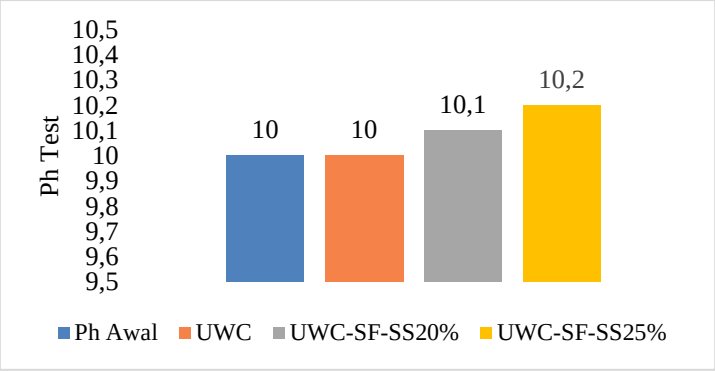
Berdasarkan uraian diatas dapat disimpulkan bahwa penggunaan *steel slag* dapat meningkatkan *slump flow* dan *silica fume* mampu menurunkan nilai *slump flow*. Hal ini selaras dengan pengujian yang telah dilakukan bahwa UWC kontrol memiliki nilai *slump flow* yang paling tinggi sebesar 466.67 mm dibandingkan dengan UWC-SF-SS20 sebesar 455 mm, UWC-SF-SS25% sebesar 456.67 mm karena tidak terdapat kandungan *silica fume* di dalamnya. Penambahan *silica fume* mampu menahan pertambahan *slump flow* walaupun sudah ditambah *steel slag*.

b. Pengujian pH *Test*

Pengujian pH *Test* bertujuan untuk mengetahui kadar pH di dalam air sebelum dan sesudah dimasukkan beton segar *underwater concrete* kedalam air bersih. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat pH *test* dan gelas *breaker*. Berikut adalah hasil pengujian pH *test* yang dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Tabel 3. Hasil Pengujian *pH Test*

No	Sampel	Nilai Ph Test
1.	pH Awal	10.0
2.	UWC	10.0
3.	UWC-SF-SS20%	10.1
4.	UWC-SF-SS25%	10.2



Gambar 2. Hasil Pengujian *pH Test*

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 2 mendapatkan nilai pengujian pH *Test* air di Laboratorium Bahan Bangunan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta sebesar 10.0, pH *Test* UWC sebesar 10.0, pH *Test* UWC-SF-SS20% sebesar 10.1 dan pH *Test* UWC-SF-SS25% sebesar 10.2. Menurut Lu Hao. dkk, (2022) standar nilai Ph Test yang memenuhi syarat pengujian kurang dari 12. Dapat diambil kesimpulan bahwa semua jenis sampel memenuhi standar.

Penggantian sebagian agregat kasar *steel slag* pada *underwater concrete* tidak terlalu mempengaruhi nilai pH air, dapat dilihat pada Tabel 3 hasil pengujian pH *test* terjadi peningkatan kadar pH walaupun hanya sedikit. Menurut Heniegal. dkk, (2015) semakin bertambahnya persentase *steel slag* maka pH yang dihasilkan akan semakin bertambah begitupun sebaliknya. Upaya yang dilakukan untuk menurunkan nilai pH yaitu dengan menambahkan *silica fume*. Menurut Heniegal. dkk, (2016) menggunakan *silica fume* dapat membantu menurunkan nilai pH, hal ini disebabkan sifat *silica fume* yang mengandung partikel sangat halus dan dapat mengisi rongga-rongga sehingga dapat menurunkan nilai pH. Namun hal ini belum tercapai di pengujian pH *test* karena hasil pengujian menunjukkan peningkatan nilai pH.

c. Pengujian *Stream Test*

Pengujian *Stream Test* bertujuan untuk mengetahui nilai kehilangan massa *underwater concrete* ketika dialiri air dan mengetahui ketahanan *underwater concrete* dari *washout.* Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan talang air yang tengahnya sudah diberi *underwater concrete* beton segar kemudian dialiri dengan air. Berikut adalah hasil pengujian *Stream Test* yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Stream Test*

No	Sampel	Berat Awal	Berat Akhir	WOL (%)
1	UWC	2000	2000	0.00
2	UWC-SF-SS20%	2000	2000	0.00
3	UWC-SF-SS25%	2000	2000	0.00

Berdasarkan Tabel 4 didapatkan nilai kehilangan massa (WOL) sampel pengujian *Stream Test* untuk UWC sebesar 0%, UWC-SF-SS20% sebesar 0%, UWC-SF-SS25% sebesar 0%. Menurut Lu Hao. dkk, (2022) standar nilai *Stream Test* yang memenuhi saat kehilangan massa kurang dari 1.5%. Dapat diambil kesimpulan bahwa semua jenis sampel memenuhi standar.

Substitusi agregat kasar *steel slag* sebesar 20% dan 25% pada *underwater concrete* tidak mempengaruhi pengujian *stream test*, dapat dilihat pada Tabel 4 hasil pengujian *stream test* massa *underwater concrete* tidak terjadi kehilangan massa pada *underwater concrete* sehingga tidak ada perbedaan nilai dari *underwater concrete* kontrol dan *underwater concrete* substitusi agregat kasar dengan *steel slag*. Hal tersebut bisa terjadi karena karena sifat *steel slag* hampir mirip seperti agregat kasar, sehingga penggantian sebagian agregat kasar dengan *steel slag* dapat tercampur dalam adukan beton dan menghasilkan ketahanan *underwater concrete* sesuai standar. Penggunaan *silica fume* tidak mempengaruhi hasil pada pengujian *Stream Test* karena tidak terjadi kehilangan massa pada *underwater concrete* yang ditambahkan *silica fume.*

d. Pengujian *Plunge Test*

Pengujian *Plunge Test* bertujuan untuk mengetahui nilai kehilangan massa underwater concrete ketika dialiri air dan mengetahui ketahanan *underwater concrete* dari *washout.* Pengujian ini dilakukan dengan cara *underwater concrete* beton segar dimasukkan kedalam keranjang dan dicelupkan kedalam pipa yang telah diisi air. Berikut adalah hasil pengujian *Stream Test* yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian *Plunge Test*

No	Sampel	Berat Awal	Berat Akhir	D (%)
1	UWC	2000	2000	0.00
2	UWC-SF-SS20%	2000	2000	0.00
3	UWC-SF-SS25%	2000	2000	0.00

Berdasarkan Tabel 5 didapatkan nilai kehilangan massa (D) sampel pengujian *Plunge Test* untuk UWC sebesar 0%, UWC-SF-SS20% sebesar 0%, UWC-SF-SS25% sebesar 0%. Menurut Lu Hao. dkk, (2022) standar nilai *Stream Test* yang memenuhi saat kehilangan massa kurang dari 1.5%. Dapat diambil kesimpulan bahwa semua jenis sampel memenuhi standart.

Substitusi agregat kasar *steel slag* pada *underwater concrete* tidak mempengaruhi pengujian *plunge test*, dapat dilihat pada Tabel 5 hasil pengujian *plunge test* massa *underwater concrete* tidak ada yang terurai dan tidak terjadi kehilangan massa pada *underwater concrete* sehingga tidak ada perbedaan nilai dari *underwater concrete* kontrol dan *underwater concrete* substitusi agregat kasar dengan *steel slag*, hal tersebut bisa terjadi karena sifat *steel slag* hampir sama seperti agregat kasar, sehingga substitusi agregat kasar dengan *steel slag* dapat tercampur dalam adukan beton dan menghasilkan ketahanan *underwater concrete* sesuai standar. Penggunaan *silica fume* tidak mempengaruhi hasil pada pengujian *Stream Test* karena tidak terjadi kehilangan massa pada *underwater concrete* yang ditambahkan *silica fume.*

e. Pengujian Kuat Tekan

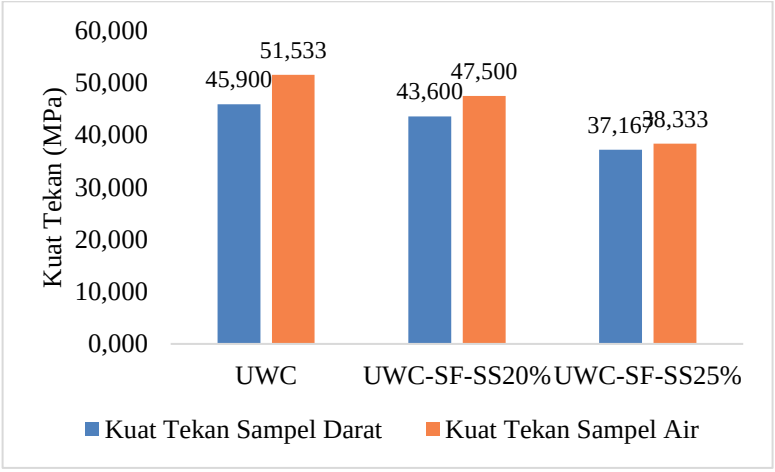
Pengujian kuat tekan beton bertujuan untuk mengetahui kekuatan beton sesuai dengan kebutuhan struktur bangunan yang direncanakan. Kuat tekan yang direncanakan sebesar 45 MPa pada umur 28 hari dengan mengaplikasikan beton di darat dengan pengaplikasian beton pada umumnya dan pengaplikasian di dalam air atau *Underwater* dengan memasukkan beton ke dalam bekisting yang telah diletakkan di dalam air. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berukuran 150 mm x 300 mm. Pengujian kuat tekan beton dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta, pengujian dilakukan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM). Berikut adalah hasil pengujian kuat tekan beton yang dapat dilihat pada Tabel 6, Tabel 7 dan Gambar 3.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel Darat

No	Sampel	Kuat Tekan Sampel Darat (MPa)			
		1	2	3	Rata-Rata
1	UWC	45.3	44.1	48.3	45.90
2	UWC-SF-SS20%	46	40.1	44.7	43.60
3	UWC-SF-SS25%	33.8	33.9	43.8	37.17

Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Tekan Sampel Air

No	Sampel	Kuat Tekan Sampel Air (MPa)			
		1	2	3	Rata-Rata
1	UWC	55.8	47.5	51.3	51.53
2	UWC-SF-SS20%	50.4	50.3	41.8	47.50
3	UWC-SF-SS25%	35.9	36.8	42.3	38.33



Gambar 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan Tabel 6, Tabel 7 dan Gambar 3 mendapatkan nilai kuat tekan rata-rata *underwater concrete* yang diaplikasikan di darat pada sampel UWC sebesar 45.90 MPa, UWC-SF-SS20% sebesar 43.60 MPa, UWC-SF-SS25% sebesar 37.167 MPa dan *underwater concrete* yang diaplikasikan di air pada sampel UWC sebesar 51.53 MPa, UWC-SF-SS20% sebesar 47.50 MPa, UWC-SF-SS25% sebesar 38.33 MPa.

Kuat tekan beton yang diaplikasikan di darat dan di dalam air menurun seiring dengan penambahan substitusi limbah *steel slag*. Hal ini dikarenakan nilai keausan limbah *steel slag* lebih tinggi dibandingkan dengan dengan nilai keausan agregat kasar. Upaya yang dilakukan untuk mencegah penurunan kuat tekan yaitu dengan menambahkan *silica fume* 10% seperti yang dilakukan pada penelitian Shang. dkk, (2021). Namun hal ini belum tercapai di pengujian kuat tekan karena hasil pengujian kuat tekan di dalam air tetap menurun yang awalnya 51.53 MPa menjadi 47.5 MPa dan 38.33 Mpa.

Kuat tekan beton dari sampel yang diaplikasikan di dalam air menghasilkan nilai kuat tekan beton yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kuat tekan beton yang diaplikasikan di darat. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Heniegal. dkk, (2018) Heniegal. dkk, (2016) Heniegal. dkk, (2015) dimana nilai kuat tekan yang diaplikasikan di dalam air mendapatkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kuat tekan beton yang di aplikasikan di darat.

4. KESIMPULAN

Penggunaan substitusi limbah *steel slag* 20% dan 25% pada *Underwater Concrete* dapat meningkatkan nilai *slump flow*, nilai *flow* meningkat seiring bertambahnya persentase limbah *steel slag* tetapi, penambahan *silica fu*me mampu menurunkan nilai *slump flow*. Untuk pengujian ketahanan beton dari pencucian aliran air (*washout*) substitusi limbah *steel slag* dan *silica fu*me tahan terhadap *washout*. Pengujian kuat tekan beton menurun seiring bertambahnya kadar *steel slag*, kadar *steel slag* optimum sebesar 20% dengan kuat tekan 47.5 MPa.

5. PERSANTUNAN

Saya ucapkan terimakasih kepada Bapak Ir. Mochamad Solikin, S.T., M.T., Ph.D. atas bimbingan yang telah diberikan, PT. Adhi Persada Beton, PT. Sika Indonesia, PT. Kimia Konstruksi Indonesia CONSOL, CV. Andhy Karya Pengecoran Logam Klaten yang telah memberikan bantuan material yang digunakan dalam penelitian ini, dan Laboratorium Bahan Bangunan Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta yang menyediakan sarana dan fasilitas dalam melakukan penelitian, serta seluruh pihak yang berkontribusi dalam penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Cui, W., Huang, J., Song, H., Xiao, M., 2017. Development of Two New Anti-Washout Grouting Materials Using Multi-Way ANOVA in Conjunction With Grey Relational Analysis. Constr Build Mater 156, 184–198. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.126

Darmawan Budi, 2022. Pengaruh Penggunaan Steel Slag Pada High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete Dengan Variasi Perendaman Klorida Terhadap Kuat Tekan Beton.

Ganesh Kumar, B., Muthu, M., Chajec, A., Sadowski, Ł., Govindaraj, V., 2022. The effect of silica fume on the washout resistance of environmentally friendly underwater concrete with a high-volume of siliceous fly ash. Constr Build Mater 327. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127058

Hanif, 2012. Penggunaan Steel Slag Dengan Variasi FAS Terhadap Kuat Tekan Beton.

Heniegal, A., Abd, A., Salam Maaty, E., Saad Agwa, I., Heniegal, A.M., El, A.A., Maaty, S., Agwa, I.S., 2018. Underwater Concrete Properties With Steel Slag As The Coarse Aggregate.

Heniegal, A., Heniegal, A.M., 2016. Developing Underwater Concrete Properties with and without Anti-washout Admixtures.

Heniegal, A.M., El Salam Maaty, A.A., Agwa, I.S., 2015. Simulation of the Behavior of Pressurized Underwater Concrete. Alexandria Engineering Journal 54, 183–195. https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.017

Iswardoyo, J., 2016. Studi Pemanfaatan Steel Slag Sebagai Bahan Bangunan Sabodam The Study Of Utilization Of Steel Slag To Sabodam.

Khayat, K.H., 1995. Effects of Antiwashout Admixtures On Fresh Concrete Properties, Article in ACI Materials Journal.

Khotimah Handayani, N., Nugroho Aldini Trisnawan, 2023. Pemanfaatan Steel Slag Sebagai Substitusi Agregat Kasar Pada Pembuatan Beton Hvfa-Scc Tahan Serangan Sulfat. Dinamika Teknik Sipil.

Korua, A., Dapas, S., Handono, B., 2019. Kinerja High Strength Self Compacting Concrete Dengan Penambahan Admixture "Beton Mix" Terhadap Kuat Tarik Belah. Jurnal Sipil Statik 7, 1353–1364.

Lu Hao, Sun, X., Ma, H., 2022. Anti-washout Concrete: An overview. Constr Build Mater. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128151

Nasr, A.A., Chen, S., Jin, F., 2021. Washout Resistance Of Self-Protected Underwater Concrete In Freshwater And Seawater. Constr Build Mater 289. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123186

Ren, Z., Li, D., 2023. Application of Steel Slag as an Aggregate in Concrete Production: A Review. Materials 16, 5841. https://doi.org/10.3390/ma16175841

Solikin, M., Setiawan, B., Afani, I.R., Rizki Perdana, H., Sabrina, N., Fatoni, R., Pratiwi, D.I., 2024. Analisis Serangan Sulfat pada Self Compacting Concrete (SCC) menggunakan Variasi Penambahan Silica fume dengan Metode Perubahan Panjang. Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan. https://doi.org/10.29244/jsil.9.1.115-126

ANALISIS VARIASI DESAIN PENAMPANG FONDASI DALAM TERHADAP EFISIENSI PELAKSANAAN (STUDI KASUS: GEDUNG POLIKLINIK RSUP PROF. DR. I.G.N.G. NGOERAH)

I Made Aryatirta Predana*, Made Dodiek Wirya Ardana, dan I Gede Yogi Gangga Purnawardana

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana,
Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran, Badung, Bali
***e-mail**:aryatirta@unud.ac.id*

ABSTRAK

Pada konstruksi bangunan, fondasi memiliki peran penting dalam menahan dan meneruskan beban struktur di atasnya ke tanah dengan daya dukung yang memadai. Namun, perencanaan fondasi yang baik tidak hanya mempertimbangkan daya dukung, tetapi juga aspek efisiensi metode pelaksanaannya. Pada kenyataannya, faktor efisiensi ini sering terabaikan dalam praktik lapangan, mengakibatkan perencanaan yang tidak optimal. Berdasarkan hal tersebut, dilakukan analisis alternatif desain fondasi untuk dibandingkan dengan desain fondasi eksisting, baik dari segi keamanan maupun efisiensi pelaksanaannya. Studi ini dilakukan di Proyek Pembangunan Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah yang merupakan bangunan dengan struktur beton bertulang dengan lima lantai utama dan satu lantai basemen. Metode pelaksanaan instalasi tiang dibandingkan antara menggunakan *hydraulic jack-in* dan *drop hammer*. Hasil desain menunjukkan bahwa tipe fondasi eksisting (PE12 400) memiliki daya dukung tiang kelompok yang tinggi sebesar 9201,08 kN, namun memerlukan waktu instalasi tiang selama 37,25 menit dan produktivitas sebesar 3,74 m/menit. Dari berbagai alternatif, fondasi persegi tipe PP6 500 mampu menahan beban aksial dan lateral dengan memiliki daya dukung aksial sebesar 7262,27 kN dan lateral sebesar 1023,48 kN. Selain itu, fondasi tipe ini memerlukan waktu instalasi tiang selama 19,25 menit dan produktivitas 3,74 m/menit. Hal ini menjadikan fondasi persegi tipe PP6 500 sebagai alternatif terbaik untuk pemilihan tipe fondasi pada studi kasus ini.

Kata kunci: fondasi tiang, penampang, daya dukung, metode pelaksanaan, efisiensi

1. PENDAHULUAN

Fondasi sebagai struktur bawah berfungsi untuk menanggung dan menyalurkan beban yang diakibatkan beratnya sendiri maupun beban bangunan yang ada di atasnya ke dalam tanah. Dalam penerapannya, ada dua macam fondasi yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Fondasi dangkal dapat digunakan apabila kedalaman tanah keras tidak terlalu jauh dari permukaan tanah. Sedangkan fondasi dalam digunakan apabila tanah yang ada di bawah bangunan tidak memiliki kapasitas yang cukup guna menanggung beban beratnya sendiri dan bangunan di atasnya, atau tanah keras yang memiliki daya dukung yang mampu memikul beban letaknya cukup dalam.

Pemilihan jenis fondasi dalam pada proyek pembangunan gedung poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah di Denpasar didasarkan pada beberapa faktor, seperti lokasi proyek, kondisi geografis dan tanah pada lokasi, fungsi bangunan, jumlah tingkat gedung, beban yang bekerja, dan kemudahan pelaksanaan di lapangan. Gedung ini memiliki desain struktur beton bertulang yang terdiri dari lima lantai utama yang digunakan sebagai pelayanan kesehatan dan satu lantai basemen yang digunakan sebagai parkir untuk kendaraan roda dua. Selain mempertimbangkan bahwa gedung ini merupakan fasilitas kesehatan yang sangat vital bagi masyarakat, perencanaan dan pembuatan struktur bawah harus dilakukan secara hati-hati. Hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kegagalan struktur pada gedung tersebut. Kondisi tanah yang ada di bawah gedung ini berjenis lempung berpasir dan memiliki kapasitas daya dukung tanah yang tidak terlalu tinggi. Oleh karena itu, dipilihlah jenis fondasi dalam, yaitu fondasi tiang, yang akan menyalurkan tegangan yang ditimbulkan oleh beban struktur atas ke dalam lapisan tanah keras yang mampu menopang gedung beserta bebannya. Dalam proses pemilihan fondasi tiang, dibutuhkan analisis dan perancangan untuk mengetahui daya dukung dari setiap jenis fondasi. Adapun variasi penampang yang akan dianalisis dan dibandingkan efisiensi pelaksanaannya dengan desain eksisting yakni penampang persegi, lingkaran dan segitiga.

2. KAJIAN PUSTAKA

Daya Dukung Fondasi Dalam (Tiang)

Menurut Bowles (1997), fondasi dalam meliputi tiang pancang, tembok atau tiang yang dibor, serta kaison yang dibor hingga kedalaman D/B ≥ 4. Daya dukung dari fondasi tiang dapat diestimasi dengan memanfaatkan nilai SPT yang diperoleh dari pengujian tanah di lokasi proyek. Untuk menghitung kapasitas tiang berdasarkan nilai SPT, digunakan persamaan (1) dan (2) berikut ini (Das, 2016).

$$Q_u = Q_P + Q_s \quad (1)$$

$$Q_{ijin} = Q_u/FS \quad (2)$$

Dengan Q_u = kapasitas tiang tunggal (kN), Q_{ijin} = daya dukung ijin fondasi tiang tunggal (kN), Q_P = tahanan ujung tiang (kN), Q_s = tahanan friksi tiang (kN), dan FS = faktor keamanan yang diambil minimal 2,50 (SNI 8460:2017).

Daya dukung kelompok tiang dapat dihitung menggunakan persamaan (3) sebagai berikut.

$$Q_{g(all)} = E_f \times n \times Q_{ijin} \quad (3)$$

Dengan $Q_{g(all)}$ = daya dukung ultimit fondasi tiang kelompok (kN), E_f = efisiensi tiang, dan n = jumlah tiang (kN).

Daya Dukung Horizontal (Lateral), Defleksi dan Rotasi Tiang

Estimasi nilai daya dukung arah horizontal (lateral) pada fondasi tiang dapat dianalisis berdasarkan data fisik fondasi dan parameter tanah, dengan menerapkan prinsip-prinsip mekanika. Tahanan lateral fondasi tiang dapat ditentukan menggunakan metode Broms seperti persamaan (4) dan (5) berikut ini.

$$R = \sqrt[4]{\frac{El}{K_h \times d}} \quad (4)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p l_p}{n_h}} \quad (5)$$

Dengan l_p = momen inersia tiang (m^4), E_p = modulus elastisitas tiang (kN/m^2), n_h = koefisien modulus variasi (kN/m^3), K_h = modulus reaksi subgrade (kN/m^3), d = diameter tiang (m), R = faktor atau koefisien kekakuan R, dan T = faktor atau koefisien kekakuan T.

Beban lateral dari tiang pendek serta momen yang terjadi di kepala tiang didapatkan dengan persamaan (6) dan (7) berikut ini.

$$H_u = \left(\frac{3}{2}\right) \gamma\ d\ L^2\ Kp \quad (6)$$

$$M_{maks} = \left(\frac{2}{3}\right) H_u L = \gamma\ d\ L^3\ Kp \quad (7)$$

Jika kondisi tiang panjang dan M_{maks} lebih besar daripada M_y, maka nilai H_u dapat dihitung dengan persamaan (8), (9) dan (10) sebagai berikut.

$$H_u = 2\frac{My}{\left(e + \frac{2f}{3}\right)} \quad (8)$$

$$M_y = \left(\frac{1}{2}\right) y\ d\ L^3\ Kp - H_u L \quad (9)$$

$$f = 0{,}82\sqrt{\frac{H_u}{d\ Kp\ \gamma}} \quad (10)$$

Dengan H_u = gaya lateral ultimit (kN), K_p = koefisien tanah pasif yang dapat dicari menggunakan perhitungan korelasi dengan nilai N-SPT (Das, 2009), γ = berat volume tanah (kN/m^3), e = jarak beban ke muka tanah (m), d = diameter tiang (m), M_y = momen tahanan bahan tiang (kN.m), dan f = jarak ke titik gaya lintang sama dengan nol (m).

Defleksi yang terjadi pada tiang dapat ditoleransi hingga sebesar 12 mm. Sementara itu, rotasi tiang terhadap posisi/arah sumbu mayor yang dirancang diharapkan tidak lebih dari 10° (setara dengan 1:6 atau 15%). Dalam hubungannya dengan metode Broms, tiang yang tertanam dalam tanah granuler dikaitkan dengan koefisien untuk tanah granuler seperti persamaan (11).

$$\alpha = \left[\frac{n_h}{Ep\ Ip}\right]^{1/5} \quad (11)$$

Tiang ujung bebas dan jepit berkelakuan seperti tiang pendek, bila αL < 2 dengan besarnya defleksi, maka perhitungan defleksi dan rotasi untuk tiang ujung jepit ditunjukkan oleh persamaan (12) dan (13).

$$y_0 = \frac{2H}{L^2 n_h} \tag{12}$$

$$\theta = \frac{1{,}6\ H_e}{(n_h)^{2/5}(Ep\ Ip)^{3/5}} + \frac{1{,}7\ H_e}{(n_h)^{1/5}(Ep\ Ip)^{4/5}} \tag{13}$$

Dengan α = koefisien untuk tanah granuler, n_h = koefisien variasi modulus, I_p = inersia penampang tiang (cm^4), e = jarak gaya H ke muka tanah (cm), L = panjang tiang tertanam tanah (cm), H = gaya lateral diijinkan (kg), y_0 = defleksi (mm), dan θ = rotasi tiang.

3. METODOLOGI DAN DATA PENELITIAN

Data perencanaan struktur Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Perencanaan Gedung

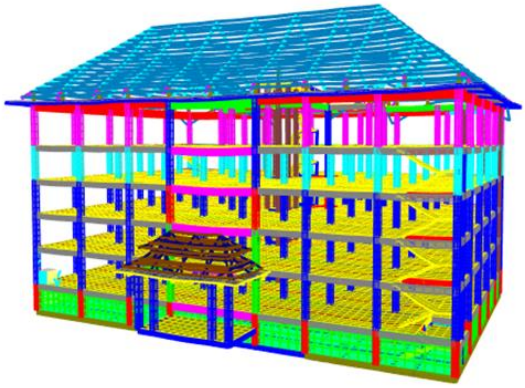
Parameter	Keterangan
Jenis pemanfaatan Gedung	Rumah sakit
Jumlah lantai struktur	5 lantai dan 1 basement
Tinggi basemen	3,50 m
Tinggi lantai 1	5,00 m
Tinggi lantai 2-4	4,50 m
Tegangan leleh baja tulangan (fy)	420 MPa
Berat volume baja (γ_s)	7.850 kg/m^3
Modulus clastisitas baja (E_s)	200.000 MPa
Berat volume beton bertulang (γ_c)	2.400 kg/m^3
Kuat tekan beton (f'$_c$) untuk struktur gedung	30 MPa
Kuat tekan beton (f'$_c$) untuk tiang fondasi	41,5 MPa
Modulus elastisitas beton struktur (E_c)	25.742 MPa
Modulus elastisitas beton fondasi (E_c)	30.278 Mpa

Dimensi elemen struktur Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi Elemen Struktur

Jenis Struktur	Dimensi (mm)
Kolom (K1A, K1B, K1C, K1D, K1E)	600 x 600
Balok	B1 400 x 800
	B1a 400 x 1300
	B2 300 x 600
	B2A 300 x 600
	B2Aa 300 x 1100
	B3 300 x 500
	B4 250 x 400
	B5 200 x 300
Pelat	S130: 130
	S150: 150
	S250: 250
Retaining Wall	200
Tie Beam	TB1 300 x 600
	TB2 300 x 500
	TB3 250 x 400

Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah dimodelkan pada software SAP2000 dengan memasukan data-data struktur dan pembebanan yang telah dihimpun. Model dapat dilihat pada Gambar 1. Setelah dilakukan pemodelan dan pembebanan, dilanjutkan dengan melakukan analisis untuk mendapatkan gaya-gaya dalam serta perhitungan kapasitas fondasi tiang tunggal dan tiang kelompok. Variasi penampang persegi, lingkaran dan segitiga dianalisis dan dibandingkan kapasitas tiangnya dengan fondasi eksisting, lalu ditentukan beberapa kombinasi tiang kelompok dengan variasi penampang yang memiliki kapasitas dengan efisiensi pelaksanaan paling optimum.



Gambar 1. Model Gedung menggunakan Software SAP2000

4. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal dan Kelompok Tiang

Dari hasil analisis dan pemodelan struktur pada software SAP2000, didapatkan data dengan gaya yang terbesar yaitu:

P = 5390,12 kN

Mx = 0,18 kN.m

My = 17,49 kN.m

Hu = 13,43 kN

Perhitungan fondasi tiang tunggal dilakukan untuk mengetahui daya dukung tiang tunggal pada tiap jenis fondasi dengan faktor keamanan sebesar 3,00. Rekapitulasi hasil analisis daya dukung tiang tunggal dengan berbagai bentuk variasi penampang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Tunggal Dengan Variasi Penampang

Bentuk	D (m)	P (kN)	Q_{all} (kN)	Kontrol
Persegi	0,30	5390,12	664,20	Not OK
	0,40	5390,12	1.049,60	Not OK
	0,50	5390,12	1.517,00	Not OK
Lingkaran	0,30	5390,12	521,87	Not OK
	0,40	5390,12	824,69	Not OK
	0,50	5390,12	1.191,93	Not OK
Segitiga	0,30	5390,12	405,90	Not OK
	0,40	5390,12	579,26	Not OK
	0,50	5390,12	691,61	Not OK

Sesuai hasil analisis pada Tabel 3, daya dukung tiang tunggal persegi memiliki daya dukung paling besar dibandingkan tiang tunggal tipe lingkaran maupun segitiga. Nilai daya dukung terbesar yaitu 1.517,00 kN pada penampang persegi dengan panjang sisi 500 mm sedangkan yang terkecil yaitu 405,90 kN pada penampang segitiga dengan panjang sisi 300 mm. Dari hasil analisis tersebut, penggunaan tiang tunggal pada struktur gedung ini tidak direkomendasikan karena daya dukung yang diperoleh belum mampu menahan beban struktur atas. Oleh karena itu, perlu diperhitungkan penggunaan fondasi dalam tiang kelompok.

Pada fondasi tiang kelompok, hal yang perlu diperhitungkan dalam analisis yaitu daya dukung aksial, lateral, defleksi dan rotasi pada tiang kelompok. Hasil dari analisis perhitungan dengan variasi penampang persegi, lingkaran dan segitiga ditunjukkan pada Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6. Desain fondasi eksisting merupakan tipe PE12 400 dengan bentuk penampang persegi berukuran sisi 400 mm sebanyak 12 buah tiang. Daya dukung fondasi tiang kelompok eksisting ini sebesar 9201,08 kN, sehingga variasi penampang yang dipilih adalah yang mendekati daya dukung tersebut.

Tabel 4. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Kelompok Penampang Persegi

Tipe	PP6 300	PP6 400	PP6 500	PP9 300	PP9 400	PP9 500	PP12 300	PE12 400	PP12 500
n (bh)	6	6	6	9	9	9	12	12	12
D (mm)	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Pu (kN)	5589,41	5750,34	5962,24	5691,65	5935,40	6256,54	5800,93	6208,13	6550,84
$Q_{g(all)}$ (kN)	3179,70	5024,71	7262,27	4501,13	7112,89	10280,35	5822,56	9201,08	13298,44
Kontrol	No	No	Oke	No	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Hu (kN)	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43
Hg (kN)	310,76	608,07	1.023,48	466,15	912,11	1.535,22	621,53	1.216,14	2.046,96
Kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
yo (mm)	0,0014	0,0009	0,0006	0,0014	0,0009	0,0006	0,0014	0,0009	0,0006
yo maks (mm)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Ø (º)	0,1194	0,0597	0,0349	0,1194	0,0597	0,0349	0,1194	0,0597	0,0349
Ø maks (º)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke

Tabel 5. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Kelompok Penampang Lingkaran

Tipe	PL6 300	PL6 400	PL6 500	PL9 300	PL9 400	PL9 500	PL12 300	PL12 400	PL12 500
n (bh)	6	6	6	9	9	9	12	12	12
D (mm)	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Pu (kN)	5942,29	5741,66	5953,83	6182,03	5848,22	6120,32	6447,74	6004,21	6369,21
$Q_{g(all)}$ (kN)	2498,33	3947,99	5706,07	3536,60	5588,70	8077,42	4574,87	7229,42	10448,77
Kontrol	No	No	No	No	No	Oke	No	Oke	Oke
Hu (kN)	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43
Hg (kN)	218,43	427,40	719,39	327,65	641,11	1.079,08	436,86	854,81	1.438,77
Kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
yo (mm)	0,0018	0,0011	0,0008	0,0018	0,0011	0,0008	0,0018	0,0011	0,0008
yo maks (mm)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Ø (º)	0,1642	0,0821	0,0480	0,1642	0,0821	0,0480	0,1642	0,0821	0,0480
Ø maks (º)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke

Tabel 6. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Kelompok Penampang Segitiga

Tipe	PT6 300	PT6 400	PT6 500	PT9 300	PT9 400	PT9 500	PT12 300	PT12 400	PT12 500
n (bh)	6	6	6	9	9	9	12	12	12
D (mm)	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Pu (kN)	5640,26	5792,30	5906,64	5666,22	5841,74	5973,39	5692,18	5891,18	6070,27
$Q_{g(all)}$ (kN)	1943,15	2773,05	3310,91	2750,69	3925,48	4686,87	3558,23	5077,92	7125,56
Kontrol	No	No	No	No	No	No	No	No	Oke
Hu (kN)	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43
Hg (kN)	94,12	152,02	200,10	141,17	228,03	300,15	188,23	304,04	511,74
Kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
yo (mm)	0,0028	0,0018	0,0015	0,0028	0,0018	0,0015	0,0028	0,0018	0,0012
yo maks (mm)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Ø (º)	0,3225	0,1611	0,1213	0,3225	0,1611	0,1213	0,3225	0,1611	0,0941
Ø maks (º)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke

Keterangan:
= Alternatif
= Eksisting

Dari hasil analisis, didapatkan 5 tipe tiang kelompok terbaik dengan variasi penampang yaitu bentuk persegi (PP6 500 dan PP9 400), bentuk lingkaran (PL9 500 dan PL12 400), serta bentuk segitiga (PT12 500). Daya dukung terbesar didapat pada tipe PL9 500 sebesar 8.077,42 kN sedangkan yang terkecil adalah tipe PP9 400 sebesar 7.112,89 kN. Berdasarkan perhitungan daya dukung lateral, semua tipe fondasi mampu menahan gaya horizontal. Begitu juga pada perhitungan defleksi dan rotasi yang diakibatkan oleh gaya horizontal kurang dari batas maksimum yang bisa diterima oleh fondasi. Maka dari itu, semua tipe fondasi memenuhi syarat daya dukung lateral, defleksi dan rotasi.

Penulangan tiang dihitung berdasarkan gaya yang disebabkan oleh pengangkatan menggunakan alat pada saat instalasi tiang berlangsung (Sardjono, 1988). Tulangan tiang yang dianalisis sebatas tiang yang memenuhi syarat daya dukung yaitu tiang alternatif dan eksisting. Tulangan pada *pile cap* juga diperhitungkan menggunakan metode geser satu arah dan dua arah. Setelah didapatkan, selanjutnya dikontrol terhadap kapasitas geser dam momen yang terdapat pada *pile cap*.

Efisiensi Pelaksanaan Instalasi Tiang

Metode pelaksanaan instalasi tiang menggunakan *hydraulic jack-in* dan *drop hammer* adalah dua metode yang umum

digunakan. Pemilihan metode ini dipertimbangkan berdasarkan dua faktor utama, yaitu waktu dan biaya sewa, serta kondisi lingkungan proyek. Metode *hydraulic jack-in* bekerja dengan cara menekan tiang ke dalam tanah menggunakan dongkrak hidraulis yang diberi beban penyeimbang (*counterweight*). Metode *diesel drop hammer* adalah proses memasukan tiang pancang ke dalam tanah dengan cara memukulnya menggunakan palu (*hammer*) yang diberi bantalan di atas kepala tiang. Hasil analisis perbandingan dua metode pelaksanaan instalasi tiang ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Analisis Efisiensi Waktu dan Produktivitas menggunakan Metode *Hydraulic Jack-In*

Pembanding	PE12 400	PP6 500	PP9 400	PL9 500	PL12 400	PT12 500
Jarak antar fondasi (m)	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,25
Kecepatan mobilisasi alat (m/menit)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Waktu mobilisasi alat (menit)	9,17	5,21	6,67	8,33	9,17	11,46
Panjang tiang (m)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Jumlah tiang	12,00	6,00	9,00	9,00	12,00	12,00
Kecepatan alat memancang (m/menit)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Waktu pemancangan (menit)	24,00	12,00	18,00	18,00	24,00	24,00
Ikat tiang pancang (menit)	4,08	2,04	3,06	3,06	4,08	4,08
Total waktu instalasi (menit)	37,25	19,25	27,73	29,39	37,25	39,54
Total panjang tiang (m)	144,00	72,00	108,00	108,00	144,00	144,00
Jumlah alat (unit)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Produktivitas (m/menit)	3,87	3,74	3,90	3,67	3,87	3,64

Tabel 8. Analisis Efisiensi Waktu dan Produktivitas menggunakan Metode *Drop Hammer*

Pembanding	PE12 400	PP6 500	PP9 400	PL9 500	PL12 400	PT12 500
Jarak antar fondasi (m)	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,25
Kecepatan mobilisasi alat (m/menit)	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
Waktu mobilisasi alat (menit)	5,42	3,08	3,94	4,93	5,42	6,77
Panjang tiang (m)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Jumlah tiang	12,00	6,00	9,00	9,00	12,00	12,00
Kec. alat memancang (m/menit)	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35
Waktu pemancangan (menit)	556,20	278,10	417,15	417,15	556,20	556,20
Ikat tiang pancang (menit)	15,60	7,80	11,70	11,70	15,60	15,60
Angkat tiang pancang (menit)	18,00	9,00	13,50	13,50	18,00	18,00
Penyesuaian dudukan tiang (menit)	28,80	14,40	21,60	21,60	28,80	28,80
Penyetelan vertikal tiang (menit)	6,72	3,36	5,04	5,04	6,72	6,72
Total waktu instalasi (menit)	630,74	315,74	472,93	473,92	630,74	632,09
Total panjang tiang (m)	144,00	72,00	108,00	108,00	144,00	144,00
Jumlah alat (Unit)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Produktivitas (m/menit)	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23

Dari hasil analisis pada Tabel 7 dan Tabel 8, metode *hydraulic jack-in* lebih menguntungkan dalam pelaksanaan instalasi tiang karena memiliki waktu yang lebih singkat dan produktivitas yang lebih besar dibandingkan dengan metode *drop hammer*. Selain itu, metode *drop hammer* memiliki tingkat kebisingan yang lebih tinggi daripada metode *hydraulic jack-in* dan kemungkinan besar akan merusak bangunan di sekitarnya akibat dari getaran yang dihasilkan alat tersebut. Maka dari itu, metode *hydraulic jack-in* lebih disarankan untuk digunakan dalam proses instalasi tiang. Dari kelima tipe fondasi yang menggunakan metode *hydraulic jack-in*, tipe PP6 500 memiliki waktu instalasi paling cepat yakni 19,25 menit. Sedangkan produktivitas yang paling besar ada pada tipe PP9 400 yaitu sebesar 3,90 m/menit.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan perhitungan fondasi tiang kelompok, fondasi eksisting (PE12 400) memiliki daya dukung paling besar yaitu sebesar 9201,08 kN dibandingkan dengan kelima variasi desain penampang fondasi yang telah memenuhi syarat, dimana daya dukung terbesarnya adalah sebesar 8.077,42 kN yaitu fondasi tipe PL9 500. Variasi desain penampang memberikan daya dukung yang berbeda-beda, menyesuaikan dengan geometri penampang, jumlah tiang serta daya dukung yang dihasilkan untuk menahan beban. Adanya variasi desain penampang ini juga berpengaruh pada efisiensi metode pelaksanaan dan nilai produktivitas.

Berdasarkan analisis efisiensi metode pelaksanaan instalasi tiang fondasi berupa *hydraulic jack-in*, didapatkan hasil analisis bahwa alternatif fondasi tipe PP6 500 memiliki total waktu instalasi yang lebih cepat dibandingkan tipe lainnya yakni 19,25 menit dengan produktivitasnya yaitu 3,74 m/menit. sedangkan tipe eksisting (PE12 400) membutuhkan waktu instalasi selama 37,25 menit dengan produktivitas sebesar 3,87 m/menit. Hal ini disebabkan karena tipe PP6 500 memiliki jumlah tiang yang paling sedikit dibandingkan dengan alternatif variasi lainnya. Dari hasil perbandingan dan analisis yang telah dilakukan, fondasi tiang pancang berpenampang persegi tipe PP6 500 dapat dijadikan sebagai alternatif pemilihan fondasi pada struktur Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standarisasi Nasional. SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik. www.bsn.go.id
Bowles, J. E. (1997). Analisis dan Desain Pondasi-Bowles (4th ed.).
Das, B. M. (2009). Principles of Geotechnical Engineering, 7th Edition.
Das, B. M. (2016). Principles of Foundation Engineering.
Sardjono, H. (1988). Pondasi Tiang Pancang Jilid 1.

PEMANFAATAN SERAT IJUK SEBAGAI BAHAN STABILISASI (*STABILIZING AGENT*) PADA CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT* KASAR AGREGAT SLAG BANTAENG

Alpius[1], R. Irmawaty[2], M. W. Tjaronge[3], S. H. Aly[4]

[1)]Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp 0811422111, E mail: alpiusnini@gmail.com
[2),] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 08114619672, E mail ; Rita_irmaway@yahoo.co.id
[3),] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 0811466610, E mail ; tjaronge@yahoo.co.jp
[4)]Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp. 087840023116, E mail: marni_hamidaly@yahoo.com

ABSTRAK

Uji draindown merupakan metode mengukur kecenderungan aspal dalam campuran beraspal untuk mengalir keluar dari agregat selama proses pencampuran dan penanganan. Uji ini penting karena draindown berlebihan menyebabkan perubahan sifat fisik dan mekanik campuran serta mempengaruhi kualitas jalan yang dibangun dari campuran tersebut. Tujuan penelitian adalah menganalisis penggunaan serat ijuk sebagai bahan stabilisasi *(stabilizing agent)* pada campuran *Stone Mastic Asphalt* Kasar (*SMA* Kasar) yang menggunakan agregat kasar berupa agregat lokal dan slag Bantaeng dalam mengurangi nilai *draindown*. Penggunaan serat ijuk sebesar 0,3% dari berat campuran yang dipotong sepajang ± 6 mm. Metode pengujian *draindown* merujuk pada metode AASHTO T 305-97, pada campuran Campuran SMA Kasar dengan penggunaan kadar aspal (6,0%, 6,25%, 6,5%, 6,75%, dan 7,0%) sesuai SNI 8129_2015 (spesifikasi *stone matrix asphalt*) dengan variasi penggunaan slag Bantaeng sebesar (0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%) sebagai sunstitusi agregat kasar. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh bahwa penggunaan serat ijuk sangat membantu dalam menahan laju pengaliran aspal *(draindown)* campuran SMA Kasar, namun pada penggunaan 100% slag Bantaeng sebagai pengganti agregat kasar untuk kadar aspal 7% nilai *draindown* masih melebihi nilai spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga yaitu maksimal 0,3% dari berat total campuran.

Hasil pengujian menunjukkan penggunaan serat ijuk sebagai bahan stabilisasi pada campuran *SMA* Kasar mengurangi laju pengaliran aspal, tapi juga dipengaruhi oleh kandungan aspal dalam campuran serta karakteristik material agregat seperti penyerapan dan bentuk permukaan. Diharapkan hasil penelitian ini menambah referensi dalam penelitian mengenai bahan stabilisasi berupa bahan alami dalam campuran beraspal khususnya *Stone Mastic Asphalt* Kasar (*SMA* Kasar) yang menggunakan agregat berupa limbah industri untuk keberlanjutan pengembangan penelitian material konstruksi perkerasan jalan.

Kata Kunci: Serat ijuk, *Draindown*, Slag Bantaeng, *Stone Mastic Asphalt*, *Stabilizing Agent*.

1. PENDAHULUAN

Jalan merupakan salah satu sarana perhubungan yang sangat penting bagi sektor ekonomi dan sosial. Sejalan dengan meningkatnya status sosial masyarakat, maka terjadi kecenderungan meningkatnya jumlah kendaraan secara global yang melewati suatu jalan. Pada saat menggunakan jalan, tuntutan pengguna jalan adalah kenyamanan, keselamatan dan kecepatan (PP Republik Indonesia tentang Jalan No. 34/2006). Untuk memenuhi tuntutan masyarakat pengguna jalan maka perkerasan harus memenuhi persyaratan kondisi fungsional dan struktural. Persyaratan fungsional menyangkut kerataan dan kekesatan permukaan perkerasan, sedangkan persyaratan kondisi struktural menyangkut kemampuan dalam mempertahankan kondisi fungsionalnya pada tingkat yang flesible. Kondisi struktural ditunjukkan oleh kekuatan atau daya dukung perkerasan yang biasanya dinyatakan dalam nilai struktural atau lendutan. Lapis perkerasan jalan adalah suatu hal yang terpenting dari struktur konstruksi jalan dalam mendukung beban lalu lintas kendaraan. Penyediaan jalan raya yang aman dan nyaman sangat dibutuhkan oleh masyarakat dalam kelancaran suatu perjalanan tanpa ada hambatan.

Pemilihan material dalam hal ini agregat yang digunakan dalam pembangunan jalan yang tepat sesuai dengan kondisi daerah, adalah hal penting dalam pencapaian konsistensi kualitas perkerasan jalan sesuai dengan umur layan yang direncanakan. Dalam pembangunan konstruksi jalan raya di setiap daerah, harus memperhatikan jenis perkerasan atau jenis lapisan permukaan yang digunakan, agar dalam fungsinya dapat meningkatkan pembangunan daerah itu sendiri. Rembesan air, alur, retak, dan jenis kerusakan jalan lainnya termasuk kerusakan perkerasan jalan yang sering terjadi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan kombinasi perkerasan dengan tingkat kestabilan dan ketahanan yang tinggi yang dipengaruhi oleh jenis campuran beraspal, material penyusunnya dan kondisi lingkungan sekitar jalan.

Salah satu jenis perkerasan yang dapat mengatasi permasalahan kerusakan jalan yang menunjang pembangunan jalan

adalah *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yang merupakan jenis perkerasan lentur yang dikembangkan di Jerman sekitar pertengahan tahun 1960-an (Blazejowski, 2016). Jenis perkerasan ini dianggap mempunyai kelebihan dibandingkan dengan jenis perkerasan lainnya karena perkerasan SMA mempunyai ketahanan terhadap alur, fleksibilitas dan durabilitas yang tinggi, di Indonesia sendiri mulai mengenal *Stone Matrix Asphalt (SMA)* sekitar tahun 1990-an akan tetapi masih sangat jarang dijumpai. Kekuatan campuran SMA dalam menanggung beban kendaraan diperoleh dari rangka (skeleton) agregat kasar yang berbentuk matriks, sementara rongganya diisi oleh mastik, berupa campuran agregat halus dan filler dengan kadar aspal yang cukup tinggi (Blazejowski, 2016). Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaan SMA adalah masalah *draindown* aspal, yaitu migrasi aspal dari agregat selama proses pencampuran, pengangkutan, dan pemadatan, yang dapat mengurangi kualitas dan performa perkerasan. Untuk mengatasi masalah ini, penggunaan *stabilizing agent* berupa serat ijuk dalam campuran SMA menjadi fokus penelitian.

Serat ijuk berasal dari daun tanaman enau atau ijuk yang tumbuh di wilayah tropis seperti Indonesia. Serat ini biasanya diperoleh dari bagian dalam batang tanaman enau setelah proses pengolahan dan pemisahan serat dari bagian lainnya. Serat ijuk memiliki tekstur kasar dan kuat sehingga sering digunakan sebagai bahan baku untuk membuat tali, anyaman, kain, dan produk kerajinan lainnya. Selain itu, serat ini juga memiliki potensi untuk digunakan dalam industri konstruksi sebagai penguat material komposit. Sifat-sifat serat ijuk yang kuat dan tahan terhadap cuaca membuatnya cocok untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari konstruksi hingga kerajinan tangan. Sumber daya alam yang melimpah serta kemampuan regenerasi tanaman enau menjadikan serat ijuk sebagai bahan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Beberapa tahun belakangan ini, di Indonesia sedang giat membangun pabrik pengolahan nikel sebagai bahan baku batterai. Industri ini menghasilkan limbah berupa slag yang selama ini kurang dimanfaatkan, seperti yang ada di Kabupaten Bantaeng Sulawesi Selatan. Oleh karena itu pada penelitian ini difokuskan pada penggunaan serat ijuk sebagai bahan stabilisasi (*stabilizing agent*) campuran aspal SMA Kasar yang menggunakan slag Bantaeng sebagai pengganti agregat kasar (agregat lokal) dengan berbagai variasi. Sehingga hasil penelitian diharapkan memberi hasil berupa campuran SMA kasar nilai *draindown* aspal memenuhi spesifikasi yang ditentukan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Pengertian Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA)

Berdasarkan AASHTO M 325-08 (2012), Stone Matrix Asphalt (SMA) yang merupakan jenis perkerasan lentur dimana kekuatan campuran dalam menanggung beban kendaraan diperoleh dari rangka (skeleton) agregat kasar yang berbentuk matriks, sementara rongganya diisi oleh mastik, berupa campuran agregat halus dan filler dengan kadar aspal yang cukup tinggi, kekuatan terjadi sebagai hasil geseran antar butir, penguncian antar partikel dan daya ikat yang baik dari aspal (Blazejowski, 2016).

Jenis perkerasan ini dianggap mempunyai kelebihan dibandingkan dengan jenis perkerasan lainnya karena perkerasan SMA mempunyai ketahanan terhadap alur, fleksibilitas dan durabilitas yang tinggi, di Indonesia sendiri mulai mengenal Stone Matrix Asphalt (SMA) sekitar tahun 1990-an akan tetapi masih sangat jarang dijumpai. Kekuatan campuran SMA dalam menanggung beban kendaraan diperoleh dari rangka (skeleton) agregat kasar yang berbentuk matriks, sementara rongganya diisi oleh mastik, berupa campuran agregat halus dan filler dengan kadar aspal yang cukup tinggi (Blazejowski, 2016). Hal ini didukung oleh uji coba skala penuh yang telah dilakukan Pusjatan pada tahun 2010 mengenai penggunaan teknologi SMA dengan serat selulosa yang dikemas dalam bentuk pelet pada ruas jalan di Jawa Barat (Jatibarang-Palimanan) dengan ketebalan sekitar 5 cm padat yang sampai saat ini masih dalam kondisi baik (Iriansjah, 2010 dalam Suaryana, 2012).

Pengaliran Aspal (*Drain Down)*

Menurut NAPA (2002), draindown adalah bagian dari campuran aspal (agregat halus dan bahan perekat) yang mengalir ke bawah selama proses pencampuran. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui jumlah aspal yang mengalir ke bawah selama penyimpanan, pengangkutan sampai ke lokasi proyek dan perletakan dilokasi kegiatan. Pengujian draindown perlu dilakukan pada suatu campuran dengan kadar agregat kasar yang tinggi seperti pada campuran SMA dan aspal porus.Karena draindown menyebabkan sering terjadi kerurasakan/kegemukan pada campuran SMA. Dalam SNI 8129:2015 Spesifikasi SMA dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 untuk menghindari terjadinya draindown disarankan penggunaan serat selulosa sekitar 0,3% terhadap berat total campuran. Bahan ini disebut dengan stabilizers atau dikenal pula dengan istilah *drainage inhibitors* (penghambat pengaliran).

Serat ijuk adalah serat alami yang berasal dari tanaman enau atau ijuk. Tanaman ini tumbuh di daerah tropis seperti Indonesia dan memiliki batang yang mengandung serat kasar. Serat ini biasanya digunakan sebagai bahan baku untuk membuat tali, anyaman, kain, dan berbagai produk kerajinan lainnya. Selain itu, serat ijuk juga memiliki potensi untuk digunakan dalam industri konstruksi sebagai penguat material komposit karena sifatnya yang kuat dan tahan terhadap cuaca. Serat ijuk dianggap sebagai sumber daya alam yang ramah lingkungan karena dapat diperbaharui melalui pertumbuhan tanaman enau serta memiliki kemungkinan penggunaan berkelanjutan dalam berbagai aplikasi.

Menurut Handayasari, I., dkk (2023), variasi penambahan 0.3% serat daun nanas dan 0.3 % serat ijuk memiliki nilai durabitas tertinggi dibandingkan dengan variasi persertase penambahan yang lainnya, juga dapat mengatasi bleeding pada aspal serta menambah daya dukung dan keawetan

Pengujian *draindown* aspal mengacu pada (AASHTO T 305-14), di mana nilai *draindown* dihiting menggunakan Persamaan (1).

$$Draindown\ (\%) = \left(\frac{A-B}{C}\right) \text{ x } 100\ \% \qquad (1)$$

Dimana: A = berat akhir piring penampung (gram),
B = berat awal piring penampung (gram),
C = berat awal jumlah campuran yang di uji (gram)

Slag Nikel sebagai Pengganti Agregat Kasar

Limbah slag nikel, atau ampas nikel, adalah limbah padat yang dihasilkan dari pengolahan bijih nikel. Limbah ini merupakan hasil pembakaran ferronikel dan memiliki warna kelabu perak. Slag nikel memiliki sifat-sifat yang menyerupai batu dan mengandung unsur silikat dan kapur dalam jumlah yang cukup tinggi. Komposisi kimia slag nikel terdiri dari 41,47% silika, 30,44% ferri oksida, dan 2,58% aluminia dimana kandungan dalam material ini memiliki kekerasan yang cukup untuk dimanfaatkan sebagai material konstruksi.

Limbah slag nikel dapat dimanfaatkan sebagai bahan konstruksi bangunan, pembuatan beton dan batako, serta sebagai bahan campuran aspal. Selain itu, slag nikel juga dapat digunakan sebagai agregat beton, pengerasan jalan tambang, atau agregat untuk konstruksi perkerasan jalan.

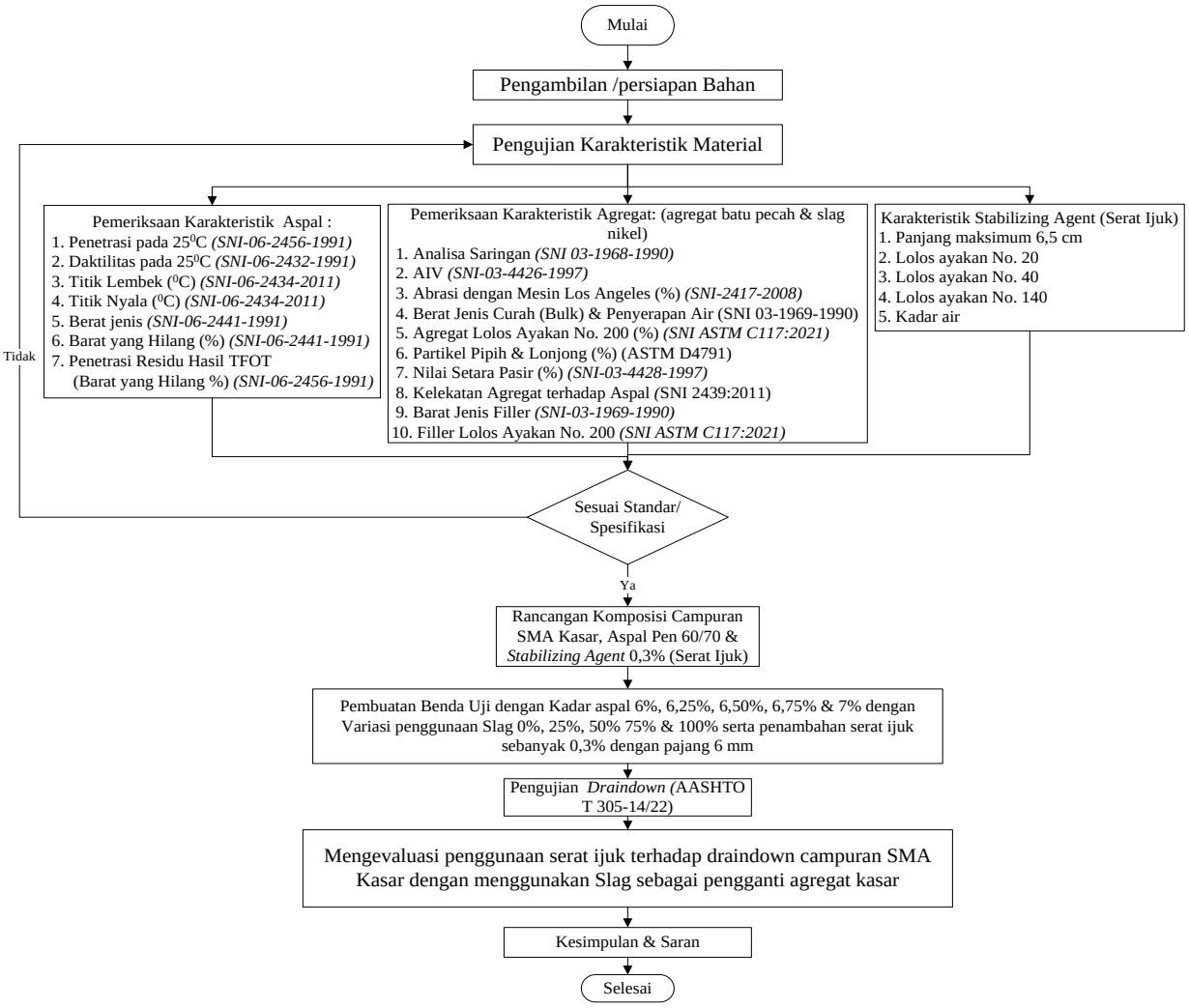
Beberapa penelitian mengenai penggunaan slag nikel dan serat ijuk dalam campuran beraspal. Alifuddin, A. (2021). Pengaruh Variasi Slag Nikel Sebagai Bahan Tambah Agregat Halus pada Campuran Lapisan Aspal Beton. Babalghaith, A. M., Koting, S., Ramli Sulong, N. H., et al. (2020) 'Effect of palm oil clinker (POC) aggregate on the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA) mixtures. Shen, A., Wu, H., Yang, X., He, Z., & Meng, J. (2020). Effect of different fibers on pavement performance of asphalt mixture containing steel slag. Supit, F. P., & Mangontan, R. (2021). Pemanfaatan Limbah Nikel Sorowako Dalam Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar. Shiva Kumar, G. and Ravi Shankar, A. U. (2020) 'Evaluation of workability and mechanical properties of stone matrix asphalt mixtures made with and without stabilizing additives dan Susanto, I., Irawan, R. R. and Hamdani, D. (2020) 'Nickel slag waste utilization for road pavement material as strategy to reduce environmental pollution.

3. METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan; dan Laboratorium Jalan dan Aspal Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar Waktu penelitian dilaksanakan adalah selama bulan Desember 2023 hingga bulan Mei 2024.

Gambar 1 menunjukkan bagan alir penelitian yang dilakukan untuk memperoleh hasil dari tujuan penelitian ini.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Benda uji yang dibuat dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji

Pengujian	Variasi		Komposisi Campuran					Sub Jumlah	Jumlah
			SMA-SN0	SMA-SN25	SMA-SN50	SMA-SN75	SMA-SN100		
Asphalt Draindown (*Stabilizing Agent* 0,3% (Serat Ijuk)	Kadar Aspal (%)	6,00	3	3	3	3	3	15	75
		6,26	3	3	3	3	3	15	
		6,50	3	3	3	3	3	15	
		6,75	3	3	3	3	3	15	
		7,00	3	3	3	3	3	15	

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Material Penyusun

Karakteristik campuran beraspal sangat ditentukan oleh kualitas material penyusunnya. Untuk itu perlu dilakukan pengujian karakteristik dari agregat yang diperoleh dari pemecah batu (*crusher*) di Bili-bili Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa berupa hasil pecahan batu sungai Jeneberang dan Slag hasil pengolahan smelter PT. Huadi Nickel-Alloy di Kab. Bantaeng Sulawesi Selatan berupa (*water cooled slag nickel*). Sedangkan sarat ijuk yang digunakan

berasal dari Kabupaten Toraja Utara Sulawesi Selatan. Material yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2 berikut:



Gambar 3. Slag Nikel Bantaeng dan Agregat Lokal Bili-bili



Gambar 4. Serat Ijuk sebagai Bahan Stabilisasi *(Stabilizing Agent)*

Hasil pengujian karakteristik agregat dapat dilihat dalam Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Agregat Kasar

Pengujian	Spesifikasi	Hasil Uji Agregat Kasar	
		Lokal	Slag Nikel
Abrasi	Maks 30%	12,89%	24,48 %
Berat Jenis Agregat Kasar			
Bulk	≥ 2,5	2,62	2,64
SSD	≥ 2,5	2,65	2,67
Apparent	≥ 2,5	2,70	2,71
Penyerapan	< 3	1,11	0,81
Pipih & Lonjong (1:5)	<5%	1,11% & 1,53%	2,78% & 2,81%
Angularitas	100/90	100/98	100/95

Tabel 3. Hasil Uji Karakteristik Agregat Halus

Pengujian	Spesifikasi	Hasil Uji
Nilai Setara Pasir	Min. 12 %	96,20 %
Material Lolos Ayakan No. 200	Maks. 1 %	0,40 %

Aspal yang digunakan adalah aspal minyak penetrasi 60/70 produksi PT. Pertamina (gudang aspal PU Baddoka

Sulawesi Selatan). Hasil pengujian karakteristik aspal yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.

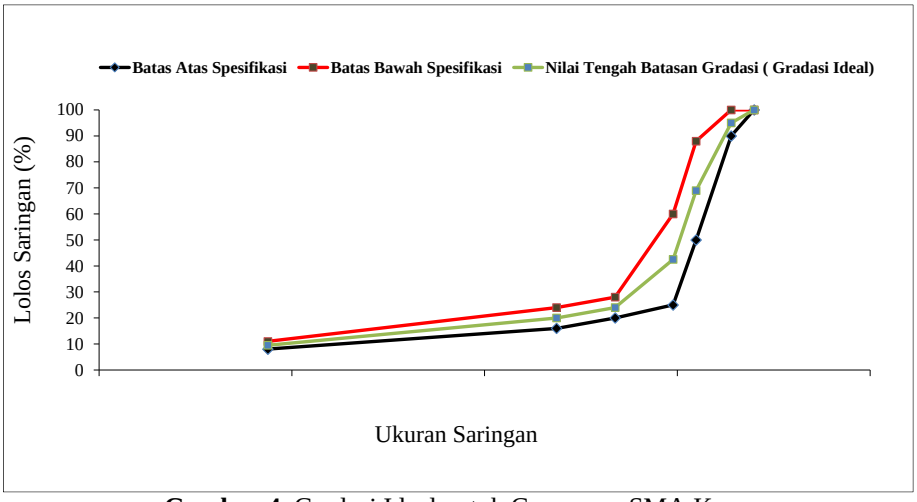
Tabel 4. Hasil Uji Karakteristik Aspal

Pengujian	Spesifikasi	Hasil Uji
Berat Jenis Aspal	≥ 1,0	1,043
Penetrasi 25 ^{0}C (0,1 mm)	60 - 70	66,3
Titik Lembek (^{0}C)	≥ 48	51
Daktilitas 25 ^{0}C (cm)	≥ 100	129,3
Titik Nyala (^{0}C)	≥ 232	260

Bahan pengisi yang digunakan adalah Semen Tonasa tipe PCC dengan berat jenis 2,58. Berdasarkan hasil uji karakteristik material disimpulkan bahwa memenuhi persyaratan/spesifikasi dan dapat digunakan sebagai material penyusun campuran *stone matrix asphalt (SMA)*.

Gradasi Campuran

Gradasi campuran merujuk pada SNI 8129:2015 yaitu Spesifikasi *Stone Matrix Asphat*, dan dalam penelitian ini campuran yang diuji yaitu *Stone Matrix Asphat* Kasar (SMA Kasar). Untuk gradasi campuran benda uji digunakan gradasi ideal yaitu nilai tengah dari batasan gradasi dengan pertimbangan bahwa campuran menggunakan 2 (dua) material agregat yang berbeda gradasinya, juga untuk mendapatkan campuran yang berada dalam kisaran yang optimum, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4 barikut:



Gambar 4. Gradasi Ideal untuk Campuran SMA Kasar

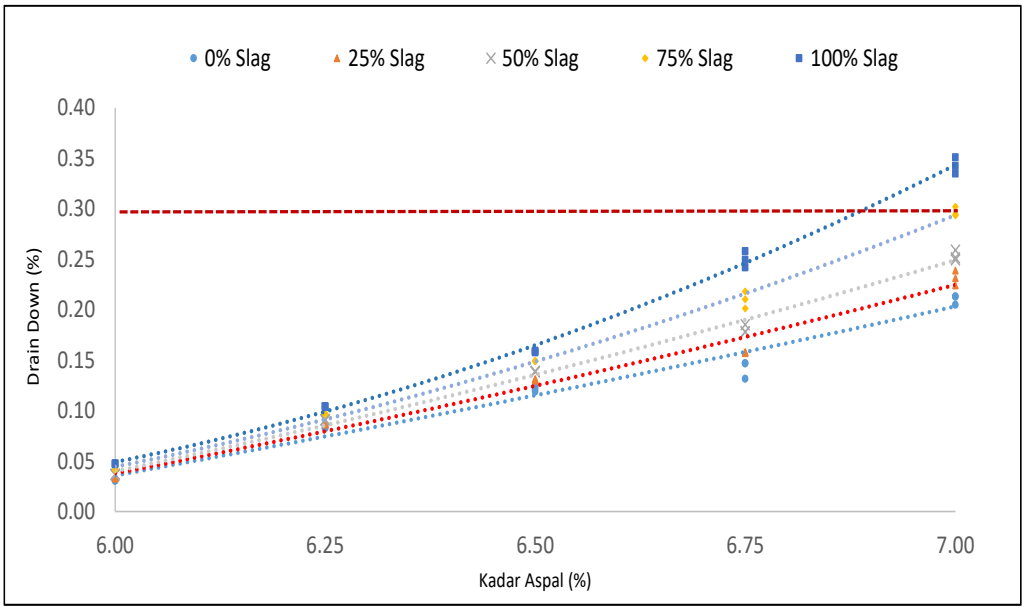
Proses penelitian berupa pengujian *Draindown* dapat dilihat pada Gambar 5 berikut:



Gambar 5. Dokumentasi Penelitian

Hasil Uji Pengaliran Aspal (*Draindown)*

Pengujian yang dilakukan terhadap masing-masing 3 (tiga) benda uji untuk setiap kadar aspal dan dalam setiap kadar aspal terdapat 5 (lima) variasi penggunaan slag Bantaeng sebagai pengganti agregat kasar dalam campuran SMA Kasar didapatkan nilai pengaliran aspal (*draindown)* seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6 berikut:



Gambar 6. Grafik Hasil Pengujian Pengaliran Aspal (*Draindown)*

Berdasarkan Gambar 6 grafik uji *draindown* terjadi peningkatan seiring bertambahnya kadar aspal dalam campuran yang disebabkan selimut aspal bertambah tebal yang menyebabkan pengaliran aspal (*draindown)* akan bertambah banyak.

Juga penggunaan slag yang semakin banyak sebagai pengganti agregat kasar campuran akan meningkatkan nilai pengaliran aspal (*draindown)* yang disebabkan oleh bentuk permukaan slag yang lebih halus dibandingkan agregat lokal sehingga daya rekat slag dengan aspal berkurang. Juga akibat penyerapan slag yang lebih kecil dari agregat lokal menyebabkan aspal yang berlebih dalam rongga campuran sehingga mempercepat terjadinya pengaliran aspal.

Penggunaan serat ijuk belum dapat terlihat jelas perannya sebagai bahan stabilisasi *(Stabilizing Agent)* karena proporsi penggunaan yang masih sama dalam setiap campuran yang diuji, tetapi serat ijuk sudah dapat membantu menahan pengaliran aspal (*draindown)* dimana pada campuran dengan penggunaan 100% slag sebagai pengganti agregat kasar (tidak menggunakan agregat lokal) baru terjadi nilai pengaliran aspal (*draindown)* melebihi batasan spesifikasi yaitu maksimal 0,30 %.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini sebagai berikut:

Serat ijuk dapat membantu menahan laju pengaliran aspal (*draindown)* walaupun pengaruhnya belum terlihat jelas karena penggunaannya masih sama banyak dalam setiap campuran yang diuji. Pengaliran aspal *(draindown)* juga dipengaruhi oleh kandungan aspal dalam campuran serta bentuk permukaan dari agregat yang digunakan serta penyerapan agregat itu sendiri. Pemanfaatan slag Bantaeng dalam penelitian ini akan meningkatkan nilai pengaliran aspal dimana pada penggunaan 100% slag akan menghasilkan pengaliran aspal (*draindown)* diatas batas spesifikasi yaitu maksimum 0,30%.

Saran

1. Penelitian lanjut penggunaan serat ijuk dengan variasi yang berbeda dalam setiap campuran agar terlihat pengaruhnya dalam pengaliran aspal (*draindown).*
2. Penggunaan slag sebagai pengganti semua fraksi agregat dalam campuran.

DAFTAR PUSTAKA

AASHT0. (2012). R 46-08, Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphlat. In AASHTO. AASHTO. http://www.fda.gov/downloads/AdvisoryCommittees/CommitteesMeetingMaterials/TobaccoProductsScientifi

cAdvisoryCommittee/UCM247549.pdf

AASHTO (2012) ‘AASHTO M325-08, Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA)’.

AASHTO. (1997). AASHTO T 305-97, Standard Method of Test for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures.

Alifuddin, A. (2021). Pengaruh Variasi Slag Nikel Sebagai Bahan Tambah Agregat Halus pada Campuran Lapisan Aspal Beton. Jurnal Teknik Sipil MACCA, 6(2), 101-107.

Babalghaith, A. M., Koting, S., Ramli Sulong, N. H., et al. (2020) ‘Effect of palm oil clinker (POC) aggregate on the mechanical properties of stone mastic asphalt (SMA) mixtures’, Sustainability (Switzerland), 12(7). doi: 10.3390/su12072716.

Blazejowski, K. (2011). Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice (1st ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10285

Blazejowski, K. (2016) Stone Matrix Asphalt, Theory and Practice, Stone Matrix Asphalt. Boca Raton: CRC Press. doi: 10.1201/b10285.

Shen, A., Wu, H., Yang, X., He, Z., & Meng, J. (2020). Effect of different fibers on pavement performance of asphalt mixture containing steel slag. Journal of Materials in Civil Engineering, 32(11), 04020333.

Supit, F. P., & Mangontan, R. (2021). Pemanfaatan Limbah Nikel Sorowako Dalam Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar. Paulus Civil Engineering Journal, 3(1), 63-69.

Shiva Kumar, G. and Ravi Shankar, A. U. (2020) ‘Evaluation of workability and mechanical properties of stone matrix asphalt mixtures made with and without stabilizing additives’, Transportation Infrastructure Geotechnology, 7, pp. 191–204.

Suaryana, N. (2012). Kajian Material Stone Matrix Asphalt Asbuton Beradasrkan Kriteria Deformasi Permanen. *Jurnal Jalan Jembatan*, *29*(2), 66-81.

Susanto, I., Irawan, R. R. and Hamdani, D. (2020) ‘Nickel slag waste utilization for road pavement material as strategy to reduce environmental pollution’, in E3S Web of Conferences. EDP Sciences, p. 5003.

SNI. (2015). SNI 8129:2015, Spesifikasi Stone Matrix Asphalt (SMA).

Penentuan Parameter Tanah Untuk Perencanaan Struktur Penahan Galian

Budi, G. S.[1], dan Neoleinad, W. [2]

[1]Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Jl. Siwalankerto No. 121-131, Siwalankerto, Kec. Wonocolo, Surabaya, Jawa Timur 60236
***e-mail**: : gogot@petra.ac.id*
[2]Mahasiswa program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Jl. Siwalankerto No. 121-131, Siwalankerto, Kec. Wonocolo, Surabaya, Jawa Timur 60236
e-mail: B11210009@petra.ac.id

ABSTRAK

Pekerjaan penggalian tanah sangat umum dilaksanakan untuk struktur di bawah tanah (*sub-structures*) seperti lantai parkir, tangki air bersih (*ground water tank*), atau tangki pengolah limbah air kotor (*sewage water tank*), dll. dengan kedalaman galian yang bervariasi. Untuk menjaga kestabilan galian yang relatif dalam selama pekerjaan, diperlukan struktur penahan galian seperti *sheet pile*, *soldier pile*, *secant pile*, *diaphragm wall*, *contiguous bored pile*, dan lain-lain. Struktur penahan galian pada umumnya direncanakan dengan menggunakan bantuan program aplikasi komputer yang memerlukan parameter tanah sebagai *input data*. Seringkali beberapa parameter tanah yg diperlukan sebagai *Input data* tidak tersedia dalam Laporan hasil penyelidikan tanah, sehingga *input data* harus ditentukan berdasarkan korelasi-korelasi dengan mempertimbankan nilai tipikal yang ada. Pemilihan data yang kurang tepat sebagai *input data* akan menghasilkan desain yang kurang tepat dan dapat mempengaruhi kestabilan galian. Makalah ini membahas dan membandingkan pemilihan parameter tanah yang digunakan untuk merencanakan struktur penahan galian sedalam 3m di lapisan lempung dengan konsistensi sangat lunak/lunak. Hasil perencanaan selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran deformasi/pergerakan struktur penahan tanah yang diperoleh dari hasil *monitoring* menggunakan inclinometer. Prediksi deformasi kepala (*top*) *secant pile* berdasarkan perencanaan adalah 73mm, yang menunjukkan kesesuaian dibandingkan dengan hasil monitoring yang terjadi di lapangan selama proses penggalian, yaitu 59mm. Perbedaan yang sangat signifikan terlihat pada pergerakan/defleksi pada ujung (*tip*) *secant pile*, dimana pada hasil perencanaan ujung *secant pile* diprediksi bergeser sebesar 43 mm, sedangkan berdasarkan hasil monitoring ujung tiang relatif tidak mengalami pergerekan. Disamping itu, dalam berdasarkan perencanaan menunjukkan bahwa *secant pile* akan mengalami deformasi *bending* dibandingkan dengan data hasil pengukuran yang relatif lurus.

Kata kunci (keywords): penahan tanah, lempung lunak, galian, plaxis, inclinometer

1. PENDAHULUAN

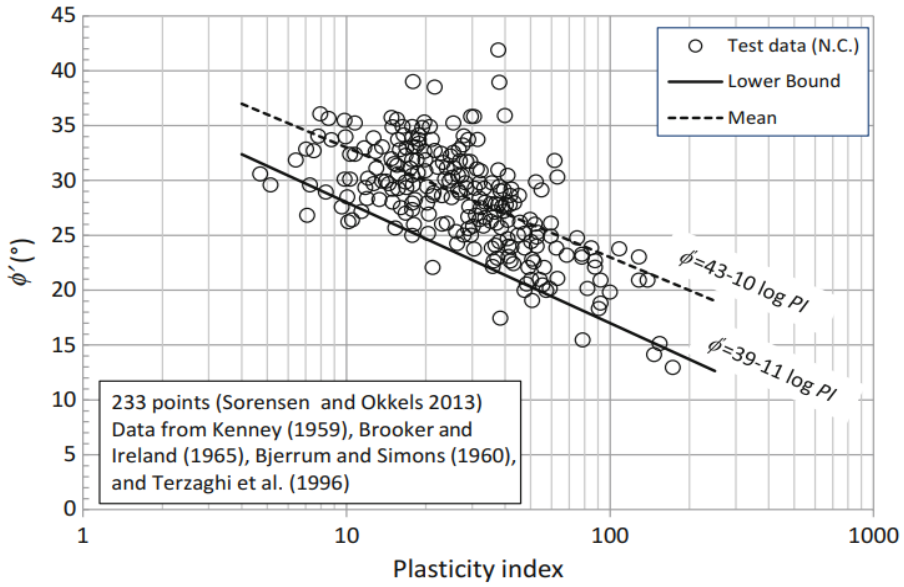
Pekerjaan penggalian tanah sangat umum dilaksanakan untuk struktur di bawah tanah (*sub-structures*) seperti lantai parkir, tanki air bersih (*ground water tank*), atau tanki pengolah limbah air kotor (*sewage water tank*), dll. Kedalaman galian bervariasi tergantung keperluan. Di Kota Surabaya, galian terdalam untuk struktur *basement* sampai tahun 2014 adalah 16.5m dari permukaan tanah *existing*, untuk mengakomodasi 5 lantai *basement*.

Secara umum, dalam pekerjaan galian yang relatif dalam diperlukan struktur penahan galian seperti *sheetpile*, *sodier pile*, *secant pile*, *diaphragm wall*, *contiguous bored pile*, dan lain-lain, untuk mempertahankan kestabilan tanah dan bangunan di sekitar (sekeliling) galian.

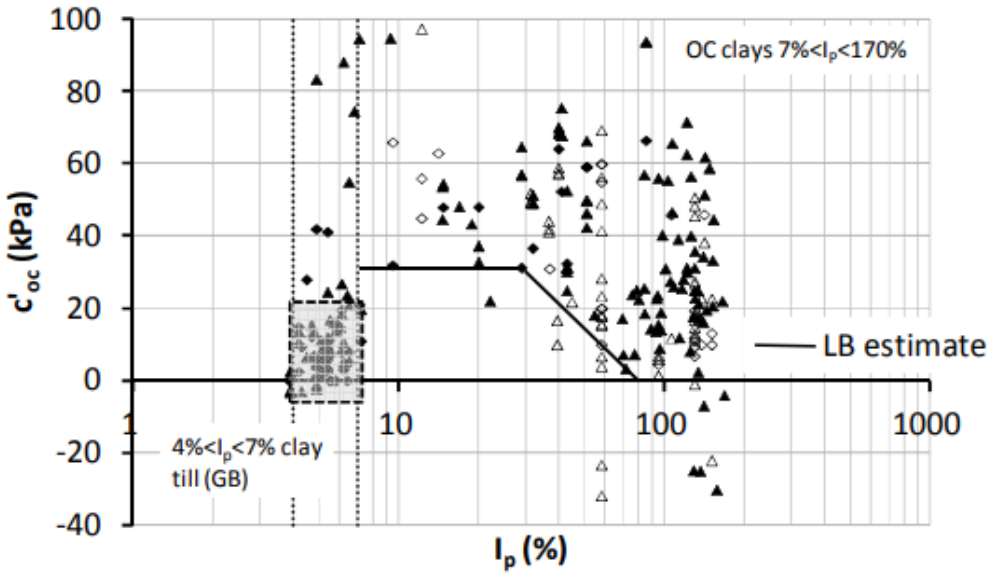
Data atau informasi beban bangunan di sekeliling galian (*surcharge load*), jenis dan parameter lapisan tanah (data tanah), kedalaman muka air tanah (m.a.t.), merupakan tiga (3) faktor utama yang harus diperhatikan dalam perencanaan, karena ke tiga faktor tersebut berpengaruh pada kekuatan dan deformasi struktur penahan galian. Selain itu, parameter lain yang diperlukan untuk perencanaan, khusunya yang menggunakan bantuan aplikasi komputer seperti Plaxis, adalah berat volume atau densiti tanah, modulus elastisitas (*Elastic modulus*) dan angka Poison (*Poisson's ratio*) tanah. Parameter kekuatan geser tanah yang diperlukan untuk perencanaan struktur penahan tanah seperti kohesi (c), sudut geser-dalam (ϕ), modulus elastisitas (E), dapat diperoleh dari pengujian tanah di laboratorium, dari korelasi dari hasil pengujian di lapangan (*Cone penetration Test*-CPT, *Standard Penetration Test*-Nspt, *Pressure meter test*, *Dilatometer test*, *Vane shear test*, dll), atau dari referensi untuk jenis tanah yang relatif sama.

Menurut Sorensen and Okkhels (2013), sudut geser-dalam tanah efektif (*effective friction angle*, ϕ') dapat diperoleh berdasarkan Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*, Ip) seperti dipresentasikan pada Gambar 1. Sedangkan Gambar 2 menujukkan korelasi antara kohesi efektif (*effective cohesion, c'*) dengan Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*, Ip) untuk lempung dalam kondisi terkonsolidasi (*over consolidated*, OC). Sorensen dan Okkhels (2013) juga menyatakan bahwa besarnya kohesi efektif tanah terkonsolidasi (c'_{oc}) dapat diprediksi sebagai berikut:

- $c'_{oc} = 30$ (kPa) untuk 7% < PI < 30% (1)
- $c'_{oc} = 48 - 0.6(PI)$ (kPa) untuk 30% < PI < 80% (2)
- $c'_{oc} = 0$ (kPa) untuk PI > 80% (3)



Gambar 1. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dengan Sudut geser-dalam efektif (ϕ')



Gambar 2. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dengan kohesi-efektif tanah terkonsolidasi (Over Consolidated, OC)

Look, B. G (2007) mengusulkan bahwa besarnya kohesi efektif (c') tanah non-organik dengan konsistensi lunak berkisar antara 10 kPa –20 kPa, dan besarnya sudut geser-dalam efektif berkisar antara 15^o – 25^o.

Jay Ameratunga dan Nagaratnam Sivakugan (2016) merangkum sebaran kohesi-efektif (c') dan sudut geser-dalam efektif (C) tanah, yang didasarkan pada data *Australian Standard 4678-2002* tentang *Earth retaining structure*,

dipresentasikan pada Tabel 1.

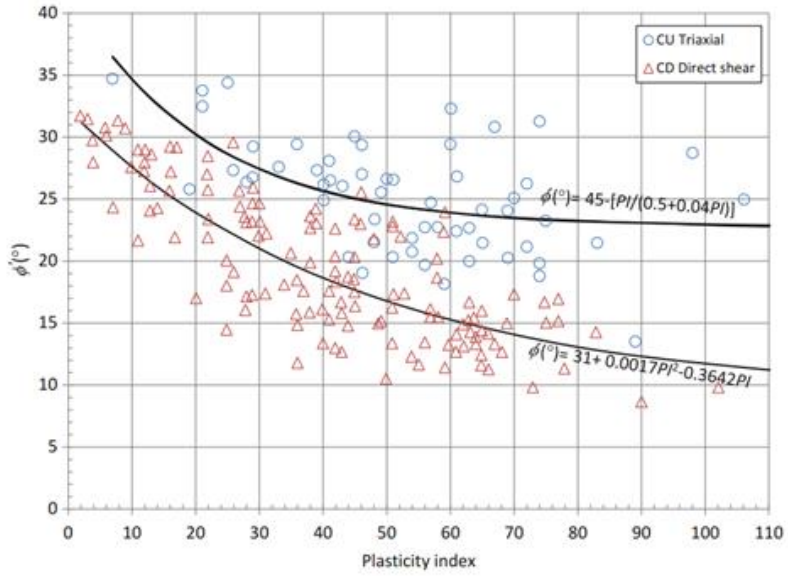
Tabel 1. Sebaran kohesi efektif (*Effective Cohesion, c'*) dan Sudut geser-dalam (*effective internal friction angle*, ϕ').

Kelompok Tanah	Tipikal tanah	Parameter Tanah	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
Buruk	Tanah lempung lunak dan teguh dengan plastisitas sedang ke tinggi, Lempung berlanau, isian lempung bervariasi lepas, Lanau berpasir lepas	0 – 5	17 – 25
Sedang	Lempung berpasir kaku, Lempung berkerikil, Pasir berlempung padat, Lanau berpasir, isian lempung padat	0 – 10	26 – 32
Bagus	Pasir berkerikil, Pasir yang dipadatkan, Isian kerikil dan batu pasir pecah, Pasir padat bergradasi baik	0 – 5	32 – 37
Sangat Bagus	Batuan lapuk yang lemah, Isian lapis dasar jalan terkontrol, Beton daur ulang	0 – 25	36 – 43

Castellanos and Brandon (2013) memformulasikan besarnya sudut geser-dalam efektif tanah (ϕ') berdasarkan pengujian *Triaxial Consolidated Undrained*, CU seperti ditunjukkan pada perumusan (4) dan berdasarkan pengujian *Direct shear* pada pesamaan (5) sebagai berikut (Gambar 3):

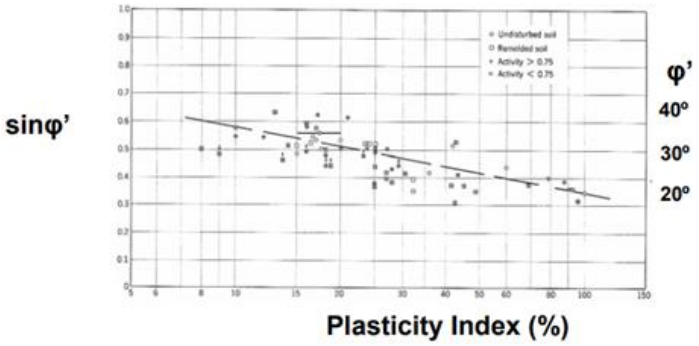
$$\emptyset' = 45 - \left[\frac{Ip}{(0.5+0.04Ip)}\right] \quad (4)$$

$$\emptyset' = 31 + 0.0017(Ip^2) - 0.3642(Ip) \quad (5)$$



Gambar 3. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dan Sudut geser-dalam efektif (ϕ') berdasarkan pengujian *Triaxial* dan *Direct shear*

Lambe and Whitman (1979) menyatakan bahwa besarnya sudut geser-dalam efektif (ϕ') atau sin (ϕ') dapat diperoleh berdasarkan korelasi dengan Indeks Plastisitas (Ip) seperti ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dan sin ϕ'

Modulus elastisitas tanah (E), menurut Schmertmann (1970) dapat ditentukan berdasarkan nilai *Standard Penetration Test* (Nspt) dan hambatan ujung (qc) dari uji *Cone Penetration Test* (CPT) sebagai berikut:
Korelasi pada tanah pasir

$$Es\ (KN/m2) = 766*Nspt \quad (6)$$

$$Es = 2\ qc \quad (7)$$

Pada tanah lempung, nilai modulus elastisitas tanah dalam keadaan *undrained* (Eu) pada tanah *normally consolidated* dan *over consolidated* dapat dikorelasikan dengan kohesi (Cu) sebagai berikut:

Tanah lempung normally consolidated (NC)

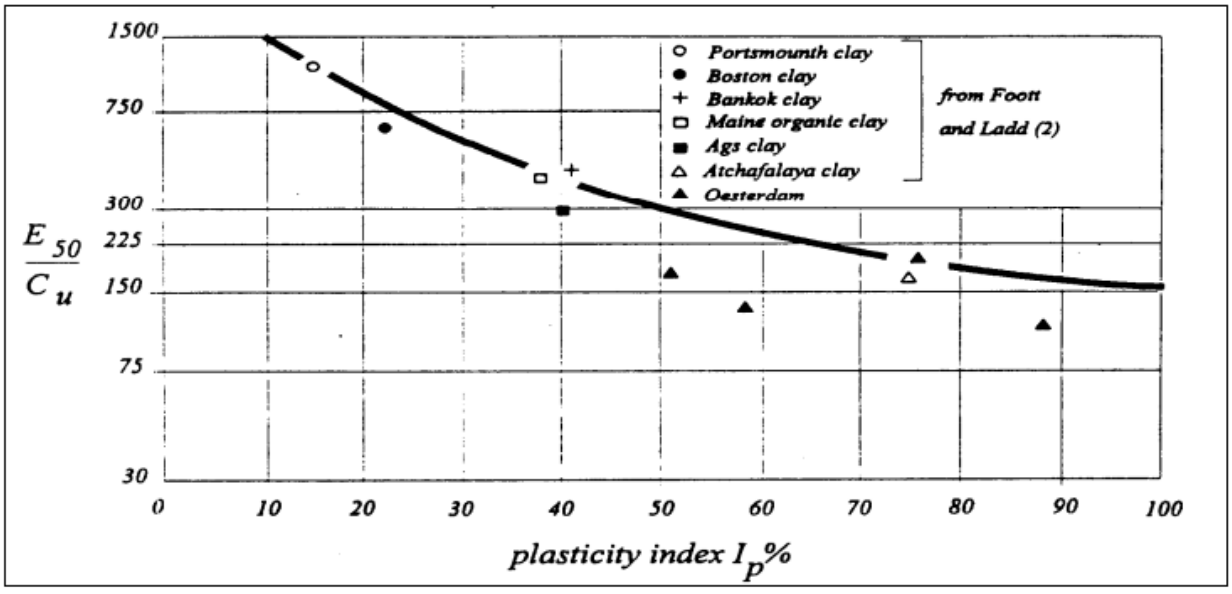
$$Eu = 250\ Cu - 500\ Cu \quad (8)$$

Tanah lempung over consolidated (OC)

$$Eu = 750\ Cu - 1000\ Cu \quad (9)$$

Termaat, Vermeer dan Vergeer (1985) menyatakan bahwa Modulus elastisitas (Eu_{50}) tanah *normally consolidated* (NC) dapat diprediksi berdasarkan parameter kuat geser tanah dalam kondisi *undrained* (Cu), yang besarnya bervariasi antara 1500 Cu – 150 Cu atau dapat dinyatakan dengan perumusan:

$$Eu_{50} \approx \frac{15000\text{Cu}}{Ip(\%)} \quad (10)$$

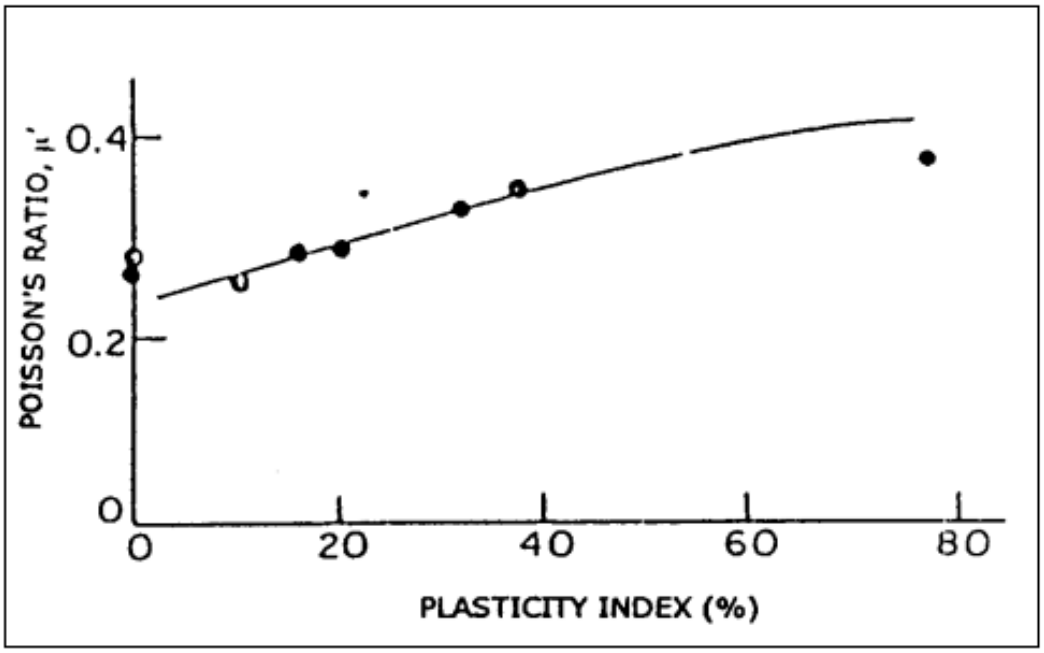


Gambar 5. Hubungan antara Modulus elastisitas E_{50}, kohesi (Cu), dan Indeks Plastisitas (Ip)
Menurut Duncan dan Buchignani (1976), hubungan antara Eu dan cu tergantung dari nilai indeks plastisitas tanah,

seperti ditunjukkan pada Gambar 5; Untuk nilai *Over Consolidated Ratio* (OCR) lebih kecil dari dua (OCR <2) berlaku:

- Eu/cu = 600 untuk nilai Ip = 30
- Eu/cu = 300 untuk nilai Ip = 50%

Menurut Wroth (1975), angka Poisson (Poisson's *ratio*) untuk tanah *normally consolidated* atau sedikit terkonsolidasi (*ligthly consolidated*) dapat diprediksi berdasarkan nilai Indeks plastisitas tanah (Ip) seperti dipresentasikan pada Gambar 6.



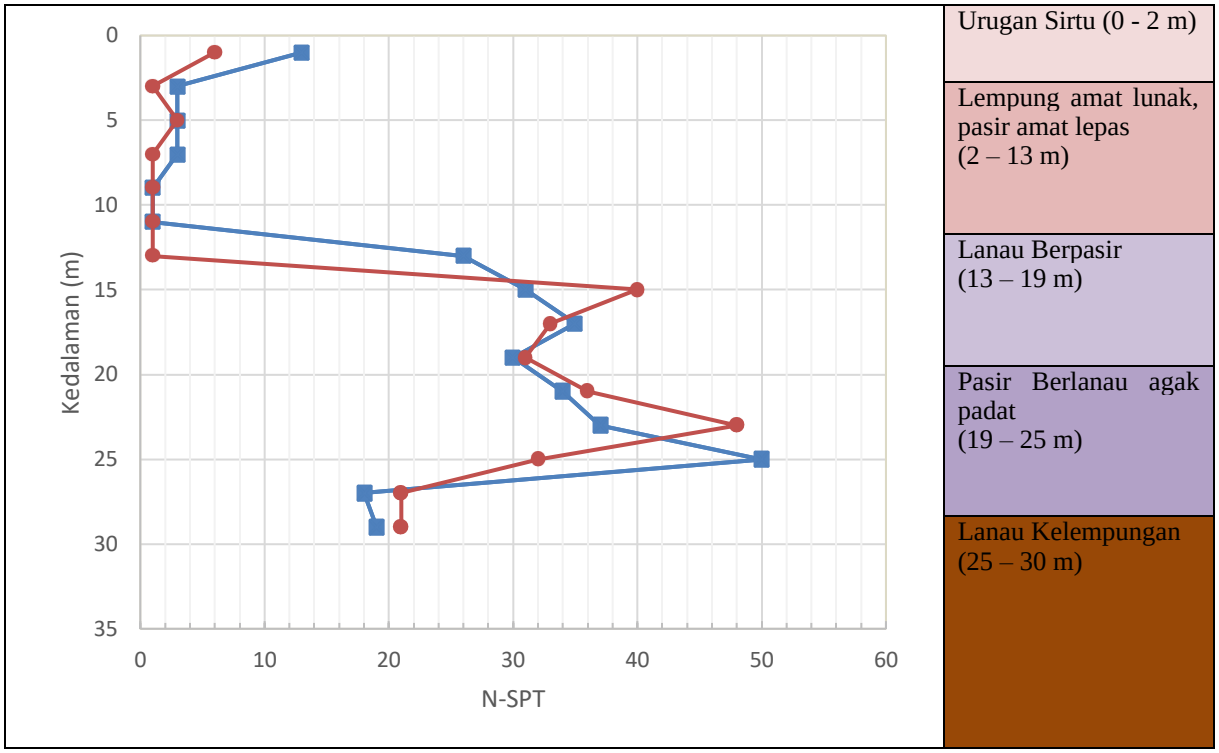
Gambar 6. Hubungan antara angka Poisson dan Indeks Plastisitas

***Monitoring* deformasi struktur penahan galian**

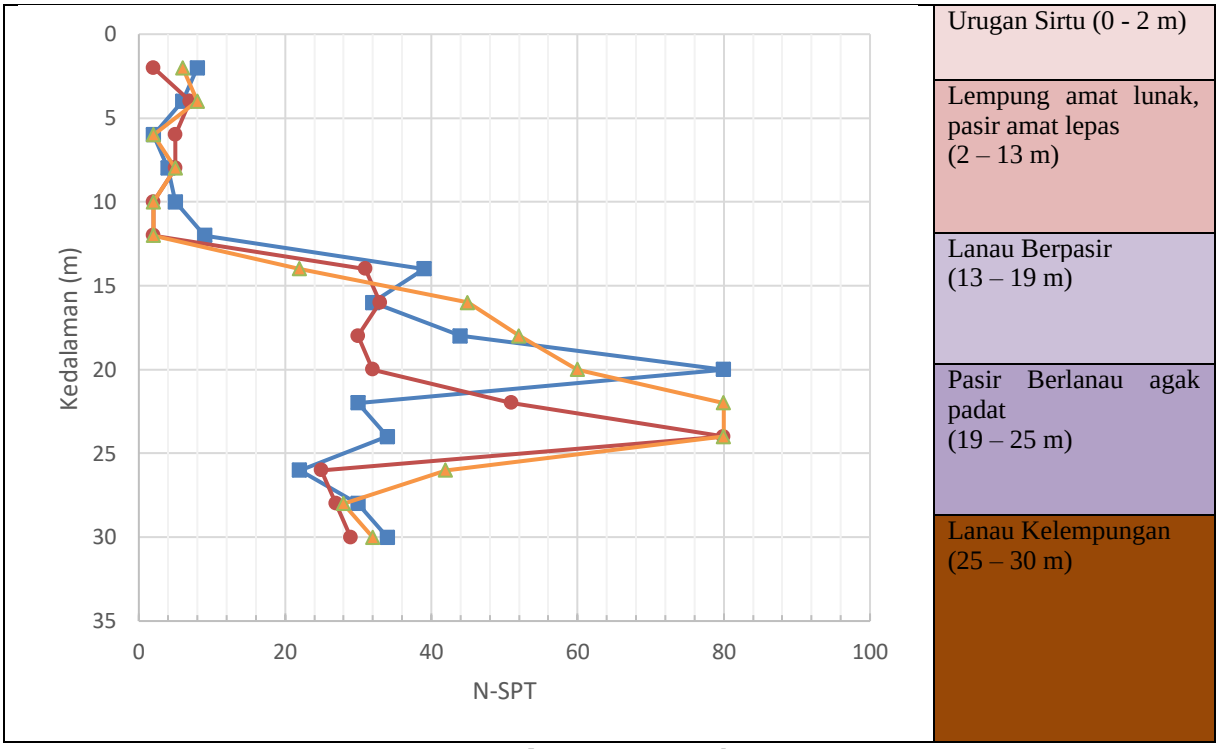
Kegiatan *monitoring* pergerakan/deformasi struktur penahan tanah yang banyak digunakan adalah *inclinometer* yang dapat dipasang (di *install*) di dalam (*embedded*) atau di luar struktur penahan galian. Hasil monitoring instrumen *inclinometer* berupa informasi pergerakan/deformasi struktur penahan tanah ke arah galian dan searah dinding galian. Dalam makalah ini disajikan penggunaan *Iclinometer* yang ditanam di dalam *secant pile* yang direncanakan untuk menahan galian pada lapisan tanah lempung sangta lunak/lunak dengan kealaman galian 3m.

Data tanah

Penggalian *basement* yang dilaksanakan berlokasi di area yang didominasi oleh lapisan tanah lempung sangat lunak/lunak. Penyelidikan tanah yang pertama (Data tanah I) dilaksanakan sebelum proses perencanaan pertama (Perencanaan I). Dalam Perencanaan I disebutkan bahwa struktur penahan galian sedalam 3m adalah *secant pile* berdiameter 80cm, jarak as-ke-as 90cm, dan panjang *secant pile* 9m. Prediksi pergerakan/defleksi *secant pile* pada elevasi permukaan tanah yang dianalisa menggunakan bantuan aplikasi Plaxis dan Geo5 masing-masing adalah 8.56mm dan 8.9mm.
Hasil analisa tersebut diperoleh dengan menggunakan parameter tanah berdasarkan hasil penyelidikan tanah pertama (Data tanah I). Dibandingkan dengan referensi yang dipublikasikan oleh Departemen Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR, 2019), parameter tanah yang dipergunakan dalam perencanaan I (Tabel 3) sangat optimis, sehingga untuk mem-verifikasi perencanaan struktur penahan galian dilakukan pengujian tanah kedua (Data tanah II). Komparasi Data tanah I dan Data Tanah II dirangkum dalam Tabel 2.
Hasil penyelidikan tanah II (Data tanah II) menunjukkan bahwa lapisan tanah di lokasi galian mirip (relatif sama) dibandingkan dengan hasil penyelidikan tanah I (Data tanah I), seperti ditunjukkan masing-masing pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Pengujian tanah II



Gambar 8. Data tanah I

Penentuan parameter tanah untuk analisa menggunakan aplikasi komputer Plaxis

Berdasarkan referensi dan beberapa korelasi parameter kekuatan geser tanah efektif (c' dan ϕ') seperti telah diuraikan di atas, struktur penahan galian direncanakan (Perencanaan II) dengan menggunakan parameter kekuatan geser tanah yang jauh lebih kecil, yaitu:

- Kohesi (efektif) c' = 3-5 KN/m^2

- Sudut geser dalam ϕ’ = 19^o
- Modulus elastisitas E = 2000 KN/m^2

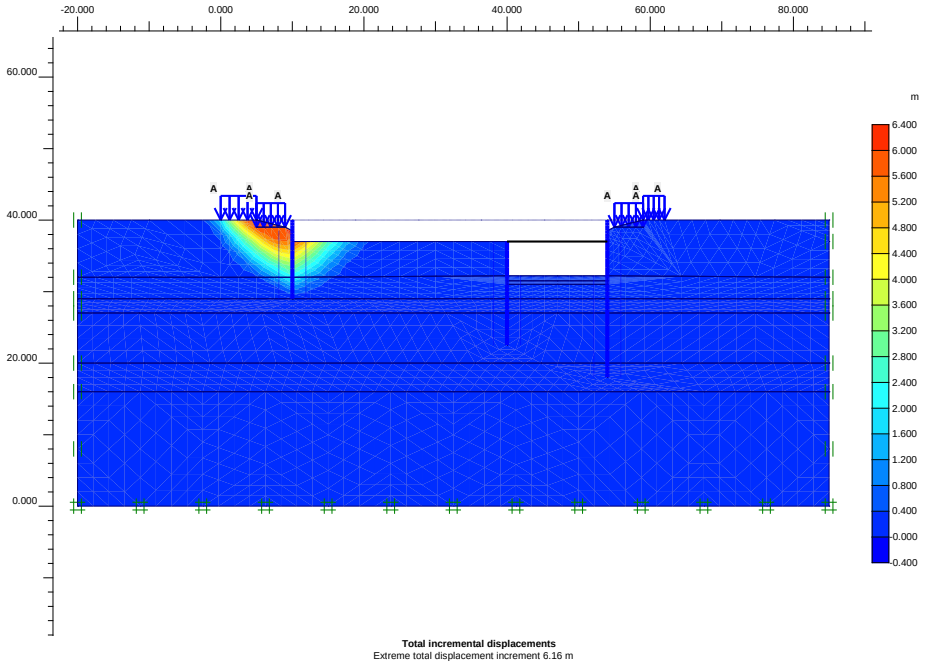
Sedangkan dimensi *secant pile* yang diusulkan berdiameter 50cm, jarak as-ke-as 70cm, dan panjang 12m. Model sistem penahan galian dipresentasikan pada Gambar 9.
Hasil analisa menggunakan aplikasi komputer Plaxis menunjukkan bahwa *secant pile* di elevasi permukaan tanah (*top*) dan ujung tiang (*pile tip*)mengalami pergerakan/defleksi masing-masing sebesar 73mm dan 43mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 10

Tabel 2. Perbandingan hasil penyelidikan tanah

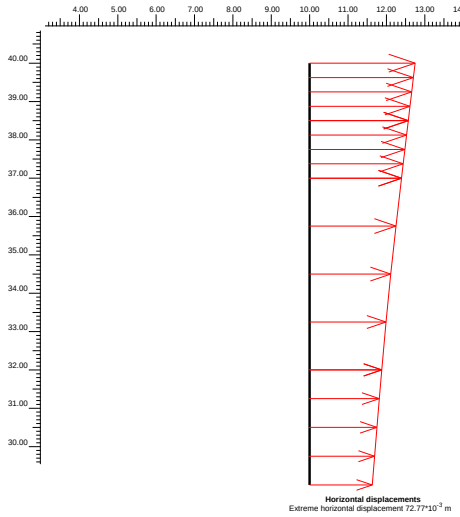
Kedalaman (m)	Penyelidikan tanah I (Data tanah I)							Penyelidikan tanah II (Data tanah II)				
	Bor 1		Bor 2		Bor 3		PI	Bor 1		Bor 2		PI
	c	ϕ^o	c	ϕ^o	c	ϕ^o		c/c’	ϕ^o/ϕ’^{o}	c/c’	ϕ^o/ϕ’^{o}	
2	-	-	-	-	-	-	Antara 30% - 35%	0.11/0.04	- / 21	0.09/0.03	- /19	Antara 20% - 36%
3	0.35	12	0.37	8	0.36	10		-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-		0.06/ -	25/ -	0.10/ -	24/ -	
6	0.36	11	0.36	9	0.30	16		-	-	-	-	
8	-	-	-	-	-	-		0.08/0.05	- / 19	0.07/0.04	- /19	
9	0.38	9	0.34	11	0.37	9		-	-	-	-	
12	0.37	10	0.38	7	0.38	8		0.10	- / -	0.10	3/ -	
15	0.28	16	0.31	14	0.35	11		-	-	-	-	
18	0.30	15	0.29	16	0.33	13		-	-	-	-	

Tabel 3. Data yang digunkan untuk aplikasi Plaxis

Kedalaman, m	Perencanaan I		Perencanaan II	
	Kohesi, c’ (KN/m^2)	Sudut geser dalam, ϕ^o	Kohesi, c’ (KN/m^2)	Sudut geser dalam, ϕ^o
0.0 – 8.0	36.5	8.5	4	21
8.0 – 11.0	34.0	11.0	4	21
11.0 – 13.0	38.0	7.0	4	21
13.0 – 20.0	30.0	15.0		

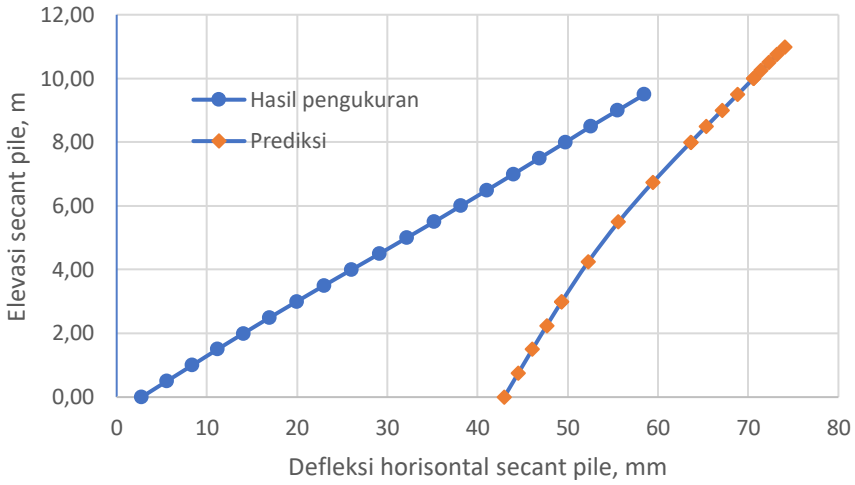


Gambar 9. Model system struktur penahan galian



Gambar 10. Deformasi/defleksi lateral struktur penahan galian (*top* = 73 mm; *tip* = 43 mm)

Prediksi deformasi *secant pile* pada akhir penggalian sedalam 3m (Perencanaan II) dan Hasil pengukuran pergerakan struktur penahan galian yang terpasang dipresentasikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Deformasi secant pile pada galian 3m

Prediksi deformasi *secant pile* berdasarkan perencanaan II menunjukkan kesesuaian dibandingkan dengan hasil monitoring yang terjadi di lapangan selama proses penggalian, dimana prediksi deformasi kepala tiang pada perencanaan adalah 73 mm sedangkan yang terjadi di lapangan 58 mm. Perbedaan yang sangat signifikan terlihat pada pergerakan/defleksi pada ujung *secant pile* (*tip*) dimana pada Perencanaan II ujung *secant pile* diprediksi bergeser sebesar 43 mm, sedangkan berdasarkan hasil monitoring ujung tiang relatif tidak mengalami pergerekan. Disamping itu, dalam Perencanaan II menunjukkan bahwa *secant pile* akan mengalami deformasi *bending* dibandingkan dengan data Hasil pengukuran yang lurus. Hal tersebut menunjukkan bahwa kekakuan *secant pile* jauh lebih besar dibandingkan dengan kekakuan tanah sehingga *secant pile* terlihat tetap lurus (tidak mengalami deformasi *bending*) dari ujung bawah (*tip*) sampai atas (*top*). Dengan kata lain, terlihat bahwa *secant pile* miring seperti akan roboh.
Perbedaan antara Prediksi dan Hasil pengukuran deformasi *secant pile* kemungkinan besar disebabkan oleh pemilihan Modulus elastisitas tanah yang kurang tepat.

Kesimpulan

- Penentuan parameter tanah untuk perencanaan struktur penahan galian sangat penting karena akan mempengaruhi kestabilan galian (*Garbage-in garbage-out*)
- Dalam penentuan parameter tanah sebaiknya memperhatikan beberapa referensi perumusan korelasi, agar diperoleh sebaran nilai tipikal tanah ”secara umum”
- Memasang instrumentasi untuk memonitor pergerakan/deformasi struktur penahan galian

DAFTAR PUSTAKA

Ameratunga, J. and Sivakugan, N. (2016), "Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering", Springer India 2016

Castellanos, B., A,. Brandon, T., L. (2013) A comparison between the shear strength measured with direct shear and triaxial devices on undisturbed and remolded soils, Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Paris, 1, pp 317–320

Duncan, J. M. and Buchignani, A. L. (1976) An engineering manual for settlement studies, Geotechnical Engineering Report, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, USA, 94 p.

Look, G. B. (2007), "Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables", Taylor & Francis.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), Soil Mechanics, John Willey, New York

Sorensen, K. K. and Okkhels, N. (2013), Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013

Schmertmann, J. H. (1970) Static cone to compute static settlement over sand. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM3):1011–1043

Termaat, R. J., Vermeer, P. A. dan Vergeer, G. J. H. (1985), Comparison of prediction and performance of earth structures, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (San Francisco)

Wroth, C. P. (1975) In situ measurement of initial stresses and deformation characteristics. Proceedings conference on in situ measurement of soil properties, vol 1, pp 181–230

Pengaruh Lokasi dan Variasi Ketebalan Dinding Geser Kantilever pada Bangunan Bertingkat Simetris

Grisella Audria Gunawan[1], Ade Lisantono[2,*], Yoyong Arfiadi[3], Junaedi Utomo[4]
[1]*Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta*
[2,3,4]*Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta*
**** e-mail**: ade.lisantono@uajy.ac.id*

ABSTRAK

Struktur bangunan beton bertulang bertingkat dapat mengalami momen guling sebagai akibat dari adanya gaya aksial dan lateral. Selain itu, struktur juga menghasilkan gaya geser yang besar seiring dengan peningkatan struktur sehingga rentan terhadap keruntuhan. Keruntuhan struktur tersebut dapat dicegah dengan menggunakan elemen struktur yang dapat memberikan kekakuan dan kekuatan yang cukup, salah satunya yaitu dinding geser. Dinding geser merupakan elemen vertikal yang menahan beban lateral, seperti beban gempa dan beban angin. Dari permasalahan tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh lokasi dan variasi tebal dinding geser pada bangunan beton bertulang bertingkat. Analisis dilakukan pada bangunan simetris 7 lantai dengan menggunakan analisis Respon Spektrum. Struktur dianalisis dengan bantuan software *SeismoStruct*. Struktur berada di kota Yogyakarta dengan kondisi tanah sedang. Model struktur akan dibagi menjadi empat tipe sesuai dengan lokasi dan variasi ketebalan dinding gesernya. Dinding geser terletak di sudut terluar dan bagian tengah setiap sisi terluar bangunan. Nilai perpindahan kolom dan gaya elemen, baik kolom maupun balok dari empat model akan dibandingkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketebalan dinding geser tidak berpengaruh secara signifikan pada perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen struktur. Sedangkan lokasi dinding geser berpengaruh secara signifikan terhadap perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen strukturnya. Model dengan dinding geser di sudut terluar struktur dan memiliki variasi ketebalan dinding geser merupakan model struktur yang memiliki kekakuan paling baik dibandingkan keempat model lainnya.

Kata kunci: dinding geser kantilever, variasi lokasi, ketebalan, bangunan bertingkat, simetris

1. PENDAHULUAN

Bangunan beton bertulang bertingkat menerima gaya aksial dan lateral yang sesuai dengan ketinggian dan desain strukturnya. Gaya lateral merupakan gaya yang bekerja secara horizontal pada struktur, biasanya berasal dari angin atau gempa. Gaya tersebut menimbulkan momen guling yang menyebabkan keruntuhan pada bangunan. Maka, perlu adanya dinding geser yang sesuai untuk dapat menahan gaya dan momen tersebut secara efektif. Dengan adanya dinding geser, gaya lateral dapat ditransfer ke elemen struktur di bawahnya, yaitu pelat lantai, dinding geser di bawahnya, atau fondasi. Kekakuan lateral struktur juga dapat bertambah yang memperkuat lantai, atap, dan elemen struktur lainnya untuk tetap di posisinya atau tidak bergoyang secara berlebihan.

Dinding geser memberikan pengaruh yang signifikan pada struktur (Bongilwar dkk., 2018). Struktur dengan dinding geser dapat memperkecil periode osilasi struktur sehingga menunjukkan bahwa struktur dengan dinding geser mempunyai kekakuan yang yang lebih tinggi daripada struktur tanpa dinding geser. Dengan adanya dinding geser, kekakuan struktur meningkat dan kerusakan akibat gaya lateral dapat dihindari. Gaya horizontal akan ditanggung oleh dinding geser jika dimensinya cukup besar. Jika dibandingkan dengan struktur dengan dinding geser, gaya aksial dan momen di kolom akan mencapai maksimum pada struktur tanpa dinding geser (Rahangdale & Satone, 2013). Lokasi dinding geser yang sesuai berpengaruh pada gaya pada elemen dan besarnya perpindahan struktur. Variasi letak dinding geser memberikan efek pada besarnya gaya geser dan momen lentur kolom di setiap tingkatnya (Kaur dkk., 2019). Semakin jauh dinding geser dari pusat gravitasi struktur, besarnya gaya batang akan meningkat.

Berdasarkan latar belakang tersebut, peneliti akan menganalisis pengaruh lokasi dan variasi ketebalan dinding geser kantilever pada bangunan simetris 7 lantai. Analisis akan dilakukan menggunakan software *SeismoStruct Academic Version*. Hasil dari penelitian ini akan ditunjukkan melalui nilai perpindahan kolom dan gaya elemen strukturnya.

2. LANDASAN TEORI

Bangunan Simetris

Berdasarkan SNI 1726, 2019 Pasal 7.3.2 tentang klasifikasi struktur beraturan dan tidak beraturan, bangunan tidak beraturan diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi horizontal dan vertikal. Bangunan simetris yaitu bangunan yang tidak mengalami ketidakberaturan horizontal. Struktur dengan ketidakberaturan horizontal dibagi menjadi beberapa tipe sebagai berikut.

a. Ketidakberaturan Torsi
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika simpangan antar tingkat maksimum (torsi yang dihitung termasuk torsi tidak terduga) di ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,2 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur.
b. Ketidakberaturan Torsi Berlebih
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika simpangan antar tingkat maksimum (torsi yang dihitung termasuk torsi tidak terduga) di ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,4 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur.
c. Ketidakberaturan Sudut Dalam
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan.
d. Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika terdapat diafragma dengan diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk daerah bukaan lebih besar dari 50% daerah diafragma bruto yang melingkupinya, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.
e. Ketidakberaturan Pergeseran Melintang Terhadap Bidang
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang elemen vertikal penahan gaya lateral.
f. Ketidakberaturan Sistem Nonparalel
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika elemen vertikal penahan gaya lateral tidak simetris terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem penahan gaya seismik.

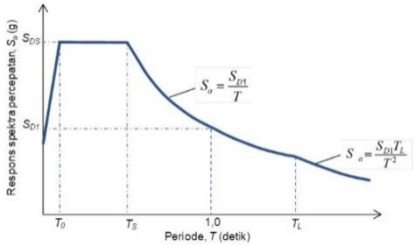
Dinding Geser Kantilever

Sistem struktur tahan gempa dapat berupa sistem rangka pemikul momen yang menggunakan balok dan kolom sebagai struktur utama untuk menahan beban lateral. Selain itu, dinding geser kantilever (*cantilever shear wall*) dapat menahan gaya lateral tersebut akibat gempa atau angin. Dinding geser merupakan dinding rangka yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur gedung terhadap beban lateral (Setia dkk., 2021). Saat terjadi gempa, dinding geser pada gedung bertingkat berperan penting dalam menopang lantai dan memastikannya tidak runtuh (Hasan & Astira, 2013). Hal ini disebabkan oleh kekakuan dinding geser yang lebih besar daripada elemen rangka biasa sehingga dapat menahan beban lateral yang lebih besar dan juga meminimalisir simpangan antar lantai (Nawy, 2009).

Dinding geser adalah pelat beton bertulang yang dipasang secara vertikal pada sisi gedung yang berfungsi menambah kekakuan struktur dan menyerap gaya geser yang meningkat seiring dengan peningkatan ketinggian struktur (Karna dkk., 2018). Dinding geser dapat menahan kombinasi beban lateral, momen, dan beban aksial (Park & Paulay, 1974). Ketebalan dinding geser akan berpengaruh pada beban aksial yang diberikan ke elemen di bawahnya, sehingga berpengaruh pada kekuatan geser dari dinding geser. Kekuatan geser dari dinding geser dihitung dengan rumus $\frac{V_u}{b.l}$, maka semakin besar luas penampang dinding geser, semakin kecil kekuatan gesernya.

Analisis Respon Spektrum

Analisis respon spektrum adalah metode analisis dinamik yang mengukur setiap mode getaran untuk menunjukkan respons seismik maksimum dari struktur. Respon spektrum gempa adalah grafik hubungan antara periode getar (T) dengan respon percepatan gempa (Sa).



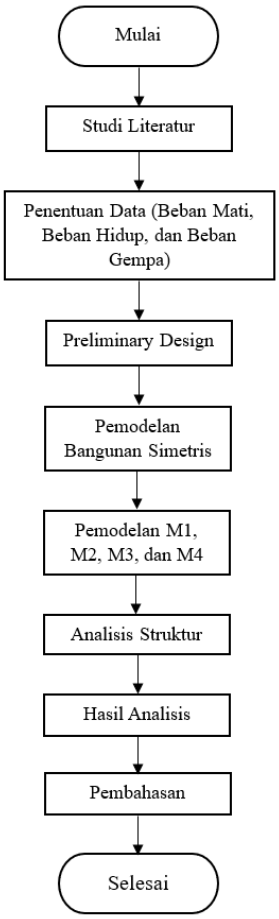
Gambar 1. Respon Spektrum

Perpindahan (*Displacement*)

Perpindahan terjadi ketika struktur dikenai beban aksial dan lateral seperti beban gempa dan angin. Perpindahan bergantung pada ketinggian dan kelangsingan struktur (Sandeep G S & Patil, 2017). *Displacement* akan meningkat seiring bertambahnya ketinggian bangunan karena struktur lebih fleksibel terhadap beban.

3. METODE PENELITIAN

Secara garis besar, metodologi penelitian dalam penelitian ini ditunjukkan melalui bagan alir seperti Gambar 2. Struktur dimodelkan sesuai dengan SNI 2847, 2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan SNI 1726, 2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Analisis struktur dilakukan pada *SeismoStruct* dengan metode analisis respon spektrum. Detail struktur ditunjukkan pada Tabel 1. Ketebalan dinding geser untuk model tanpa variasi ketebalan yaitu 300 mm. Model dengan variasi ketebalan memiliki ketebalan dinding geser untuk lantai 1 sampai dengan 3 sebesar 300 mm, 250 mm untuk lantai 4 s.d. 5, dan 200 mm untuk lantai 6 s.d. 7.

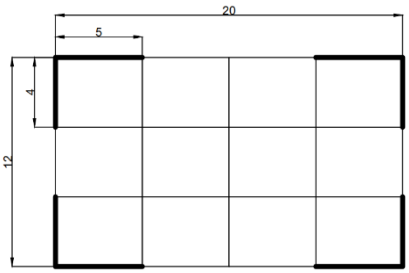
Terdapat empat model bangunan dengan lokasi dan ketebalan dinding geser yang divariasikan seperti pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 6. Berikut penjelasan mengenai model yang dianalisis:

a. M1: Bangunan Simetris dengan dinding geser di sudut terluar tanpa variasi ketebalan
b. M2: Bangunan Simetris dengan dinding geser di sudut terluar dengan variasi ketebalan
c. M3: Bangunan Simetris dengan dinding geser di bagian tengah setiap sisi terluar tanpa variasi ketebalan
d. M4: Bangunan Simetris dengan dinding geser di bagian tengah setiap sisi terluar dengan variasi ketebalan

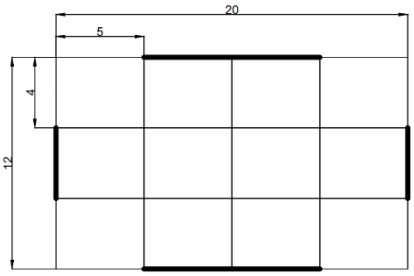
Tabel 1. Detail Struktur

Kota	Yogyakarta
Luas Struktur per lantai	240 m^2
Tinggi antar lantai	3 m
Jumlah lantai	7

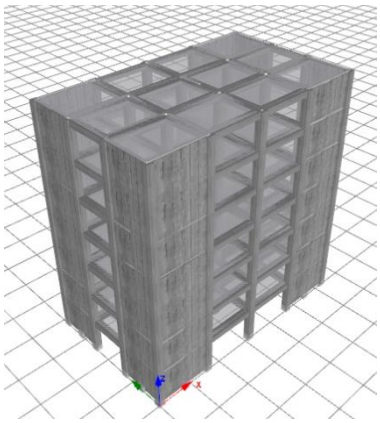
Material	Beton f'c 30 MPa Tulangan fy 420 MPa dan 280 MPa
Dimensi Balok	350 x 500 mm
Dimensi Kolom	600 x 600 mm
Tebal Pelat Lantai	150 mm
Beban Mati	2,28 kN/m^2
Beban Hidup	4 kN/m^2
Kategori risiko	II
Faktor Keutamaan Gempa (I_e)	1
R	8
Ω_0	3
C_d	5,5
Kelas Situs	Tanah sedang (SD)
KDS	D



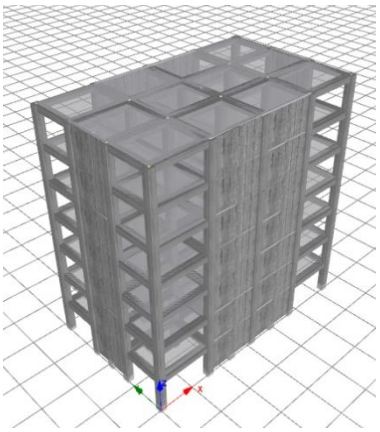
Gambar 6. Tampak Atas M1 dan M2



Gambar 5. Tampak Atas M3 dan M4



Gambar 4. M1 dan M2 dalam Bentuk 3 Dimensi



Gambar 3. M3 dan M4 dalam Bentuk 3 Dimensi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

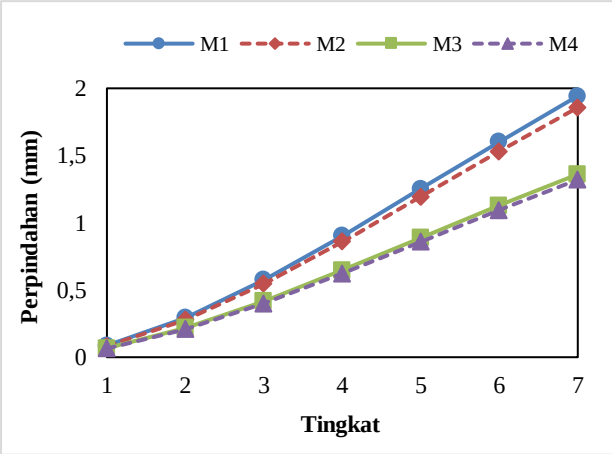
Perpindahan Elemen Kolom

Nilai perpindahan akan bertambah seiring dengan bertambahnya ketinggian struktur. Tingkat struktur teratas mengalami ayunan (deformasi) yang paling besar akibat gaya lateral karena kekakuan struktur yang lebih rendah daripada tingkat-tingkat sebelumnya. Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada Tabel 2 yang menunjukkan perpindahan kolom yang terletak pada sudut terluar struktur, baik dari arah X maupun arah Y.

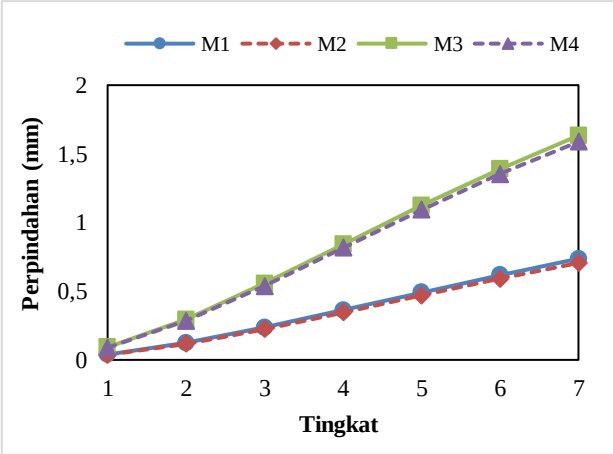
Tabel 2. Perpindahan Kolom di Sudut Terluar Struktur

Tingkat	Nilai Perpindahan (mm)							
	Arah-X				Arah-Y			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
1	0,0875	0,0829	0,0672	0,0645	0,0388	0,0369	0,0920	0,0891
2	0,2941	0,2787	0,2174	0,2086	0,1241	0,1179	0,2947	0,2852
3	0,5763	0,5456	0,4175	0,4003	0,2362	0,2242	0,5560	0,5378
4	0,9038	0,8584	0,6468	0,6229	0,3620	0,3450	0,8409	0,8158
5	1,2519	1,1924	0,8884	0,8583	0,4915	0,4695	1,1241	1,0922
6	1,6018	1,5297	1,1290	1,0945	0,6176	0,5913	1,3899	1,3522
7	1,9431	1,8573	1,3606	1,3206	0,7367	0,7054	1,6333	1,5877

Dari keempat model, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) memiliki nilai perpindahan yang sedikit lebih kecil daripada M1 dan M3. Struktur dengan dinding geser di sudut (M1 dan M2) mengalami penurunan perpindahan sekitar 4%, sedangkan dinding geser yang terletak di sisi tengah terluar struktur (M3 dan M4) mengalami penurunan sekitar 3%. Berdasarkan Gambar 7 dan 8, Tipe M2 merupakan model yang paling efektif karena nilai perpindahan pada arah Y turun sebesar 55,6%, jika dibandingkan dengan tipe M4. Sama halnya dengan penelitian ini, menurut Ahamad & Pratap (2020) serta Rao & Narasaiah (2022) bahwa lokasi dinding geser pada sudut bangunan merupakan lokasi paling optimum dalam menahan gaya lateral.



Gambar 8. Perpindahan Arah X pada Kolom di sudut Terluar



Gambar 7. Perpindahan Arah Y pada Kolom di Sudut Terluar

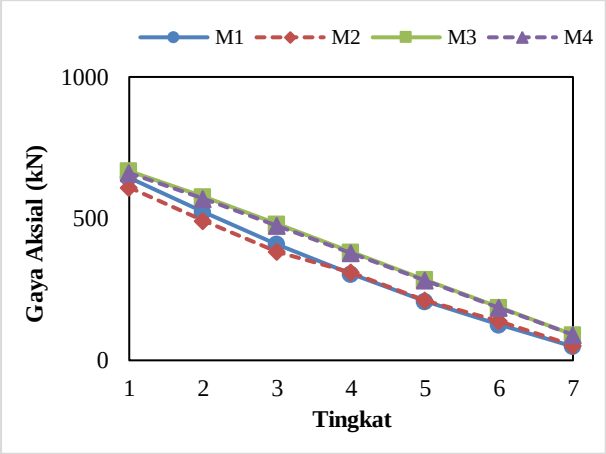
Gaya Aksial Kolom

Gaya aksial kolom dari keempat model struktur ditunjukkan pada Tabel 3. Tipe kolom K1 adalah kolom yang terletak di dekat dinding geser, sedangkan K10 adalah kolom yang terletak jauh dari dinding geser. Berdasarkan Gambar 9 dan 10, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) tidak memberikan pengaruh yang signifikan jika dibandingkan dengan struktur tanpa variasi ketebalan dinding geser (M1 dan M3). Lokasi dinding geser di sudut terluar struktur (M2) dapat mengurangi gaya aksial kolom K1 sebesar 21,55%. Namun, gaya aksial kolom K10 meningkat sebesar 6,87%.

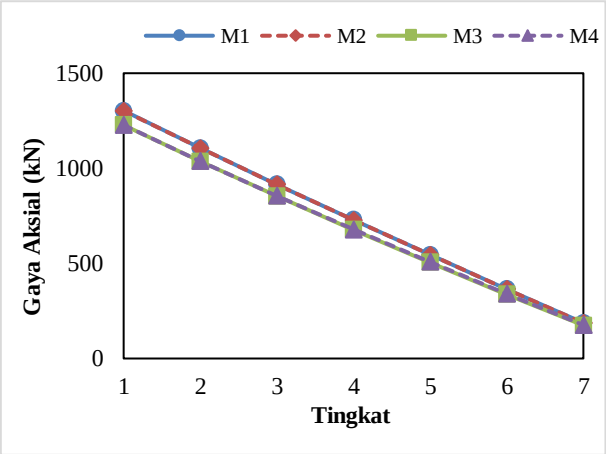
Tabel 3. Gaya Aksial Kolom

Tingkat	Kolom	Gaya Aksial (kN)				Rasio (%)		
		M1	M2	M3	M4	M1 & M2	M3 & M4	M2 & M4
1	K1	644,312	610,061	668,078	661,124	5,61	1,05	-7,72
	K10	1303,263	1302,233	1227,067	1227,494	0,08	-0,03	6,09
2	K1	523,560	493,009	576,937	570,684	6,20	1,10	-13,61
	K10	1107,062	1106,080	1036,699	1037,405	0,09	-0,07	6,62
3	K1	409,489	383,087	480,623	475,605	6,89	1,06	-19,45

	K10	916,277	915,388	853,932	855,240	0,10	-0,15	7,03
4	K1	304,649	310,628	382,456	378,845	-1,92	0,95	-18,01
	K10	729,504	728,734	677,279	679,225	0,11	-0,29	7,29
5	K1	207,747	210,993	284,098	281,801	-1,54	0,82	-25,13
	K10	546,119	545,519	505,735	508,136	0,11	-0,47	7,36
6	K1	125,702	138,832	187,040	185,741	-9,46	0,70	-25,25
	K10	364,913	364,500	337,634	340,086	0,11	-0,72	7,18
7	K1	48,658	52,607	90,747	90,201	-7,50	0,61	-41,68
	K10	187,428	187,236	174,409	175,803	0,10	-0,79	6,50
Rata-Rata					**K1**	**-0,25**	**0,90**	**-21,55**
					K10	**0,10**	**-0,36**	**6,87**



Gambar 10. Gaya Aksial Kolom K1



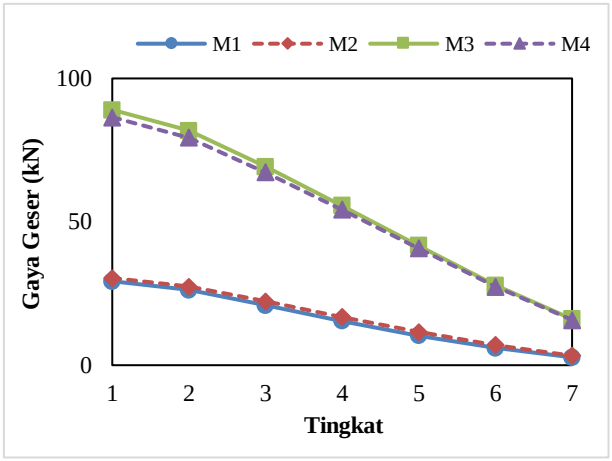
Gambar 9. Gaya Aksial Kolom K10

Gaya Geser Kolom dan Balok

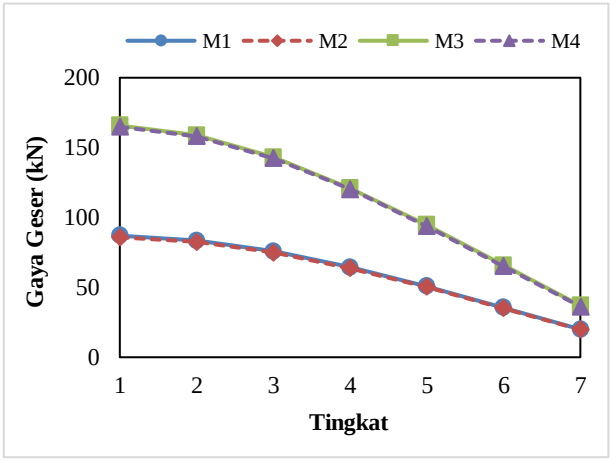
Gaya geser elemen struktur akan berpengaruh pada kekakuan dan kekuatan struktur tersebut. Besarnya gaya geser kolom untuk setiap model struktur ditunjukkan pada Tabel 4. Pada kolom K1, struktur dengan dinding geser di sudut terluar (M2) memiliki gaya geser rata-rata 70,09% lebih kecil daripada struktur dengan dinding geser di sisi tengah (M4). Sama halnya dengan kolom K10, tipe M2 memiliki gaya geser rata-rata 46,90% lebih kecil daripada tipe M4 sehingga tipe M2 lebih kaku. Berdasarkan Gambar 11 dan 12, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) hanya memberikan pengaruh yang kecil jika dibandingkan dengan struktur tanpa variasi ketebalan (M1 dan M3).

Tabel 4. Gaya Geser Kolom

Tingkat	Kolom	Gaya Geser (kN)				Rasio (%)		
		M1	M2	M3	M4	M1 & M2	M3 & M4	M2 & M4
1	K1	29,288	30,408	89,077	86,493	-3,68	2,90	-64,84
	K10	86,987	85,796	165,765	164,886	1,39	0,53	-47,97
2	K1	26,229	27,454	81,823	79,425	-4,46	2,93	-65,43
	K10	83,555	82,461	158,852	158,057	1,33	0,50	-47,83
3	K1	20,884	22,258	69,246	67,235	-6,18	2,90	-66,89
	K10	75,699	74,779	143,129	142,378	1,23	0,52	-47,48
4	K1	15,373	16,846	55,655	54,254	-8,75	2,52	-68,95
	K10	64,379	63,707	120,946	120,189	1,05	0,63	-46,99
5	K1	10,328	11,640	41,648	40,713	-11,28	2,24	-71,41
	K10	50,711	50,203	94,626	93,786	1,01	0,89	-46,47
6	K1	6,046	7,093	27,858	27,364	-14,76	1,77	-74,08
	K10	35,458	35,135	65,779	65,013	0,92	1,17	-45,96
7	K1	2,746	3,315	16,079	15,793	-17,19	1,78	-79,01
	K10	19,978	19,759	36,986	36,321	1,11	1,80	-45,60
Rata-Rata					**K1**	**-9,47**	**2,44**	**-70,09**
					K10	**1,15**	**0,86**	**-46,90**



Gambar 11. Gaya Geser Kolom K1



Gambar 12. Gaya Geser Kolom K10

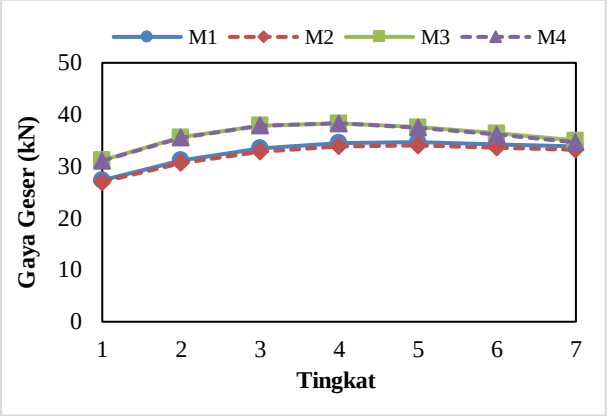
Tabel 5 menunjukkan gaya geser balok yang terletak di dekat dinding geser (B2) dan balok yang terletak jauh dari dinding geser (B8). Pada balok B2 dan B8, struktur dengan dinding geser di sudut terluar (M2) memiliki gaya geser rata-rata 10% lebih kecil daripada struktur dengan dinding geser di sisi tengah (M4). Sama halnya dengan penelitian yang dilakukan oleh Harne (2014) bahwa gaya geser balok pada struktur dengan dinding geser di sisi tengah mengahasilkan gaya geser yang cukup besar jika dibandingkan dengan struktur dengan dinding geser di sudut terluar. Berdasarkan Gambar 13 dan 14, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) hanya memberikan pengaruh yang kecil jika dibandingkan dengan struktur tanpa variasi ketebalan (M1 dan M3).

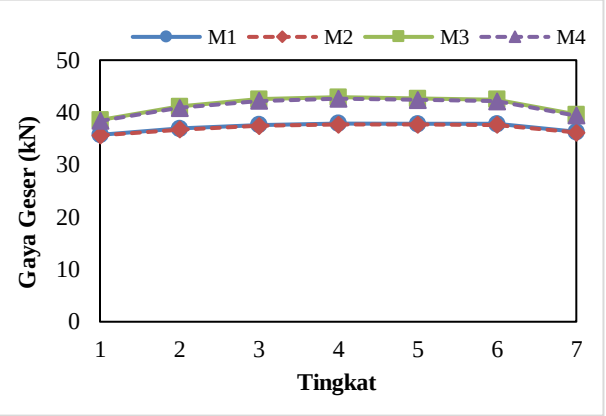
Tabel 5. Gaya Geser Balok

Tingkat	Balok	Gaya Geser (kN)				Rasio (%)		
		M1	M2	M3	M4	M1 & M2	M3 & M4	M2 & M4
1	B2	27,315	27,015	31,168	31,087	1,11	0,26	-13,10
	B8	35,725	35,615	38,554	38,374	0,31	0,47	-7,19
2	B2	31,196	30,690	35,626	35,572	1,65	0,15	-13,73
	B8	36,920	36,743	41,153	40,858	0,48	0,72	-10,07
3	B2	33,480	32,853	37,905	37,907	1,91	-0,01	-13,33
	B8	37,592	37,405	42,505	42,190	0,50	0,74	-11,34
4	B2	34,532	33,895	38,319	38,335	1,88	-0,04	-11,58
	B8	37,876	37,704	42,931	42,633	0,45	0,70	-11,56
5	B2	34,681	34,047	37,576	37,506	1,86	0,19	-9,22
	B8	37,835	37,681	42,683	42,390	0,41	0,69	-11,11
6	B2	34,293	33,652	36,419	36,164	1,90	0,70	-6,94
	B8	37,807	37,646	42,449	42,116	0,43	0,79	-10,61
7	B2	33,870	33,214	34,996	34,656	1,98	0,98	-4,16
	B8	36,264	36,146	39,612	39,382	0,33	0,59	-8,22
Rata-Rata					**B2**	**1,76**	**0,32**	**-10,30**
					B8	**0,41**	**0,67**	**-10,01**

Gambar 13. Gaya Geser Balok B2

Gambar 14. Gaya Geser Balok B8





5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

Struktur dengan variasi ketebalan dinding geser mengakibatkan penurunan perpindahan kolom sebesar 3% sampai dengan 4% dan model struktur tersebut hanya memberikan sedikit perbedaan (±1%) pada gaya aksial kolom dan gaya geser kolom dan balok. Dengan demikian ketebalan dinding geser tidak berpengaruh secara signifikan pada nilai perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen strukturnya, baik balok maupun kolom. Sedangkan lokasi dinding geser berpengaruh secara signifikan pada nilai perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen strukturnya, baik balok maupun kolom. Hal ini terlihat dari hasil studi bahwa pada model M2, nilai perpindahan kolom arah Y turun sebesar 55,6%, gaya aksial kolom turun sebesar 21,55%, gaya geser kolom turun sebesar 46,90%, dan gaya geser balok turun sebesar 10% jika dibandingkan dengan model M4 (struktur dengan dinding geser di bagian tengah setiap sisi terluar dan memiliki variasi ketebalan). Dengan demikian, dapat disimpulkan pula bahwa model M2 yang merupakan struktur dengan dinding geser di sudut terluar dan memiliki variasi ketebalan dinding geser menjadi model yang paling baik dari keempat model karena nilai perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen struktur yang paling kecil.

DAFTAR PUSTAKA

Ahamad, S. A., & Pratap, K. V. (2020). Dynamic analysis of G+20 multi storied building by using shear walls in various locations for different seismic zones by using Etabs. *Materials Today: Proceedings*, *43*, 1043–1048. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.014

Bongilwar, R., Harne, V. R., & Chopade, A. (2018). Significance of Shear Wall in Multi-Storey Structure with Seismic Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *330*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012131

Harne, V. R. (2014). Comparative Study of Strength of RC Shear Wall at Different Location on Multi-storied Residential Building. Dalam *International Journal of Civil Engineering Research* (Vol. 5, Nomor 4). http://www.ripublication.com/ijcer.htm

Hasan, A., & Astira, I. F. (2013). Studi Kasus : Proyek Apartemen The Royale Springhill Residences. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, *1*(1).

Karna, I. P. B. B., Giri, I. B. D., & Putra, D. (2018). Perbandingan Perilaku Struktur Bangunan Tanpa dan Dengan Dinding Geser Beton Bertulang. *Jurnal Ilmiah Elektronik Infrastruktur Teknik Sipil*.

Kaur, D., Singh, B., & Kumar, A. (2019). Optimization of the Location of Shear Wall in a Multistory Building. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, *9*(2), 3981–3983. https://doi.org/10.35940/ijitee.B7298.129219

Nawy, E. G. (2009). *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach* (6 ed.). Prentince Hall.

Park, R., & Paulay, T. (1974). *Reinforced Concrete Structure*. Wiley Interscience Publication.

Rahangdale, H., & Satone, S. R. (2013). Design And Analysis Of Multistoreied Building With Effect Of Shear Wall. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, *3*, 223–232. www.ijera.com

Rao, T. B., & Narasaiah, M. V. (2022). Study of P-Delta Effect in High-Risr Buildings With and Without Shear Wall. *Journal of Biogeneric Science and Research*, *7*(1). www.biogenericpublishers.com

Sandeep G S, & Patil, G. (2017). Comparative Study Of Lateral Displacement and Storey Drift Of Flat Slab and Conventional Slab Structures in Different Seismic Zones. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, *8*(7), 567–580.

Setia, L., Wibowo, B., & Zebua, D. (2021). Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil Analisis Pengaruh Lokasi Dinding Geser Terhadap Pergeseran Lateral Bangunan Bertingkat Beton Bertulang 5 Lantai. *Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil*, *4*.

SNI 1726. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standarisasi Nasional.
SNI 2847. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional.

PENGARUH PENAMBAHAN BESTMITTEL TERHADAP KUAT TEKAN DAN KUAT TARIK BELAH BETON

Asrul Sani Nafis Sabila Yusro[1], Ivan Arya Buana .[1]
Widija Suseno Widjaja[2,] Gabriel Jose Posenti Ghewa[2]

[1]*Mahasiswa Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: 22b10101@student.unika.ac.id
[2]*Mahasiswa Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: 22b10103@student.unika.ac.id
[3]*Dosen Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: widija@unika.ac.id
[4]*Dosen Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: ghewa@unika.ac.id

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kuat tekan beton maksimum dan kuat tarik belah beton maksimum dengan bahan tambah Bestmittel. Penelitian ini menggunakan persentase Bestmittel 0,3% dan 0,6% dari berat semen. Penelitian ini dilakukan pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah, dengan benda uji silinder beton berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah beton dilakukan setelah beton berumur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Penambahan Bestmittel pada umur beton 7 hari yang memberikan kuat tekan maksimum pada presentase Bestmittel 0,6% yaitu sebesar 12,549 MPa. Pada umur beton 14 hari kuat tekan maksimum pada persentase Bestmittel 0,6% yaitu sebesar 17,645 MPa. Pada umur beton 28 hari kuat tekan maksimum juga pada persentase Bestmittel 0,6% yaitu sebesar 19,155 MPa. Bila ditinjau dari beton normal, beton dengan penambahan Bestmittel umur 7 hari mengalami penambahan kuat tekan sebesar 2,307 %, dan beton dengan penambahan Bestmittel umur 14 hari, dan 28 hari mengalami penambahan kuat tekan sebesar 6,25% dan 3,57%. Pengaruh penambahan Bestmittel untuk kuat tarik belah adalah menambah kuat tarik belah beton sebesar 2,31 MPa mengalami penambahan sebesar 7,62% dari beton normal. Penambahan Bestmittel bisa meningkatkan kuat tekan beton sesuai ketentuan pemakaian yang sudah ditentukan.

Kata Kunci: Beton, Bestmittel, Kuat tekan, dan Kuat tarik belah.

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Berdasarkan SNI 2847:2013 definisi beton adalah campuran antara semen Portland atau semen hidrolik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat. Beton merupakan bahan dari campuran antara *portland cement*, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), air dengan tambahan adanya rongga-rongga udara. Seiring dengan kemajuan yang ada, proses modifikasi terhadap beton sering dilakukan untuk mencari bahan material pengganti maupun pendukung yang efisien dan tepat. Penambahan zat kimia bertujuan untuk mengubah satu atau lebih sifat-sifat beton baik dalam keadaan segar atau setelah mengeras. Penelitian dengan bahan tambah pernah dilakukan Sriyadi (2010) tentang variasi pemakaian bahan tambah abu sekam padi dan bestmittel terhadap kuat tekan beton dan diperoleh hasil penambahan bestmittel dan abu sekam pada umur beton 14 hari yang memberikan kuat tekan maksimum pada persentase abu sekam 10 % yaitu sebesar 11,250 MPa. Pada umur beton 28 hari kuat tekan maksimum tetap pada persentase abu sekam 10 % yaitu sebesar 16,071 MPa, selanjutnya untuk penambahan 20% mengalami pengurangan kuat tekan sebesar

7,379 MPa dan 30% sebesar 4,118 MPa. Bila ditinjau dari beton normal, beton dengan penambahan bestmittel dan abu sekam pada fas 0,35 umur 14 hari mengalami penambahan kuat tekan sebesar 9,467 %, sedangkan untuk umur 28 hari mengalami penambahan sebesar 2,155 %. Pengaruh penambahan abu sekam untuk kuat tarik adalah menurunkan kuat tarik belah beton. Berdasarkan hal tersebut, maka pada penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui peningkatan kuat tekan dan kuat tarik beton dengan bahan tambah fokus pada bestmittel dengan presentase 0,3% dan 0,6% dari berat semen, pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Apa pengaruh penambahan bestmittel pada kuat tekan dan kuat tarik belah beton?
2. Berapa nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton tertinggi yang didapatkan menggunakan bestmittel dengan perbandingan sesuai rencana?

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh penambahan bestmittel terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah pada beton dengan waktu perawatan 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.
2. Mendapatkan kuat tekan dan kuat tarik belah tertinggi pada beton dengan penambahan bestmittel dan konsentrasi sesuai rencana.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan pengetahuan dan ilmu mengenai penelitian kuat tekan dan kuat tarik belah silinder beton dari penambahan bestmittel dengan waktu perawatan 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.
2. Mendapatkan manfaat teoritis, untuk pengembangan dan inovasi teknologi beton.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bahan yang digunakan dalam pembuatan beton:
   a. Semen yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Semen PCC (*Portland Composite Cement*) dengan merek Tiga Roda.
   b. Air yang digunakan adalah air yang diambil dari sumur artetis Kampus Universitas Katolik Soegijapranata.
   c. Benda uji yang digunakan adalah silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
   d. Agregat halus yang digunakan adalah pasir Muntilan.
   e. Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah dari Kota Jogjakarta yang lolos saringan ¾ inci.
   f. Bahan tambahan yang digunakan adalah bestmittel dengan konsentrasi 0,3%, dan 0,6% dari berat semen.
   g. Pengujian terhadap beton kuat tekan dan kuat tarik belah beton dilakukan pada beton yang sudah berumur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.
   h. Jumlah benda uji yang akan dilakukan berjumlah 36 sampel, untuk kuat tekan dan kuat tarik belah beton dengan benda uji berbentuk silinder beton.
2. Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah silinder dilakukan di Laboratorium Konstruksi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata.
3. Pada penelitian ini menggunakan *mix design* mengacu pada peraturan beton Indonesia (SNI 7394-2008).
   Kuat tekan dan kuat tarik belah beton tidak memiliki nilai minimal.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton

Pada proses pekerjaan konstruksi, pengertian beton adalah campuran dari semen *portland* atau semen hidrolis lainnya agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk masa padat (SNI-03-2847-2002). Beton tersusun dari agregat halus dan agregat kasar. Agregat adalah material

granular misalnya kerikil, pasir, batu pecah, dan kerak tungku pijar yang dipakai bersama dengan suatu media pengikat untuk membentuk suatu beton atau adukan semen hidrailik (SNI-03-2847-2002). Beton harus mempunyai kemampuan dalam *workability* yang baik. *Workability* adalah tingkat kemudahan pengerjaan beton dalam mencampur, mengaduk, menuang dalam cetakan dan pemadatan tanpa homogenitas beton berkurang dan beton tidak mengalami bleeding (pemisahan) yang berlebihan untuk mencapai kekuatan beton yang diinginkan, unsur-unsur yang mempengaruhi sifat *workability* antara lain adalah jumlah air yang digunakan dalam campuran adukan beton, penambahan semen dalam campuran, gradasi campuran pasir dan kerikil (Tjokrodimuljo, 2007).

2.2. Material Penyusun Beton

Beton merupakan salah satu faktor penting dalam kekuatan sebuah bangunan. Kualitas beton yang baik dapat diperoleh dari bahan penyusun yang memiliki kualitas baik juga. Selain itu komposisi bahan juga mempengaruhi kualitas beton. Sub bab berikut akan membahas tentang bahan penyusun beton.

2.2.1. Semen *portland*

Semen *Portland* adalah semen hidrolis didapatkan dari proses menggiling terak (*Clinker*) *portland* terutama yang terdiri dari kalsium silikat ($xCaO.SiO_2$) yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih, bentuk kristal senyawa kalsium sulfat ($CaSO_4.xH_2O$) (x merupakan suatu konstanta) dan boleh ditambah dengan bahan lain (*mineral in component*) (SNI 15-2049-2004). Fungsi utama semen adalah mengikat butir-butir agregat hingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara di antara butir-butir agregat, walaupun komposisi semen dalam beton hanya sekitar 10%, namun karena fungsinya sebagai bahan pengikat maka peranan semen menjadi penting (Mulyono, 2004). Pada penelitian ini semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement* (PCC). Semen PCC adalah semen yang diproduksi dengan 2 cara yaitu cara pertama menggiling *clinker* semen dan *pozzolan* dengan bahan tambahan gips atau kalsium sulfat. Cara kedua dengan mencampur sampai rata gerusan semen dan *pozzolan* halus (Tjokrodimuljo, 1996).

2.2.2. Air

Air merupakan salah satu faktor penting dalam pembuatan beton, karena air bereaksi dengan semen akan menjadi pasta pengikat agregat (Meidiani dan Hartawan, 2017). Fungsi air dalam beton adalah untuk membuat semen bereaksi dan sebagai bahan pelumas antara butir-butir agregat. Untuk membuat semen bereaksi hanya dibutuhkan air sekitar 25-30 persen dari berat semen (Tjokrodimuljo, 2007). Syarat air dalam campuran beton SNI 03-6861.1-2002:

1. Kandungan klorida maksimum 0,5 gram/liter,
2. Kandungan lumpur (benda melayang lainnya) maksimum 2 gram/liter,
3. Kandungan garam-garam yang merusak beton (zat organik, asam, dan lain-lain) maksimum 15 gram/liter,
4. Kandungan senyawa sulfat maksimum 1 gram/liter.

2.2.3. Agregat

Menurut Tjokrodimuljo (2008), agregat yaitu butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar. Agregat yang digunakan sekitar 60-70% dari volume adukan beton. Berikut ini merupakan jenis agregat berdasarkan ukuran besar agregatnya:

2.2.3.1. Agregat halus

Menurut SNI 03-6820-2002 agregat halus adalah agregat dengan besar butir maksimal 4,75 mm. Menurut Peraturan Beton Indonesia (PBI) 1971, agregat halus harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut:

a. Pasir terdiri dari butir-butir tajam dan keras. Bersifat kekal yang berarti tidak

mudah lapuk karena pengaruh cuaca, seperti hujan dan panas matahari.

b. Agregat halus tidak mengandung lumpur melebihi 5% jika melebihi maka pasir harus dicuci.
c. Agregat halus tidak mengandung bahan organik terlalu banyak yang dibuktikan menggunakan uji *Abrams-Harder*. Agregat yang tidak memenuhi syarat dapat digunakan kembali apabila kekuatan tekan adukan agregat pada umur 7 dan 28 hari tidak kurang dari 95% dari kekuatan adukan beton dengan agregat yang sama tetapi dicuci dalam larutan 3% NaOH lalu dicuci dengan air hingga bersih pada umur yang sama.
d. Agregat halus terdiri dari butiran-butiran beranekaragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan harus memenuhi syarat berikut:
   d.1. Sisa di atas ayakan 0,25 mm, harus berkisar antara 80% - 90% berat,
   d.2. Sisa di atas ayakan 1 mm, harus minimum 10% berat,
   d.3. Sisa di atas ayakan 4 mm, harus minimum 2% berat.

2.2.3.2. Agregat kasar

Agregat kasar menurut Tjokrodimuljo. (1996) yaitu agregat yang mempunyai ukuran butir-butir besar (antara 5 mm sampai 40 mm). Agregat kasar mempunyai sifat yang akan berpengaruh terhadap kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca dan efek lainnya. Berikut ini adalah syarat-syarat agregat kasar menurut SK SNI S-04-1989-F:

a. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir keras dan tidak berpori,
b. Bersifat kekal, artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca,
c. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%, apabila kadar lumpur melampaui 1% maka agregat kasar harus dicuci
d. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang reaktif terhadap alkali,
e. Modulus halus butir antara 6-7,1 dengan variasi butir sesuai standar gradasi.

2.3. Bahan tambahan (*admixture*)

Bahan tambahan (*admixture*) yaitu bahan yang ditambahkan kedalam campuran beton pada saat melakukan dan selama proses pengerjaan pencampuran beton berlangsung. Bahan tambahan mempunyai fungsi yaitu untuk mengubah sifat yang terdapat pada beton agar menjadi lebih sesuai dalam suatu pekerjaan atau kondisi tertentu.

2.3.1. Bestmittel

Bahan adiktif yang akan dilakukan pada uji coba ini yaitu bestmittel. Bestmittel merupakan bahan tambah kimia berbahan dasar Lignin Sulfonic Acid yang sesuai dengan ASTM–C 494-81 "*standart specification for chemical admixture for concrete*". Bestmittel termasuk jenis bahan tambah kimia tipe-E, *water reducing* dan *accelerating admixture* adalah bahan tambah yang berfungsi ganda mengurangi jumlah air pencampuran yang diperlukan untuk menghasilkan beton dengan konsistensi tertentu dan mempercepat pengikatan beton (Lendrian dkk, 2022). Menurut (Chemie, 2015) bestmittel merupakan formula khusus yang sangat ekonomis dalam proses pengecoran sehingga menjadikan beton lebih cepat keras dalam usia muda serta mengurangi pemakaian air pada saat pengecoran sehingga meningkatkan mutu / kekuatan beton. Bestmittel sangat membantu untuk pengecoran dengan jadwal waktu yang sangat ketat karena beton cepat mengeras pada usia awal (7 – 10 hari) serta meningkatkan mutu / kekuatan beton 5 % - 10 %. Dalam uji coba beton ini menggunakan bestmittel yang di produksi oleh PT. Multi Eraguna Usaha. Terdapat beberapa keunggulan dari pemakaian bestmittel ini, dapat dilihat dibawah ini:

a. Mempersingkat proses pembetonan, cetakan beton dapat dilepas lebih cepat,

b. Mengurangi pemakaian air 5 % - 20 % sehingga menjadikan beton lebih solid dan lebih plastis.



Gambar 2.1 Bestmittel

2.4. Slump Test

Slump test ditujukan untuk mengetahui *workability* pada beton dengan mengukur nilai slump. *Workability* pada beton yaitu pada umumnya dapat dilihat dari homogenitas (kerataan campuran) adukan beton segar, kelekatan pada adukan pasta semen (*cohesivness*), kemampuan alir beton segar (*flowability*), plastisitas adukan beton, kemampuan beton untuk mempertahankan kerekatan dan kelekatan jika adukan dipindah dengan alat angkut (*mobility*). Dalam cara pengukuran nilai *slump*, pengukuran dilakukan pada saat proses pembuatan campuran adukan beton masih segar. Menurut SNI 1972-2008 alat uji yang digunakan untuk pengujian *slump test* terbuat dari bahan logam yang tidak lengket, dan tidak bereaksi dengan pasta semen. Batang penusuk yang digunakan harus terbuat dari batang baja yang lurus dan penampang lingkarannya berdiameter 16 mm dan panjangnya sekitar 600 mm.

2.5. Kuat Tekan Beton

Menurut Tjokrodimulyo, K. (2007), beton mutu baik adalah jika beton tersebut memiliki nilai kuat tekan tinggi. Dengan kata lain mutu beton dapat ditinjau hanya dari kuat tekannya saja. Kuat tekan beton yaitu besarnya beban yang diberikan per satuan luas, yang mengakibatkan beton hancur karena gaya yang dihasilkan oleh mesin uji. Nilai kuat tekan beton didapatkan melalui tata cara pengujian standar, menggunakan mesin uji tekan dengan cara memberikan beban tekan bertingkat dengan kecepatan peningkatan beban tertentu atas benda uji. Pada penelitian ini menggunakan benda uji beton silinder berukuran 15 cm × 30 cm. Benda uji diberikan beban bertingkat dengan menggunakan kecepatan peningkatan tertentu dengan menggunakan mesin uji kuat tekan hingga benda uji beton hancur.

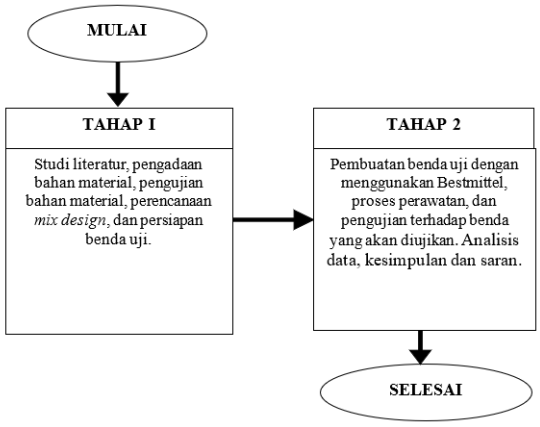
2.6. Kuat Tarik Belah Beton

Kuat tarik belah adalah nilai kuat tarik tidak langsung dari benda uji beton dengan bentuk silinder yang diperoleh dari hasil pembebanan benda uji tersebut yang diletakkan mendatar sejajar dengan permukaan meja penekan mesin uji tekan (SNI-03-2491-2002). Kuat tarik belah digunakan untuk mengevaluasi ketahanan geser beton dan menentukan panjang penyaluran dari tulangan. Beton memiliki kelemahan secara struktural yaitu memiliki kuat tarik yang rendah dimana besar kuat tarik belah memiliki perbandingan sekitar 9 % - 15 % dari kuat tekannya (Dipohusodo, 1996). Nilai kuat tekan dan nilai kuat tarik bahan beton tidak berbanding lurus, setiap usaha perbaikan mutu kekuatan tekan hanya disertai peningkatan kecil nilai kuat tariknya. Alasan utama dari kuat tarik yang kecil ini adalah pernyataan bahwa beton dipenuhi oleh retak – retak halus. Retak – retak ini tidak berpengaruh besar bila beton menerima beban tekan karena beban tekan menyebabkan retak menutup sehingga memungkinkan terjadinya penyaluran tekanan (McCormac, 2001).

3. METODE PENELITIAN

3.1. Tahap Penelitian

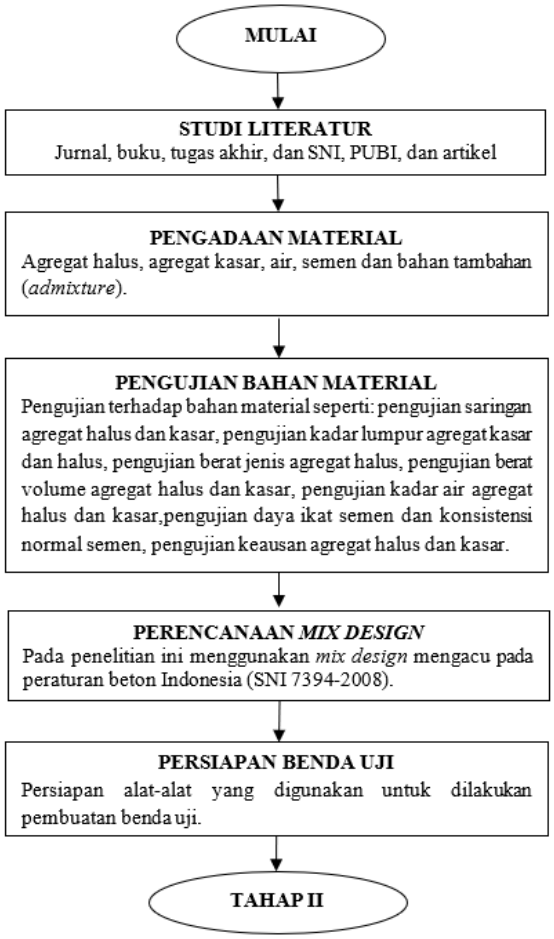
Di dalam penelitian ini terdapat 2 tahapan. Berikut ini tahapan-tahapan yang akan dijelaskan secara lebih mendetail yang dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Tahapan-Tahapan Dari Penelitian

3.1.1. Tahap I

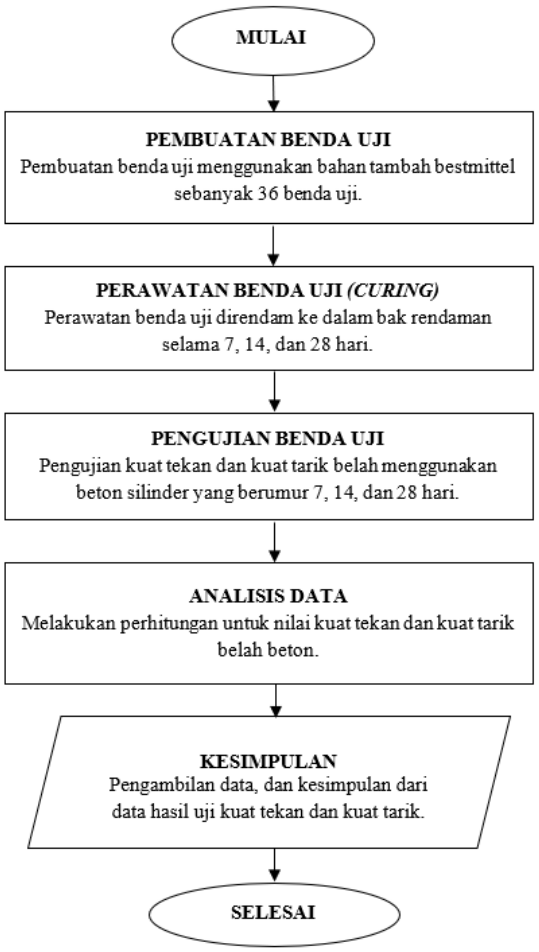
Tahap I ini berisi mengenai tahap dari persiapan penelitian yaitu dari proses pengumpulan landasan teori dan literatur yang sejenis dengan penelitian ini. Landasan teori dan literatur ini berguna untuk acuan pada saat mengerjakan penelitian agar sesuai dengan tujuan yang diinginkan. Pada tahap ini juga dilakukan proses persiapan bahan dan peralatan yang akan digunakan untuk membuat benda uji. Gambaran penelitian pada Tahap I akan dijelaskan lebih rinci dengan menggunakan diagram alir dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Bagan Alir Tahap I

3.1.2. Tahap II

Tahap II ini adalah tahapan pembuatan benda uji. Pada tahap ini juga dilakukan proses pengolahan data, analisa, dan pembahasan. Berikut ini adalah tahapan-tahapan yang dilakukan pada tahap II.

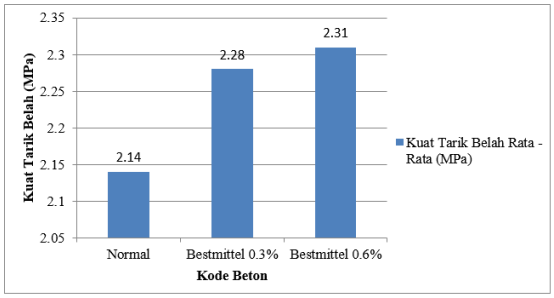


Gambar 3.3 Bagan Alir Tahap II

4. PEMBAHASAN

4.1. Hasil Dari Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Dari pengujian kuat tarik belah beton pada umur 28 hari yang dilakukan di Laboratorium Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata dengan menggunakan alat *compression machine* diperlihatkan pada Gambar 4.1.

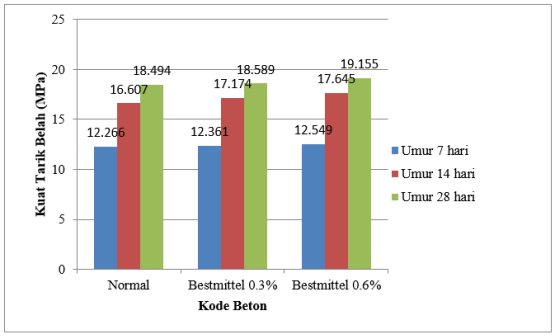


Gambar 4.1 Grafik Kuat Tarik Belah Rata – Rata 28 Hari

Berdasarkan Gambar 4.1, didapatkan hasil nilai kuat tarik belah beton maksimum pada beton dengan bahan tambah bestmittel didapatkan pada beton yang menggunakan konsentrasi 0,6% berumur 28 hari yang didapatkan hasil 2,31 MPa. Dengan peningkatan sebesar 7,652 % dari beton normal.

4.2. Hasil Dari Pengujian Kuat Tekan Beton

Dari pengujian kuat tekan beton pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari yang dilakukan di Laboratorium Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata dengan menggunakan alat *compression machine* diperlihatkan pada Gambar 4.2.



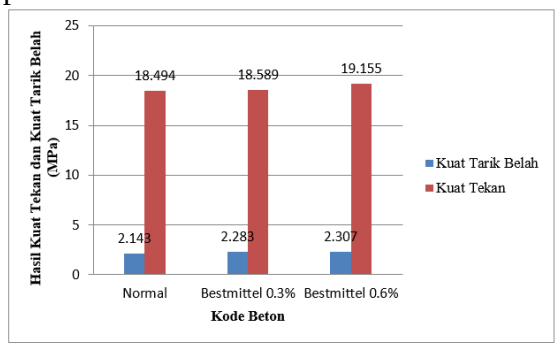
Gambar 4.2 Grafik Perkembangan Rata – Rata Kuat Tekan Beton

Berdasarkan Gambar 4.2 setelah dilakukan penelitian, maka didapatkan hasil, bahwa pemakaian besmittel berpengaruh terhadap kelecakan dan kemudahan pengerjaan (*workability*) adukan beton, serta berpengaruh juga pada kuat tekan dan kuat tarik belah beton. Penambahan bestmittel pada umur beton 7 hari memberikan kuat tekan maksimum pada presentase bestmittel 0,6% yaitu sebesar 12,549 MPa. Pada umur beton 14 hari kuat tekan maksimum tetap pada persentase bestmittel 0,6% yaitu sebesar 17,645 MPa. Pada umur beton 28 hari kuat tekan maksimum juga tetap pada persentase bestmittel 0,6% yaitu sebesar 19,155 MPa. Bila ditinjau dari beton normal, beton dengan penambahan bestmittel umur 7 hari mengalami penambahan kuat tekan sebesar 2,307 %, dan beton dengan penambahan bestmittel umur 14 hari mengalami penambahan kuat tekan sebesar 6,25% sedangkan untuk umur 28 hari mengalami penambahan sebesar

3,57%. Dengan demikian penambahan bestmittel bisa meningkatkan kuat tekan beton dengan ketentuan pemakaian bahan tambah tersebut sesuai batas-batas yang sudah ditentukan.

4.3. Hasil Kuat Tarik Belah Dan Kuat Tekan Beton

Dari hasil pengujian didapatkan nilai kuat tarik belah dan kuat tekan beton. Nilai hasil kuat tarik belah dan kuat tekan beton diambil untuk beton yang sudah berumur 28 hari. Rangkuman hasil rata – rata nilai kuat tarik belah dan kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Hasil Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat ditarik kesimpulan bahwa nilai kuat tekan beton maksimum dengan bestmittel 0,6% pada umur 28 hari meningkat 3,574% dari beton normal dan nilai kuat tarik belah maksimum dengan bestmittel 0,6% pada umur 28 hari meningkat 7,652% dari beton normal. Kuat tarik beton bervariasi antara 9% sampai 15% dari kuat tekannya. Alasan utama dari kuat tarik yang kecil ini adalah kenyataan bahwa beton dipenuhi oleh retak-retak halus. Retak-retak ini tidak berpengaruh besar bila beton menerima beban tekan karena beban tekan menyebabkan retak menutup sehingga memungkinkan terjadinya penyaluran tekanan (Pandaleke dan Windah, 2017).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil penelitian uji penambahan Bestmittel terhadap kuat tarik belah dan kuat tekan beton dapat disimpulkan seperti dibawah ini:

1. Dari hasil pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah beton didapatkan hasil bahwa beton mengalami peningkatan kuat tekan dan kuat tarik belah beton dengan penambahan bestmittel 0,3% dan 0,6% dari beton normal pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Hal ini disebabkan karena bestmittel memiliki fungsi untuk mempercepat proses pengerasan beton dan meningkatkan mutu beton.
2. Beton normal pada penelitian ini mendapatkan hasil kuat tekan maksimum sebesar 18,494 MPa pada umur 28 hari. Untuk kuat tarik belah mendapatkan hasil sebesar 2,14 MPa. Kuat tekan maksimum pada beton dengan bahan tambah bestmittel didapatkan pada beton yang menggunakan konsentrasi 0,6% berumur 28 hari didapatkan hasil 19,155 MPa dengan peningkatan sebesar 3,574 % dari beton normal. Kuat tarik belah maksimum pada beton dengan bahan tambah bestmittel didapatkan pada beton yang menggunakan konsentrasi 0,6% berumur 28 hari didapatkan hasil 2,31 MPa. Dengan peningkatan sebesar 7,652 % dari beton normal.

5.2 Saran

Berdasarkan dari hasil penelitian dan kesimpulan yang sudah dijelaskan, maka penulis menyarankan untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan agar hasil penelitian bisa dikembangkan agar mendapatkan data yang valid. Berikut saran dari hasil penelitian ini:

1. Disarankan menggunakan komposisi jumlah agregat kasar, agregat halus, dan semen yang berbeda untuk menentukan nilai kuat tekan dan tarik belah.
2. Variasi penggunaan bestmittel dicoba ditambahkan, yang sebelumnya 0,3 % dan 0,6 % dapat ditambahkan menjadi 0,4 % dan 0,7 % dari berat semen.

DAFTAR PUSTAKA

BSN, SK SNI S-04 (1989) F: *Spesifikasi bahan bangunan bagian A* (*bahan bangunan bukan logam*), 14-17.

BSN, SNI 03-2491 (2002): *Metode pengujian kuat tarik belah beton*. 12-15.

BSN, SNI 03-2847 (2002): *Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung*, 17-24.

BSN, SNI 03-6820 (2002): *Agregat halus untuk pekerjaan adukan dan plesteran dengan bahan dasar semen*, 24-27.

BSN, SNI 03-6861.1 (2002): *Spesifikasi bahan bangunan – bagian A: bahan bangunan bukan logam*. 14-17.

BSN, SNI 15-2049 (2004): *Semen portland*, 2-4.

BSN, SNI 1972 (2008): *Cara uji slump beton*, 8-13.

BSN, SNI 7394 (2008): *Tata cara perhitungan harga satuan pekerjaan beton untuk konstruksi bangunan gedung dan perumahan*, 3-6.

BSN, SNI 2847 (2013): *Persyaratan beton struktural untuk bangunan Gedung*, 1-5.

Chemie, M. (2015): *Bestmittel*. PT Multi Eraguna Usaha, 1.

Dipohusodo, I. (1996): *Struktur Beton Bertulang*, PT Gramedia Pustaka Utama, 3-4.

Lendrian, R.H., Iskandar, D., dan Dewi, S.U. (2022): Desain campuran beton mutu tinggi berbahan agregat lokal menggunakan admixture bestmittel tipe-E, *Jumatisi*, **3**(1), 219-224, ISSN 2722-5631.

McCormac, J.C. (2001): *Desain beton bertulang 1*, Erlangga, 5-8.

Meidiani, S., dan Hartawan, M.F.S. (2017): Penggunaan variasi Ph air (asam) pada kuat tekan beton normal F'C 25 Mpa, *Jurnal bentang*, **5**(2), 127-134 dalam Mahadika, M.P., dan Priambodo, B.D. (2020): *Pengaruh penambahan fly ash dan polcon terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton*, Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata.

Mulyono, T. (2004): *Teknologi beton*, Andi, 8-9.

PBI. (1971): *Peraturan Beton Bertulang Indonesia*. Departemen Perkerjaan Umum, Jakarta, 13-15.

Sriyadi, E. (2010): *Analisis kuat tekan dan kuat tarik belah beton dengan bahan tambah abu sekam padi dan bestmittel*, Skripsi Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta, x-xi.

Tjokrodimuljo, K. (1996): *Teknologi beton*, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 5-7.

Tjokrodimuljo, K. (2007): *Teknologi beton*, KMTS FT UGM, Yogyakarta, 6-7.

Tjokrodimuljo, K. (2008): *Beton non pasir dengan agregat dari batu alam (batu ape) sungai lua kabupaten kepulauan talaud sulawesi utara*, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, 3-5.

PENGARUH PENGGUNAAN LIMBAH ABU SEKAM PADI DAN *SUPERPLASTICIZER* PADA MORTAR TERHADAP KUAT TEKAN

Andika Dimas Hartanto[1], Kalfin Candra Andika[2], Widija Suseno Widjaja[3], Gabriel Jose Posenti Ghewa[4]

[1]*Mahasiswa Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: 22b10098@student.unika.ac.id
[2]*Mahasiswa Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: 22b10099@student.unika.ac.id
[3]*Dosen Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: widija@unika.ac.id
[4]*Dosen Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 Kota Semarang*
e-mail: ghewa@unika.ac.id

ABSTRAK

Limbah abu sekam padi merupakan limbah hasil pembakaran sekam padi yang mengandung senyawa terbesarnya adalah silika. Limbah abu sekam padi yang dicampur pada mortar tidak dapat serta merta meningkatkan kuat tekan, bahkan dapat mengurangi kuat tekan dari mortar normal karena sifatnya yang lapuk dapat mempengaruhi daya rekat. Penambahan limbah abu sekam padi yang berlebihan juga mempengaruhi kelecakan pada mortar jangka panjang, sehingga dibutuhkan bahan kimia yang dapat membantu mengurangi faktor air semen seperti *superplasticizer*. *Superplasticizer* dapat mengurangi penambahan air pada campuran mortar agar membantu menjaga kuat tekan dari mortar tersebut. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tekan mortar dengan ukuran benda uji 5 cm x 5 cm x 5 cm yang berbentuk kubus. Penggunaan abu sekam padi sebesar 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen dengan kadar *superplasticizer* 1% dari berat semen. Setiap komposisi berjumlah 3 benda uji dengan total benda uji yang akan digunakan berjumlah 60 buah. Hasil kuat tekan tertinggi pada penelitian ini adalah 11,73 MPa pada mortar umur 7 hari dan 12,53 MPa pada mortar umur 28 hari dengan komposisi kadar abu sekam padi 2,5% dan *superplasticizer* 1%. Kuat tekan paling rendah pada penelitian ini adalah 5,2 MPa pada mortar umur 7 hari dan 6 MPa pada mortar umur 28 hari dengan komposisi abu sekam padi 10% tanpa *superplasticizer*.

Kata Kunci: Mortar, Abu sekam padi, *Superplasticizer*, Kuat tekan.

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Abu sekam padi adalah limbah hasil pembakaran sekam padi yang mengandung senyawa terbesarnya adalah silika (SiO_2) yang dapat dimanfaatkan untuk campuran pada pembuatan semen, bahan isolasi, husk board dan campuran industri bata merah (Heldita, 2018). *Superplasticizer* merupakan bahan tambah (*admixture). Admixture* adalah bahan selain semen, agregat dan air yang ditambahkan pada campuran mortar. Adapun jenis-jenis *superplasticizer* yang umum digunakan yaitu, *superplasticizer naphthalene*, *superplasticizer* sodium glukonat dan *superplasticizer polycarboxylate* (PCE).

Penulis menggunakan *superplasticizer polycarboxylate* (PCE) untuk mengurangi penggunaan air yang digunakan pada pembuatan mortar. PCE mampu untuk mengurangi kadar air sampai 40% dan bisa digunakan untuk beton mutu tinggi (Utami, 2017). Menurut SNI 03-6825-2002, mortar didefinisikan sebagai campuran material yang terdiri dari agregat halus berupa pasir dan bahan perekat berupa *portland cement* ditambah air dengan komposisi tertentu.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Apa pengaruh penambahan abu sekam padi dan *superplasticizer* terhadap nilai kuat tekan mortar.
2. Berapakah kuat tekan yang dihasilkan pada mortar dengan penambahan abu sekam padi dan *superplasticizer* dalam masa perawatan 7 hari dan 28 hari.

1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh penambahan abu sekam padi dan *superplasticizer* terhadap kuat tekan mortar.
2. Mendapatkan kuat tekan tertinggi pada mortar dengan penambahan abu sekam padi dan *superplasticizer* dengan persentase sesuai rencana.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan pengetahuan dan ilmu mengenai penelitian kuat tekan mortar dari penggunaan abu sekam padi dan *superplaticizer*.
2. Mendapatkan manfaat teoritis, untuk pengembangan dan inovasi teknologi terhadap mortar.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bahan yang digunakan dalam pembuatan mortar:
   a. Semen yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan Semen PCC (*Portland Composite Cement*) dengan merek Tiga Roda.
   b. Air yang digunakan adalah air yang diambil dari sumur artetis Kampus Universitas Katolik Soegijapranata.
   c. Benda uji yang digunakan berbentuk kubus dengan ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm.
   d. Agregat halus yang digunakan adalah pasir Muntilan.
   e. Bahan tambahan yang digunakan adalah abu sekam padi dengan konsentrasi 2,5%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen, dan *superplasticizer* dengan perbandingan 1% dari berat semen.
2. Pengujian kuat tekan mortar dilakukakan pada saat mortar berumur 7 hari dan 28 hari.
3. Jumlah benda uji yang akan dilakukan berjumlah 60 sampel.
4. Pengujian kuat tekan dilakukan di Laboratorium Konstruksi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Soegijapranata.
   Curing atau perawatan mortar dilakukan dengan cara meletakan mortar yang baru dikeluarkan dari cetakan di dalam genangan air selama 7 hari untuk benda uji berumur 7 hari dan 28 hari untuk benda uji berumur 28 hari

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mortar

Menurut Tjokrodimuljo (2012), mortar pada umumnya digunakan sebagai perekat dalam suatu proyek konstruksi. Mortar dikenal sebagai bahan perekat karena fungsi utamanya sebagai perekat atau spesi bata ringan, plester dinding, acian, dan perekat atau spesi keramik. Mortar juga dapat digunakan sebagai perekat yang bersifat struktural, yaitu sebagai perekat pemasangan pondasi batu belah. Mortar sebagai bahan bangunan biasa diukur sifat-sifatnya, misalnya kuat tekan, *setting time*, *workability* dan daya serap air. Penjelasan mengenai sifat-sifat mortar adalah sebagai berikut:

1. Daya serap air perlu diperhatikan pada pekerjaan perekatan keramik, pemasangan bata, dan lain-lain, karena semakin kecil daya serap air maka mortar tersebut akan semakin padat.

2. Kuat tekan mortar dapat digunakan sebagai kriteria yang paling diutamakan saat pemilihan tipe mortar. Kuat tekan menjadi kriteria utama karena mudah diukur dan pada umumnya mempengaruhi spesifikasi mortar yang lain seperti kuat tarik. Kuat tekan adalah kemampuan mortar untuk menahan atau memikul suatu beban maupun sampai terjadi kegagalan.
3. *Setting time* dibagi menjadi dua yaitu *initial setting time* dan *final setting time*. *Initial setting time* atau waktu ikat awal adalah waktu yang diperlukan oleh pasta semen dari bersifat plastis dan dapat dibentuk hingga menjadi *rigid* (kaku) dan tidak dapat dibentuk. Pada saat *initial setting time*, proses hidrasi telah terjadi dan panas hidrasi sudah muncul, serta *workability* mortar sudah hilang. Selanjutnya adalah *final setting time* yang merupakan kondisi ketika mortar telah mengeras sempurna
4. *Workability* atau kelecakan adalah tingkat kemudahan mortar untuk dikerjakan. *Workability* yang baik yaitu mortar yang memiliki tingkat keenceran yang pas, semakin encer mortar maka semakin mudah mortar untuk dikerjakan. Sehingga mortar dapat mengalir dengan mudah kedalam cetakan. Tingkat keenceran mortar memiliki batasan-batasan yaitu sesuai dengan mutu rencana, tidak terjadi segregasi, *bleeding* dan keropos.

2.2. Bahan Pembuat Mortar

Bahan yang digunakan untuk membuat mortar adalah agregat halus yaitu pasir, semen, dan air. Selain itu, bahan tambah sering dicampurkan dalam mortar untuk menambah sifat tertentu mortar dan menambah kuat tekan mortar. Bahan tambah yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu sekam padi dan *superlasticizer*. Bahan-bahan pembuatan mortar adalah sebagai berikut:

2.2.1. Agregat halus

Berdasarkan SNI 03-6820-2002, agregat halus adalah agregat besar butir maksimum 4,75 mm berasal dari alam atau hasil alam, sedangkan agregat halus olahan adalah agregat halus yang dihasilkan dari pecahan dan pemisahan butiran dengan cara penyaringan atau cara lainnya dari batuan atau terak tanur tinggi.

Agregat halus yang digunakan dalam pengujian adalah pasir Muntilan, pasir Muntilan yang digunakan telah dicuci bersih dari lumpur dan dilakukan pengujian analisis saringan agregat halus . Setelah dikeringkan dengan cara diangin-anginkan selama 24 jam, pasir sudah dapat diuji lolos uji saringan agregat halus

Pasir yang digunakan memiliki tekstur yang cenderung kasar dan bewarna abu-abu gelap. Pasir yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2.1.

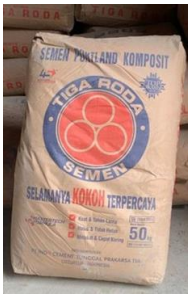


Gambar 2.1 Pasir Muntilan

2.2.2. Semen *portland*

Menurut SNI 15-2049-2004 semen portland adalah semen hidraulis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland, terutama yang terdiri dari kalsium silikat yang bersifat hidraulis. Kemudian digiling bersama dengan bahan tambahan berupa kristal, senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Semen yang digunakan pada penilitian ini adalah semen Portland komposit atau PCC (*Portland Composite Cement*) merek Tiga Roda,

semen portland komposit adalah semen yang paling umum digunakan. Menurut SNI 15-7064-2004 *portland composite cement* adalah bahan pengikat hidraulis hasil dari penggilingan terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6% - 35 % dari massa semen portland komposit. Semen Portland Komposit diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Semen Portland Komposit

2.2.3. Air

Menurut SNI 03-2847-2002, air adalah material sangat penting bagi kelangsungan proyek. Penggunaan air untuk kontruksi harus memperhatikan kualitas dari air tersebut, karena kualitas air juga mempengaruhi mutu bangunan. Air merupakan bagian yang sangat penting dari campuran beton maupun mortar semen.

2.3. Kuat Tekan Mortar

Menurut Asia, N. (2014), kuat tekan adalah kemampuan mortar menerima gaya tekan persatuan luas. Berdasarkan SNI 03-6882-2002, kuat tekan mortar berkisar antara 2,4 MPa sampai dengan 17,2 MPa. Kuat tekan mortar dipengaruhi oleh spesifikasi proporsi bahan yang terdiri semen, agregat, dan air yang digunakan. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan mortar yaitu adalah jumlah semen, faktor air semen, sifar agregat, dan umur mortar. Penjelasan mengenai faktor-faktor kuat tekan adalah sebagai berikut:

2.3.1. Jumlah semen

Setiap bahan utama mortar memberikan kontribusi tertentu pada kinerjanya. Semen portland berkontribusi terhadap kekuatan dan durabilitas. Kapur dalam bentuk hidroksidanya mempengaruhi kelecakan, retensivitas air, dan elastisitas. Mortar dengan jumlah semen lebih banyak belum tentu memiliki kekuatan lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena jumlah air dan semen yang berlebih dapat menyebabkan volume pori-pori dalam mortar meningkat. Volume pori-pori inilah yang mengurangi kuat tekan mortar. Jumlah semen dalam mortar mempunyai batasan tertentu yang dapat menghasilkan kuat tekan optimal.

2.3.2. Faktor air semen

Kekuatan tekan mortar meningkat seiring peningkatan kadar semen dan menurun akibat meningkatnya kapur, pasir, air atau kadar udara. Pada umumnya, semakin tinggi nilai faktor air semen maka semakin rendah mutu kekuatan mortar. Namun demikian, semakin rendah nilai faktor air semen tidak selalu berarti bahwa kuat tekan mortar semakin tinggi. Nilai faktor air semen yang rendah akan menyebabkan pekerjaan pemadatan menjadi sulit dan akan meurunkan mutu mortar.

2.3.3. Sifat agregat

Agregat bergradasi baik untuk mereduksi pemisahan material dalam mortar plastis, juga mereduksi *bleeding* dan meningkatkan kelecakan. Kekurangan butir pasir halus menghasilkan mortar yang kasar, sedangkan pasir yang terlalu halus menghasilkan mortar yang lemah dan meningkatkan penyusutan. Sifat agregat yang berpengaruh terhadap kuat tekan mortar adalah bentuk, kekasaran permukaan, kekerasan dan ukuran maksimum butir agregat. Bentuk butir agregat berpengaruh terhadap *interlocking* atau ikatan antar agregat.

2.3.4. Umur mortar

Umur pengujian yang sering digunakan adalah 7 hari dan 28 hari untuk kuat tekan atau 14 hari dan 28 hari unutk pengujian kuat lentur. Nilai kuat tekan mortar diperoleh dengan cara pengujian dengan menggunakan mesin uji kuat tekan. Benda uji berupa mortar berbentuk kubus, lalu kubus mortar ditekan dengan menggunakan mesin uji kuat tekan hingga mortar tersebut retak atau hancur. Pada saat mortar telah retak, didapatkan nilai kuat tekan dari mortar tersebut. Kuat tekan mortar diperoleh dengan rumus sebagai berikut:

$$\sigma b' = \frac{Pmaks}{A} \quad \text{.....(2.1)}$$

Keterangan:
σb' = Kuat tekan mortar benda uji kubus (MPa)
Pmaks = Gaya (N)
A = Luas permukaan benda uji kubus (mm^2)
Pengujian kuat tekan mortar diperlihatkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Pengujian Kuat Tekan Mortar

2.4. Abu Sekam Padi

Sekam padi apabila dibakar secara terkontrol pada suhu tinggi (500-600ºC) akan menghasilkan abu silika yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai proses kimia (Putro dan Prasetyoko, 2007). Abu sekam padi merupakan limbah yang diperoleh dari hasil pembakaran sekam padi. Abu sekam padi merupakan material yang bersifat pozzolanic dalam arti kandungan material terbesarnya adalah silika dan baik untuk digunakan dalam campuran pozzolan-kapur yaitu mengikat kapur bebas yang timbul pada waktu hidrasi semen. Silikon dapat bereaksi dengan kapur membentuk kalsium silika hidrat sehingga menghasilkan ketahanan dari beton bertambah besar karena kurangnya kapur.

Penelitian sebelumnya Afrian (2017) tentang kuat tekan mortar OPC abu sekam padi pada suhu tinggi. Hasil penelitian menunjukkan variasi penggantian semen oles ASP sebesar 15% memiliki nilai kuat tekan yang optimum. Penambahan ASP yang berlebihan tidak serta merta meningkatkan kuat tekan mortar.

Penambahan abu sekam padi yang semakin tinggi tidak serta merta mampu meningkatkan nilai kuat tekan mortar. Pernyataan tersebut telah dibuktikan oleh Sitorus (2009) yang

menyimpulkan bahwa pengunaan silika amorphous secara berlebihan diatas 10% akan membawa dampak negatif yang dapat mengakibatkan retak atau pecahnya pasta semen.

2.5. Pengaruh Abu Sekam Padi Terhadap Mortar

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Pascasari, A, dkk (2021), Abu sekam padi mengandung silika yang dapat menyerap air, oleh karena itu penambahan air pada pengujian initial flow diperlukan untuk mencapai rentang yang disyaratkan. Abu sekam padi yang digunakan telah dibakar dengan suhu tinggi diatas 400°C. Persentase abu sekam padi yang digunakan yaitu 6%, 9%, 12%, dan 15% dengan 7 sampel tiap variasinya. Rentang nilai initial flow yang digunakan yaitu 105%-115% (SNI 03-6882-2002). Kuat tekan mortar tertinggi terjadi pada variasi 9% dengan nilai kuat tekan sebesar 13,24 MPa, dengan peningkatan persentase sebesar 10,15% dari mortar normal. Kuat tekan mortar terendah terjadi pada variasi 6% dengan nilai kuat tekan sebesar 11,22 MPa, dengan penurunan persentase sebesar 6,66% dari mortar normal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan abu sekam padi dengan variasi 9% dan 12% menghasilkan kuat tekan lebih besar dari mortar normal.

2.6. *Superplasticizer*

Menurut Fuad (2021), Penggunaan *superplasticizer* berkisar pada dosis 1% hingga 1,5%, karena sangat meningkatkan kelecakan campuran. Pengunaan *superplasticizer* yang berlebih akan menyebabkan mortar sulit mengeras dan kehilangan kekuatannya. Pada prinsipnya mekanisme kerja dari *superplasticizer* sama, yaitu dengan menghasilkan gaya tolak-menolak (*dispersion*) yang cukup antar partikel semen agar tidak terjadi penggumpalan partikel semen (*flocculate*) yang dapat menyebabkan terjadinya rongga udara didalam beton, yang akhirnya akan mengurangi kekuatan atau mutu mortar tersebut.

2.7. Pengujian Kuat Tekan

Menurut SNI 03-6825-2002 menyatakan bahwa, kuat tekan motor adalah kemampuan mortar menerima gaya tekan persatuan luas, benda uji mortar diletakan di atas mesin penekan kemudian benda uji ditekan sampai benda uji pecah. Pada saat pecah, dicatat besarnya gaya tekan maksimum yang bekerja. Berikut faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan mortar:

1. Faktor air semen
   Menurut SNI 03-6825-2002 (2002), faktor air semen adalah angka perbandingan antara berat air dengan berat semen dalam campuran mortar. Pada umumnya, semakin tinggi nilai faktor air semen maka semakin rendah mutu kekuatan beton. Namun demikian, semakin rendah nilai faktor air semen tidak selalu berarti bahwa kuat tekan beton semakin tinggi. Nilai faktor air semen yang rendah akan menyebabkan pekerjaan pemadatan menjadi sulit dan akan menurunkan mutu beton.
2. Jumlah semen
   Menurut SNI 03-6825-2002, pada mortar dengan faktor air semen yang sama, mortar dengan kadar semen lebih banyak belum tentu memiliki kekuatan lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena jumlah air dan semen yang banyak menyebabkan kandungan pori lebih banyak daripada mortar dengan kandungan lebih yang lebih sedikit. Kandungan pori-pori inilah yang mengurangi kuat tekan mortar. Umur mortar
3. Sifat agregat
   Menurut SNI 03-6825-2002, sifat agregat yang berpengaruh terhadap kuat tekan mortar adalah bentuk, kekasaran permukaan, kekerasan dan ukuran maksimum butir agregat. Bentuk butir agregat berpengaruh terhadap interlocking atau ikatan antar agregat.
   Dalam menentukan nilai kuat tekan menggunakan perhitungan menurut SNI 03-6825-2002, perhitungan massa volume beton dan kuat tekan beton dilakukan dengan rumus:

σ_m $= \frac{\text{Pmaks x 1000}}{\text{A}}$ ..... (2.2)

Volume = p x l x t .....(2.3)

Massa volume mortar = $\frac{\text{berat benda uji}}{\text{volume benda uji}}$.(2.4)

Keterangan:

σ_m = Kuat tekan mortar benda uji kubus (kg/cm^2)

P = Gaya (kN)

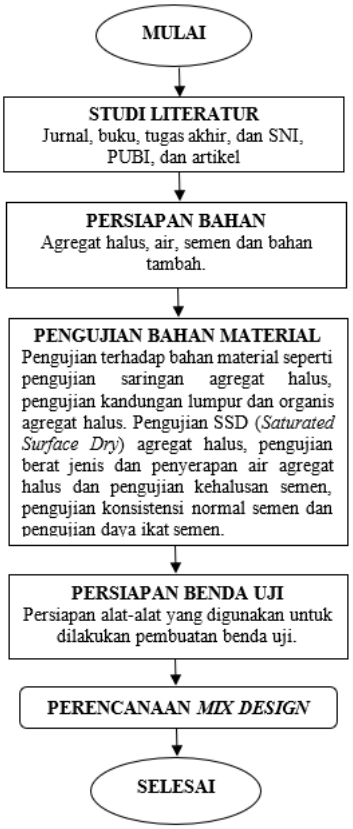
A = Luas permukaan benda uji kubus (cm^2)

p = Panjang benda uji (cm)

l = Lebar benda uji (cm)

t = Tinggi benda uji (cm)

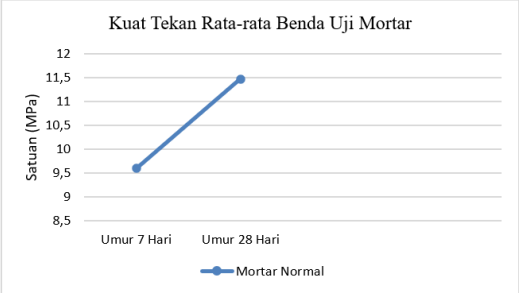
3. METODE PENELITIAN



4. PEMBAHASAN

4.1.1 Kuat tekan rata-rata uji mortar normal

Hubungan antara kuat tekan rata-rata benda uji mortar normal pada umur 7 hari dan 28 hari diperlihatkan pada Gambar 4.1.



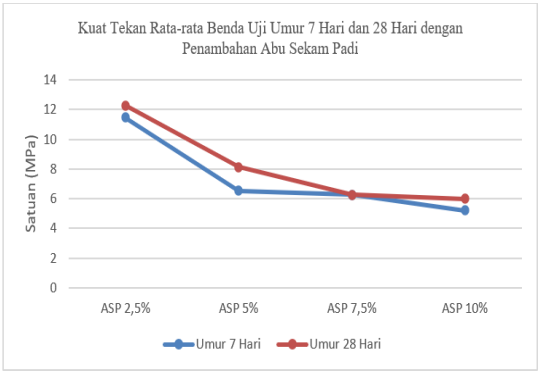
Gambar 4.1 Grafik Kuat Tekan Rata-rata Benda Uji Mortar Normal

Berdasarkan Gambar 4.1, didapatkan hasil nilai kuat tekan benda uji mortar normal tertinggi yaitu 11,47 MPa pada benda uji berumur 28 hari. Sedangkan hasil nilai kuat tekan rata-rata pada mortar normal yang terendah yaitu 9,6 MPa pada benda uji berumur 7 hari, jadi dapat disimpulkan bahwa benda uji mortar normal umur 7 hari dan 28 hari memenuhi standart kuat tekan mortar normal.

Menurut SNI 03-6883-2002 menyatakan bahwa kuat tekan mortar berkisar diantara 2.4 MPa – 17,2 MPa. Kuat tekan mortar semakin meningkat seiring dengan durasi perawatan (*curing*), karena mortar setelah dikeluarkan dari cetakan membutuhkan waktu untuk menjaga kestabilan temperatur dan membutuhkan hidrasi yang cukup agar tidak mudah kering dan mengalami keretakan.

4.1.2 Kuat tekan rata-rata uji mortar dengan penambahan abu sekam padi

Hubungan antara kuat tekan rata-rata benda uji mortar dengan bahan tambah abu sekam padi pada umur 7 hari dan 28 hari diperlihatkan pada Gambar 4.2.



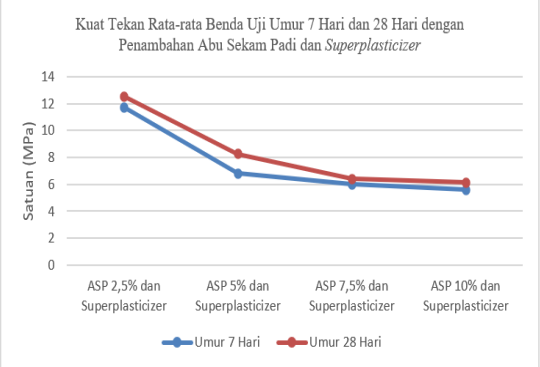
Gambar 4.2 Grafik Kuat Tekan Rata-Rata
Benda Uji Mortar Dengan Penambahan Abu Sekam Padi Umur 7 Hari dan 28 Hari

Berdasarkan Gambar 4.2 nilai kuat tekan rata-rata benda uji mortar dengan penambahan abu sekam padi nilai kuat tekan maksimum yaitu sebesar 12,27 MPa dengan penambahan abu sekam padi 2,5% dan nilai kuat tekan minimum sebesar 5,20 MPa dengan penambahan abu sekam padi 10% untuk benda uji berumur 7 hari.

Untuk benda uji berumur 28 hari nilai kuat tekan maksimum yaitu sebesar 12,27 MPa dengan penambahan abu sekam padi sebesar 2,5% dan nilai kuat tekan minimum sebesar 6 MPa dengan penambahan abu sekam padi sebesar 10%. Menurut Widyanto, (2020) semakin sedikit penggunaan abu sekam padi maka kuat tekan mortar akan semakin tinggi.

4.1.3 Kuat tekan rata-rata uji mortar dengan penambahan abu sekam padi dan *superplasticizer*

Hubungan antara kuat tekan rata-rata benda uji mortar dengan bahan tambah abu sekam padi dan cairan *superplasticizer* pada umur 7 hari dan 28 hari diperlihatkan pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Grafik Kuat Tekan Rata-Rata Benda Uji Mortar Dengan Penambahan Abu Sekam Padi dan *Superplasticizer* Umur 7 Hari dan 28 Hari

Berdasarkan Gambar 4.3 nilai kuat tekan rata-rata benda uji mortar dengan penambahan abu sekam padi dan cairan *superplasticizer* nilai kuat tekan maksimum yaitu sebesar 11,73 MPa dengan penambahan abu sekam padi sebesar 2.5% dan cairan *superplasticizer* sebesar 1%, sedangkan nilai kuat tekan minimum sebesar 5,6 MPa dengan penambahan abu sekam padi sebesar 10% dan cairan *superplasticizer* sebesar 1% untuk benda uji berumur 7 hari. Sedangkan untuk benda uji berumur 28 hari didapatkan nilai kuat tekan 12,53 MPa dengan penambahan abu sekam
padi sebesar 2.5% dan cairan *superplasticizer* sebesar 1% dan nilai kuat tekan minimum sebesar 6,13 MPa dengan penambahan abu sekam padi sebesar 10% dan cairan *superplasticizer* sebesar 1%..

4.2 Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Abu Sekam Padi dan *Superplasticizer* Terhadap Kuat Tekan Mortar

Dari hasil pengujian kuat tekan mortar umur 7 hari dan 28 hari yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa mortar mengalami peningkatan kuat tekan dengan penambahan abu sekam padi 2,5% dan cairan *superplasticizer* sebesar 1%. Nilai kuat tekan maksimum yang didapat yaitu sebesar 11,47 MPa pada mortar berumur 7 hari dan sebesar 12,53 MPa pada mortar berumur 28 hari.

Penggantian sebagian semen oleh abu sekam padi akan menghasilkan reaksi antara CH dan silika abu sekam padi yang menyebabkan terbentuknya CSH sekunder. Jumlah CSH sekunder yang terbentuk tergantung pada proporsi antara silika yang dikandung oleh abu sekam padi dan CH yang dihasilkan dari reaksi C_3S atau C_2S dan air (Bakri, 2008). Selain itu, ukuran abu sekam padi yang berbutir halus memungkinkan mengisi rongga-rongga udara dalam mortar sehingga mortar menjadi lebih kuat.

Jumlah kalsium hidroksida hasil reaksi hidrasi semen *portland* lebih sedikit sehingga banyak silika yang tidak bereaksi dengan kalsium hidroksida.

Jika permeabilitas pasta semen tinggi maka air dan senyawa luar lainnya akan mudah masuk ke dalam pasta semen. Pembentukan CSH sekunder dapat mengurangi permeabilitas pasta semen sehingga menghalangi masuknya zat cair ke dalam pasta semen (Bakri, 2008).

Dari hasil penelitian terdahulu, terdapat kemiripan seperti tema yang diangkat dan metode yang digunakan, namun memiliki perbedaan bentuk benda uji, persentase penambahan abu sekam padi dan bahan tambah yang digunakan dengan penelitian ini. Dilihat dari hasil yang didapat,

penambahan abu sekam padi pada persentase tertentu dapat meningkatkan kuat tekan mortar dibandingkan mortar normal. Namun seiring dengan penambahan persentase abu sekam padi juga mengalami penurunan kuat tekan pada mortar. Berikut adalah perbandingan antara penelitian sejenis dan penelitian ini ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan Penelitian Sejenis

Faktor	Pascasari dkk (2021)	Umiati dkk (2019)	Anagyagos (2011)	Syahrul (2021)	Penelitian ini
Abu sekam padi	✓	-	✓	-	✓
Superplasticizer	-	✓	-	✓	✓
Benda uji mortar	✓	-	✓	✓	✓
Tes kuat tekan	✓	✓	✓	✓	✓

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

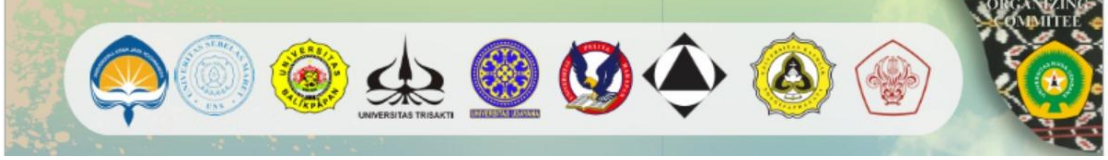
Pada penelitian ini pengaruh dari penggunaan limbah abu sekam padi dan cairan *superplasticizer* adalah sebagai berikut:

1. Dari hasil pengujian kuat tekan mortar didapatkan hasil bahwa mortar mengalami peningkatan kuat tekan dengan penambahan abu sekam padi 2,5% dan cairan *superplasticizer 1%* dari mortar normal. Hal ini disebabkan ukuran abu sekam padi yang berbutir halus memungkinkan mengisi rongga-rongga udara dalam mortar sehingga mortar menjadi lebih kuat.
   Penurunan kuat tekan mortar terjadi pada penambahan abu sekam padi dengan persentase lebih dari 2,5%. Semakin bertambahnya persentase abu sekam padi semakin menambah fraksi halus yang membuat semen tidak mampu mengikat maksimal dengan material dalam volume benda uji mortar secara keseluruhan.
2. Pada mortar umur 7 hari kuat tekan mortar maksimum didapat pada mortar dengan komposisi penambahan abu sekam padi 2,5% dan cairan *superplasticizer* 1% yaitu sebesar 11,73 MPa, untuk kuat tekan mortar minimum didapat pada mortar dengan komposisi penambahan abu sekam padi 10% dan cairan *superplasticizer* 1% yaitu sebesar 5,2 MPa dan kuat tekan beton normal yaitu sebesar 9,6 MPa.
   Pada mortar umur 28 hari didapatkan kuat tekan maksimum pada mortar dengan komposisi penambahan abu sekam padi sebesar 2,5% dan cairan *superplasticizer* sebesar 1% yaitu sebesar 12,53 MPa, untuk kuat tekan mortar minimum didapat pada mortar dengan komposisi penambahan abu sekam padi sebesar 10% tanpa campuran *superplasticizer* yaitu sebesar 6 MPa dan kuat tekan mortar normal yaitu sebesar 11,47 MPa.

5.2 Saran

Berikut saran dari hasil penelitian ini:

1. Pada penelitian selanjutnya diharapkan menambahkan jumlah sampel, khususnya pada umur pengujian mortar sehingga akan lebih memperkuat data-data penelitian.
2. Penggunaan cairan *superplasticizer* sebagai bahan tambah sebaiknya tidak lebih dari 1% dari berat semen yang digunakan.



3. Penggunaan bahan tambah abu sekam padi dan cairan *superplasticizer* untuk pekerjaan mortar ataupun beton sebaiknya lebih berhati-hati dalam komposisi penggunaannya untuk meminimalisir penurunan kuat tekan jika komposisinya tidak tepat.

DAFTAR PUSTAKA

Afrian, M., Olivia M., dan Djauhari, Z., (2017): Kuat tekan mortar OPC abu sekam padi pada suhu tinggi, *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*, **4**(1), 1-5, ISSN 2355-6870.

Asia, N. (2014): Pengaruh penambahan natrium klorida (NaCl) terhadap waktu ikat, kuat tekan mortar dan pasta, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanudin, Makassar 14-15 *dalam* Dananjaya, P. R. M., dan Herdiawan A. A. (2021): *Pengaruh proporsi mikrosilika dan kandungan lumpur terhadap kuat tekan mortar*, Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata.

Bakri (2008): Komponen kimia dan fisik abu sekam padi sebagai SCM untuk pembuatan komposit semen, *Jurnal Perennial*, **5**(1), 9-14.

BSN, SNI 03-6820 (2002): Agregat halus untuk pekerjaan adukan dan plesteran dengan bahan dasar semen, 24-27.

BSN, SNI 03-2847 (2002): Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung, 49-51.

BSN, SNI 03-6825 (2002): Metode pengujian kekuatan tekan mortar semen portland untuk pekerjaan sipil. 6-8

BSN, SNI 03-6882 (2002): Spesifikasi mortar untuk pekerjaan pasangan.1-4

BSN, SNI 15-2049 (2004): *Semen portland*, 2-4.

BSN, SNI 15-7064 (2004): Semen portland komposit, 10-11.

Fuad, I. S., (2021): Pengaruh penambahan superplasticizer dan silica fume terhadap kuat tekan mortar dengan FAS 0,3. *Jurnal Desiminasi Teknologi*, **9**(2), 147-148, ISSN 2303-212X.

Heldita, D. (2018): Pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap kuat tekan beton, Teknologi Aplikasi Konstruksi, **8**(1), 47-48, ISSN 2089-2098..

Pascasari, A., Wahyuni. A.S., Islam. M., Gunawan. A., dan Afrizal. Y. (2021): Pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap kuat tekan mortar, *Jurnal Inersia*, **13**(2), 84-88, ISSN 2086-9045.

Putro, A. L. dan Prasetyoko, D. (2007): Abu sekam padi sebagai sumber silika pada sintesis *zeolit* ZSM-5 tanpa menggunakan tempat organik, *Akta Kimia Indonesia*, **3**(1), 33-36 *dalam* Agung, G. F., Hanafie, M. R. dan Mardina, P. (2013): Ekstraksi silika dari abu sekam padi dengan pelarut KOH, *Konversi*, **2**(1), 28-31, ISSN 2541-3481.

Sitorus, T. K. (2009): *Pengaruh penambahan silika amorf dari sekam padi terhadap sifat mekanis dan sifat fisis mortar*, Skripsi, Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sumatera Utara *dalam* Pascasari, A., Wahyuni. A.S., Islam. M., Gunawan. A., dan Afrizal. Y. (2021): Pengaruh penambahan abu sekam padi terhadap kuat tekan mortar, *Jurnal Inersia*, **13**(2), 84-88, ISSN 2086-9045.

Tjokrodimuljo, K. (2012): *Teknologi beton*, KMTS FT UGM, Yogyakarta 6-7 dalam Dananjaya, P. R. M., dan Herdiawan A. A. (2021): *Pengaruh proporsi mikrosilika dan kandungan lumpur terhadap kuat tekan mortar*, Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katolik Soegijapranata.

Utami, R., Herbudiman B., dan Irawan, R. R. (2017): Efek tipe superplasticizer terhadap sifat beton segar dan beton keras pada beton geopolymer berbasih fly ash, *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, **3**(1), 61-62, ISSN 2477-2569.

PENGEMBANGAN AWAL BETON KINERJA TINGGI MENGGUNAKAN MATERIAL *QUARRY* BAJAWA DAN *QUARRY* NOBO DI NTT

Partogi H. Simatupang[*], Agusto Y. L. Wona[2], dan Dominikus P. S. Riberu[3]

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kupang e-mail: partogisimatupang@staf.undana.ac.id*
[2]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kupang e-mail: agustoyolandi1980@gmail.com*
[3]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kupang e-mail: putrariberu298@gmail.com*

ABSTRAK

Provinsi Nusa Tenggara Timur memiliki banyak *quarry* yang menghasilkan material bahan pembentuk beton diantaranya terdapat di Kabupaten Ngada, Kecamatan Bajawa, Desa Naru dan di Kabupaten Flores Timur, Kecamatan Ile Boleng, Desa Nobo. Penelitian beton kinerja tinggi dengan memanfaatkan bahan-bahan lokal dari *Quarry* Bajawa dan *Quarry* Nobo. Hal ini mendorong dilakukannya penelitian untuk menciptakan beton dengan kualitas yang tinggi dengan menggunakan material alami dari *Quarry* Bajawa dan Nobo. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Beton Teknik Sipil kemudian data hasil pengujian diolah dan ditampilkan dalam bentuk tabel ataupun grafik. Pengujian dilakuan dengan *slumptest* dan kuat tekan terhadap 3 jenis komposisi campuran *premilinary*. Hasil pengujian *workability* beton menunjukan nilai *slump* untuk 3 jenis campuran memenuhi target yaitu >14 cm, dan hasil pengujian kuat tekan beton untuk 3 jenis campuran dengan dilakukan pada umur beton 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan pada beton kinerja tinggi menunjukan bahwa terjadi peningkatan kekuatan seiring bertambahnya umur beton, peningkatan kekuatan paling signifikan terjadi pada umur 28 hari dengan kekuatan rata-rata pada beton yang menggunakan material *Quarry* Bajawa berturut-turut adalah 57,54 MPa, 51,59 MPa, dan 42,46 MPa. Sedangkan kekuatan rata-rata pada beton yang menggunakan material dari *Quarry* Nobo berturut-turut adalah 55,41 MPa, 50,11 MPa, dan 40,55 MPa.

Kata kunci: *Quarry*, Beton, *Slump*, Kinerja, Kuat Tekan.

1. PENDAHULUAN

Beton Beton adalah salah satu unsur utama dalam konstruksi bangunan. Beton merupakan suatu bahan konstruksi yang banyak digunakan pada pekerjaan struktur karena banyak keuntungan yang diberikan seperti bahan-bahan pembentuknya yang mudah diperoleh, mudah dikerjakan (*workability*), mempunyai keawetan *(durability)* dan kuat dalam memikul beban (*strength*) serta ekonomis. Ada beberapa jenis beton yang diklasifikasikan berdasarkan hasil nilai kuat tekannya, yaitu beton normal, beton mutu tinggi, dan beton mutu sangat tinggi (Sumajouw, 2014).

Selain beton mutu tinggi dikenal pula beton kinerja tinggi. Prinsipnya beton kinerja tinggi sama dengan beton mutu tinggi dimana kuat tekan yang harus dicapai sebesar 50 MPa, yang membedakan adalah pada beton kinerja tinggi tidak hanya harus mempunyai kuat tekan tinggi, tetapi juga harus memperhatikan keawetan, kedap air, dan mudah dikerjakan tanpa mengalami segregasi serta mempunyai nilai susut yang diterima, sedangkan beton mutu tinggi hanya memperhatikan kuat tekannya saja (Sulistyani, 2005).

Provinsi Nusa Tenggara Timur, khususnya Kabupaten Ngada dan Kabupaten Flores Timur terdapat *Quarry* yang terletak di masing-masing wilayah yaitu *Quarry* Bajawa dan *Quarry* Nobo. *Quarry* merupakan merupakan lokasi pertambangan dengan sistem galian terbuka yang digunakan untuk keperluan proyek seperti tanah, batuan atau pasir untuk keperluan proyek. Pemanfaatan material *Quarry* Bajawa dan Nobo saat ini digunakan sebagai bahan agregat utama untuk pengerjaan konstruksi ringan seperti rumah, gedung, bangunan air, jalan dan jembatan yang terdapat di wilayah sekitarnya. Adanya potensi yang besar dalam menghasilkan material pembentuk beton, penggunaan material lokal *Quarry* Bajawa dan *Quarry* Nobo untuk beton kinerja tinggi masih sangat minim sehingga mendorong dilakukannya penelitian berkelanjutan untuk menciptakan beton dengan kualitas yang tinggi dengan menggunakan material lokal yaitu pasir dan kerikil yang diambil dari *Quarry* yang berlokasi di Naru, Bajawa. Di samping itu, dengan adanya kualitas beton yang baik menggunakan material dari *Quarry* Bajawa dan Nobo dapat meningkatkan pertumbuhan ekonomi bagi masyarakat sekitar.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik mekanis material yaitu agregat kasar dan agregat halus, mendapatkan komposisi campuran paling optimum untuk beton kinerja tinggi yang telah dibuat dan mengetahui nilai *workability* dan kuat tekan yang dihasilkan dari beton kinerja tinggi yang memanfaatkan material lokal dari *Quarry* Bajawa dan Nobo

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental di Laboratorium Beton Program Studi Teknik Sipil Universitas Nusa Cendana. Sampel yang diuji merupakan agregat kasar dan agregat halus yang berasal dari *Quarry* Bajawa dan Nobo serta beton berbentuk silinder dengan ukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah : Bahan, yaitu : Pasir (Quarry Bajawa dan Nobo), semen Portland tipe I (Bosowa), air, dan bahan tambah *superplasticizer* dan *plasticizer* serta *fly ash. Fly ash* yang digunakan merupakan *fly ash* kelas F yang diambil dari PLTU Bolok, Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur. Alat yang digunakan adalah : oven dan timbangan digital untuk uji agregat, mesin molen mengaduk campuran beton, mesin *los angeles* uji abrasi kerikil, dan mesin uji kuat tekan beton.

Komposisi campuran mengikuti komposisi campuran preliminary dengan tiga jenis campuran yang berbeda seperti yang ditampilkan pada Tabel 1 :

Tabel 1. Komposisi campuran preliminary

Material	Mutu Beton Rencana(fc')					
	55 MPa		60 Mpa		'65 MPa	
	(kg/m³)	(%)	(kg/m³)	(%)	(kg/m³)	(%)
Semen	450	1,00	460	1	540	1
Kerikil	995	2,21	1056	2,30	985	1,82
Pasir	680	1,51	651	1,42	744	1,38
Air	160	0,36	153	0,33	150	0,28
Plastiment P121 R	1,34	0,003	1,48	0,003	1,1	0,002
Sikament 163	8,9	0,020	-	-	-	-
Viscocrete	-	-	4,74	0,010	-	-
Viscoflow 3270	-	-	-	-	5,3	0,010
Fly Ash	79	0,176	82	0,178	-	-
Total		**2374,24**		**2408,22**		**2425,4**

Prosedur pengujian dan pengumpulan data

Prosedur pengujian karakteristik bahan dilakukan berdasarkan pada Standar Nasional Indonesia sebagai berikut :

- Pengujian kadar lumpur pasir dan kerikil mengikuti SNI 03 – 4142 – 1998 yaitu dilakukan dengan cara pencucian terhadap pasir dan kerikil lalu di catat berat sebelum di cuci dan sesudah di cuci, kemudian dihitung presentase kadar lumpur.
- Pengujian berat jenis dan penyerapan mengikuti SNI 1970 : 2016 untuk pasir dan SNI 03-1996:2016 untuk kerikil. Pengujian dilakukan dengan menghitung berat jenis kering, berat jenis kering permukaan, berat jenis semu dan penyerapan agregat.
- Pengujian gradasi mengikuti SNI 03 – 1968 – 1990 dengan memisahkan agregat menggunakan ayakan sesuai dengan ketentuan dan kemudian dicari nilai modulus halus butir dari masing-masing agregat.
- Pengujian berat volume mengikuti SNI 03 - 4804 – 1998.
- Pengujian kadar air mengikuti SNI 1971:2011.
- Pengujian kadar organik mengikuti SNI 2816:2014.
- Pengujian keausan mengikuti SNI 2417:2008 dengan menggunakan mesin *los angeles.*

Pengumpulan data dilakukan dengan *trial mix* terhadap campuran beton dan menggunakan teknik dokumentasi dan teknik pengujian.

3. HASIL PENELITIAN

Pengujian Bahan

Berdasarkan hasil pengujian karakteristik bahan didapatkan rekapitulasi untuk agregat halus dan kasar dari Quarry Bajawa dan Nobo seperti yang ditampilkan pada Tabel 2 Dan Tabel 3.



Tabel 2. Rekapitulasi pengujian bahan Quarry Bajawa

Jenis Pengujian	Syarat	Hasil Pengujian Agregat
Berat Jenis SSD Agregat Kasar	2,5-2,7	2,64
Penyerapana Agregat Kasar	-	3,83
Kadar Air Agregat Kasar	-	0,67
Kadar Lumpur Agregat Kasar	≤ 1%	1
Keausan Agregat Kasar	≤ 27%	25,30
Berat Volume Padat Agregat Kasar	1500 - 1800 (kg/m³)	1541,98
Zona Agregat Kasar	≤ 20 mm	2
Nilai Modulus Halus Butiran Agregat Kasar	6,0-8,0	6,28
Berat Jenis SSD Agregat Halus	2,5-2,7	2,78
Penyerapan Agregat Halus	-	3,35
Kadar Air Agregat Halus	-	0,05
Kadar Lumpur Agregat Halus	≤ 5%	0,47
Kadar Organik Agregat Halus	≤ warna standar (plat nomor 3)	plat nomor 2
Berat Volume Padat Agregat Halus	1500 - 1800 (kg/m³)	1698,51
Zona Agregat Halus	-	2
Nilai Modulus Halus Butiran Agregat Halus	1,5-3,8	2,75
Nilai Modulus Halus Butiran Campuran	4,60-5,75	5,41

Tabel 3. Rekapitulasi pengujian bahan Quarry Nobo

Jenis Pengujian	Syarat	Hasil Pengujian
Berat Jenis SSD Agregat Kasar	2,5-2,7	2.59
Penyerapana Agregat Kasar	-	4.17
Kadar Air Agregat Kasar	-	0.40
Kadar Lumpur Agregat Kasar	≤ 1%	0.67
Keausan Agregat Kasar	≤ 40%	32.50
Berat Volume Padat Agregat Kasar	1500 - 1800 (kg/m³)	1546.98
Zona Agregat Kasar	≤ 20 mm	2
Nilai Modulus Halus Butiran Agregat Kasar	6,0-8,0%	6.38
Berat Jenis SSD Agregat Halus	2,5-2,7	2.70
Penyerapan Agregat Halus	-	1.40
Kadar Air Agregat Halus	-	0.17
Kadar Lumpur Agregat Halus	≤ 5%	1.08
Kadar Organik Agregat Halus	≤ warna standar (plat nomor 3)	plat nomor 2
Berat Volume Padat Agregat Halus	1500 - 1800 (kg/m³)	1619.25
Zona Agregat Halus	-	2
Nilai Modulus Halus Butir Agregat Halus	1,5-3,8%	2.66

Berdasarkan hasil pengujian bahan menunjukan bahwa material yang berasal dari Quarry Bajawa dan Nobo dapat digunakan sebagai bahan pembuatan beton kinerja tinggi.

Trial mix

Pengujian *workability* dilakukan dengan mengukur nilai slump pada campuran, semakin besar nilai slump berarti campuran beton akan semakin encer sehingga tingkat *workability* beton akan semakin tinggi. Pengujian *workability* pertama-tama dilakukan dengan *trial mix* untuk menentukan komposisi campuran yang memenuhi syarat yaitu nilai slump ≥ 14 cm. Untuk mendapatkan komposisi dengan nilai *workability* yang sesuai maka dilakukan penambahan air secara perlahan dengan pengamatan visual hingga campuran beton mencapai kondisi yang sesuai kemudian dilakukan pengujian slump. Penambahan air yang berlebihan dapat menyebabkan beton mengalami segregasi dan bleeding yang dapat menurunkan kekuatan dari beton kinerja tinggi yang di buat. Selanjutnya akan diambil komposisi campuran yang memenuhi dan akan digunakan sebagai job mix formula untuk campuran final.

Tabel 4. Rekapitulasi pengujian *workability* Quarry Bajawa

Trial mix	Jumlah Sampel	Mutu Beton	Nilai *Slump*	Penambahan Air		Ket.
				1 silinder	Konversi ke 1 m³	
	(buah)	(MPa)	(cm)	(ml)	(kg/m³)	
Trial mix 1	9	60	-	-	-	gagal
Trial mix 2	5	60	-	-	-	gagal
Trial mix 3	5	60	16	108,00	68,79	tidak terpenuhi
Trial mix 4	6	60	25	123,33	78,56	tidak terpenuhi
Trial mix 5	6	60	26	85,00	54,14	terpenuhi
Trial mix 6	6	55	17,5	68,33	43,52	tidak terpenuhi
Trial mix 7	6	55	10	-	-	tidak terpenuhi
Trial mix 8	6	55	20,5	80,00	50,96	terpenuhi
Trial mix 9	6	65	24	83,33	53,08	terpenuhi

Tabel 5. Rekapitulasi pengujian *workability* Quarry Nobo

Trial mix	Jumlah Benda Uji	Mutu Beton	Nilai *Slump*	Penambahan Air		Ket.
				1 silinder	Konversi ke 1 m³	
	(buah)	(MPa)	(cm)	(ml)	(kg/m³)	
Trial mix 1	6	55	8	83,33	53.08	tidak terpenuhi
Trial mix 2	6	55	19	108,00	69.00	terpenuhi
Trial mix 3	6	60	25	120	62.39	terpenuhi
Trial mix 4	6	60	26	133,33	84.93	terpenuhi
Trial mix 5	6	65	24	120	76.43	terpenuhi

Tabel 6. Rekapitulasi pengujian kuat tekan *trial mix* Quarry Bajawa

Trial mix	Jumlah benda uji	Mutu beton	Kuat tekan		Kuat tekan (fc') target ≥ 50 MPa
			14 hari	28 hari	
	(buah)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	
1	3	60	-	-	gagal
2	3	60	-	-	gagal
3	3	60	37,07	42,13	tidak terpenuhi
4	3	60	39,24	44,59	tidak terpenuhi
5	3	60	45,11	51,26	terpenuhi
6	3	55	-	-	tidak terpenuhi
7	3	55	45,91	52,17	terpenuhi
8	3	55	35,77	40,64	tidak terpenuhi
9	3	65	50,45	57,32	terpenuhi

Tabel 7. Rekapitulasi pengujian kuat tekan *trial mix* Quarry Nobo

Trial mix	Jumlah Benda Uji	Mutu Beton	Kuat Tekan		Kuat Tekan (fc') Target ≥ 50 MPa
			7	28	
	(buah)	(MPa)	Hari	Hari	
1	3	55 MPa	29.94	42.77	Tidak terpenuhi
2	3	55 MPa	35.12	69.00	Terpenuhi
3	3	60 MPa	38.85	34.58	Tidak terpenuhi
4	3	60 MPa	38.22	54.60	Terpenuhi
5	3	65 MPa	40.76	58.23	Terpenuhi

Berdasarkan pada Tabel 4 menunjukan bahwa nilai *slump* untuk *Quarry* Bajawa yang memenuhi adalah *trial mix* 5, *trial mix*, dan *trial mix* 9 sedangkan nilai *slump* untuk *Quarry* Nobu yang memenuhi adalah *trial mix* 2, *trial mix* 3, *trial mix* 4, dan *trial mix* 5. Hasil pengujian kuat tekan pada *trial mix Quarry* Bajawa menunjukan bahwa kuat tekan yang memenuhi adalah *trial mix* 5, *trial mix*, dan *trial mix* 9. Sedangkan untuk untuk *Quarry* Nobu yang memenuhi adalah *trial mix* 2, *trial mix* 4, dan *trial mix* 5.

Komposisi campuran final

Berdasarkan komposisi campuran pada *trial mix* maka didapatkan job mix formula yang merupakan komposisi campuran yang paling optimal sehingga untuk job mix formula campuran beton menggunakan material Quarry Bajawa di ambil dari komposisi hasil *trial mix* 5, *trial mix* 8 dan *trial mix* 9. Sedangkan untuk job mix formula campuran beton menggunakan material Quarry Nobo diambil dari komposisi hasil *trial mix* 2, *trial mix* 4 dan *trial mix* 5. Selanjutnya komposisi pada job mix formula akan dijadikan campuran final untuk pengujian kuat tekan beton pada umur 7 hari, 14 hari dan 28 hari.

Komposisi campuran final dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Campuran final Quarry Bajawa

No.	Material	Kebutuhan material dalam 1 m³					
		JMF 40 MPa		JMF 50 MPa		JMF 55 MPa	
		(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)
1	Semen	517,5	1,00	552	1	621	1
2	Kerikil	995	1,92	1056	1,91	985	1,59
3	Pasir	782	1,51	781,2	1,42	855,6	1,38
4	Air	184	0,36	183,6	0,33	172,5	0,28
5	*Plastiment VZ*	1,541	0,003	1,776	0,003	1,265	0,002
6	*Sikament LN*	10,235	0,020				
7	*Viscocrete 3115N*	-		5,688	0,010	6,095	0,010
9	*Fly Ash*	90,85	0,176	98,4	0,178		
Total		2581,13		2678,66		2641,46	

Tabel 9. Campuran final Quarry Nobo

No.	Material	Kebutuhan material dalam 1 m³					
		JMF 40 MPa		JMF 50 MPa		JMF 55 MPa	
		(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)
1	Semen	517,50	1,00	552,00	1,00	621,00	1,00
2	Kerikil	995,00	1,92	1056	1,91	985,00	1,59
3	Pasir	782,00	1,51	781,2	1,42	855,60	1,38
4	Air	184,00	0,36	183,6	0,33	172,50	0,28
5	*Plastiment VZ*	1,54	0,003	1,776	0,003	1,27	0,002
6	*Sikament LN*	10,24	0,020	-	-	-	-
7	*Viscocrete 3115N*	-	-	5,69	0,010	6,10	0,010
9	*Fly Ash*	90,85	0,176	98,40	0,178	-	-
	Total	2581,13		2678,66		2641,46	

Pengujian final

Berdasarkan dari campuran final yang telah ada untuk Quarry Bajawa dan Nobo, maka akan dibuat sampel baru sebagai pengujian utama untuk di uji pada umur 7, 14 dan 28 hari dengan jumlah sampel pada setiap umur pengujian adalah 3 sampel sehingga total sampel untuk satu jenis campuran adalah 27 sampel.

Hasil pengujian final dari beton kinerja tinggi yang menggunakan material dari Quarry Bajawa dapat dilihat pada Tabel dan Grafik berikut ini.

Tabel 10. Slump final Quarry Bajawa

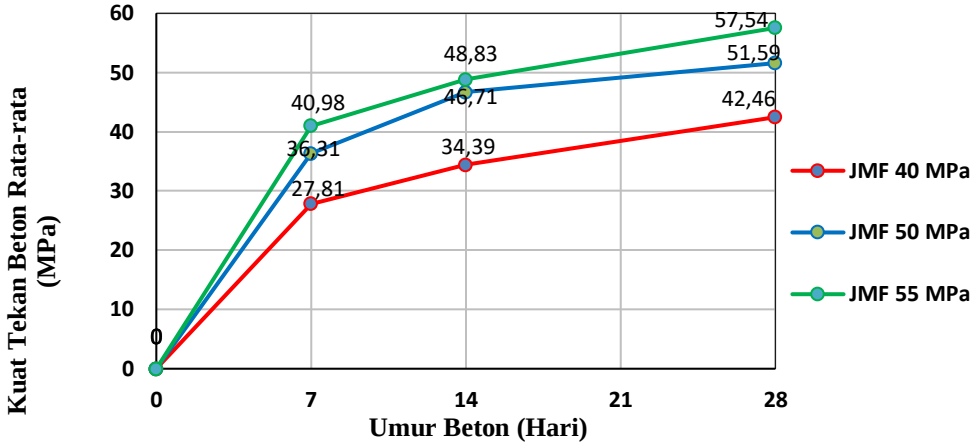
Campuran	Jumlah Benda Uji	Mutu Beton	Nilai *Slump*		Penambahan Air		Ket.
			Slump test	*Flow test*	1 silinder	Konversi ke 1 m³	
	(buah)	(MPa)	(cm)	(cm)	(ml)	(liter/m³)	
JMF 40 MPa	9	40	22	29,5	80,00	50,96	terpenuhi

Campuran	Jumlah Benda Uji	Mutu Beton	Nilai *Slump*		Penambahan Air		Ket.
			Slump test	*Flow test*	1 silinder	Konversi ke 1 m³	
	(buah)	(MPa)	(cm)	(cm)	(ml)	(liter/m³)	
JMF 50 MPa	9	50	22	41,5	80,00	50,96	terpenuhi
JMF 55 MPa	9	55	26	45,5	81,11	51,66	terpenuhi

Tabel 11. Kuat tekan final Quarry Bajawa

No.	Jenis Campuran	Kuat Tekan Rencana (fc')	Nilai Kuat Tekan (MPa)			Kuat Tekan (fc') Target ≥ 50 MPa
			7 hari	14 hari	28 hari	
1	JMF 40 MPa	40 MPa	27,81	34,39	42,46	Tidak Memenuhi
2	JMF 50 MPa	50 MPa	36,31	46,71	51,59	Memenuhi
3	JMF 55 MPa	55 MPa	40,98	48,83	57,54	Memenuhi

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton kinerja tinggi di atas maka diperoleh Grafik seperti yang ditampilkan dibawah ini.



Gambar 1. Grafik hubungan antara umur beton dengan kuat tekan beton kinerja tinggi (Quarry Bajawa)

Hasil pengujian final dari beton kinerja tinggi yang menggunakan material dari Quarry Nobo dapat dilihat pada Tabel dan Grafik berikut ini.

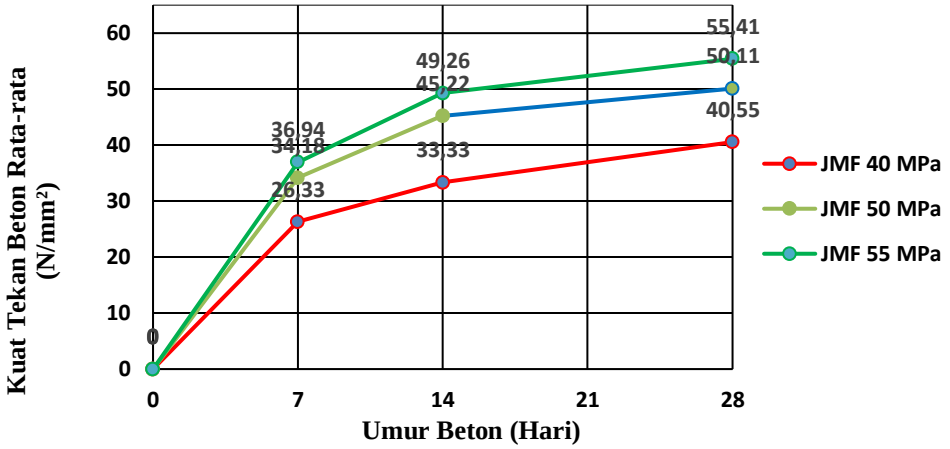
Tabel 12. Slump final Quarry Nobo

Campuran	Jumlah Benda Uji	Mutu Beton	Nilai *Slump*		Penambahan Air		Ket.
			Slump test	*Flow test*	1 silinder	Konversi ke 1 m³	
	(buah)	(MPa)	(cm)	(cm)	(ml)	(liter/m³)	
JMF 40 MPa	9	40	21	29.0	650	40.00	terpenuhi
JMF 50 MPa	9	50	23	45.5	680	48.12	terpenuhi
JMF 55 MPa	9	55	24	47.0	700	49.54	terpenuhi

Tabel 13. Kuat tekan final Quarry Bajawa

No.	Jenis Campuran	Kuat Tekan Rencana (fc')	Nilai Kuat Tekan (MPa)			Kuat Tekan (fc') Target ≥ 50 MPa
			7 hari	14 hari	28 hari	
1	JMF 40 MPa	40 MPa	26.33	33.33	42,46	Tidak Memenuhi
2	JMF 50 MPa	50 MPa	34.18	45.22	51,59	Memenuhi
3	JMF 55 MPa	55 MPa	36.94	49.26	57,54	Memenuhi

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton kinerja tinggi di atas maka diperoleh Grafik seperti yang ditampilkan dibawah ini.



Gambar 2. Grafik hubungan antara umur beton dengan kuat tekan beton kinerja tinggi (Quarry Nobo)

Umur beton mengacu pada berapa lama beton telah mengeras sejak dicor. Pengukuran umur beton dilakukan sehari setelah hari pencampuran dan pengecoran. Penggunaan material lokal yang berasal dari Bajawa dan Nobo memiliki pengaruh yang signifikan terhadap umur beton dengan kekuatannya. Kualitas agregat seperti kadar air, kadar lumpur, berat jenis, berat isi, gradasi agregat dan permukaan agregat yang baik akan membantu dalam menghasilkan beton dengan kekuatan akhir yang tinggi.

Umur beton sendiri mempengaruhi sifat mekanis dan kekuatan beton. Selama proses pengerasan, beton mengalami hidrasi, dimana partikel semen bereaksi dengan air dan membentuk struktur padat.

Berdasarkan grafik hubungan antara kuat tekan beton kinerja tinggi dengan umur beton kinerja tinggi menunjukkan bahwa semakin lama umur beton kinerja tinggi maka terjadi peningkatan terhadap kuat tekan beton, dimana kuat tekan maksimum terjadi pada umur beton 28 hari dengan kuat tekan rata-rata pada tiap campuran mengunakan material Quarry Bajawa berturut-turut adalah 42,46 MPa, 51,59 MPa, dan 57,54 MPa. Sedangkan kuat tekan rata-rata pada tiap campuran mengunakan material Quarry Nobo berturut-turut adalah 40,55 MPa, 50,11 MPa, dan 55,41 MPa. Peningkatan kekuatan beton paling signifikan terjadi pada umur 28 hari karena lamanya proses perawatan beton yang direndam dalam air dimana semakin lama perawatan beton yang direndam dalam air maka kuat tekan beton akan meningkat karena proses hidrasi kimia antara bahan-bahan pembentuk beton terus terjadi selama 28 hari.

4. KESIMPULAN

Pengujian agregat yang berasal dari Quarry Bajawa dan Nobu menunjukan bahwa material lokal tersebut dapat digunakan sebagai bahan pembuatan beton kinerja tinggi. Pemanfaatan material lokal berpengaruh baik terhadap nilai *workability* beton dan kuat tekan beton. Dengan menggunakan komposisi yang tepat dan kondisi agregat yang bebas dari lumpur dan bahan organik meningkatkan kemampuan beton untuk dikerjakan dan juga meningkatkan kekuatan beton. Saat adukan beton mudah dikerjakan dan memiliki *workability* yang baik, maka distribusi partikel semen dan agregat akan lebih merata. Distribusi partikel yang merata dapat menghasilkan beton yang lebih padat dan kuat.

Penggunakaan bahan tambah seperti Superplasticizier memungkinkan menciptakan adukan beton dengan tingkat *workability* yang baik tanpa terjadi segregasi. Namun, pada beberapa kasus *trial mix* yang telah dilakukan *workability* yang terlalu tinggi juga dapat mengurangi kuat tekan karena terjadinya segregasi dan bleeding.

Pengujian kekuatan beton menunjukan bahwa beton kinerja tinggi yang dibuat menggunakan material lokal mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton. Pada beton kinerja tinggi yang menggunakan material dari Quarry Bajawa diketahui memiliki nilai kuat tekan yang lebih besar dari pada beton kinerja tinggi yang menggunakan material dari Quarry Nobu yang berarti bahwa material yang dihasilkan dari Quarry Bajawa memiliki kualitas yang lebih bagus untuk pembuatan beton kinerja tinggi dibandingkan dengan material dari Quarry Nobu.

DAFTAR PUSTAKA

Abrams, Duff. (1918). *Design of Concrete Mixtures.* New York. McGraw-Hill Book Company.
Aitcin, Jean Michel. (1998). *High Performance Concrete.* London. E & FN Spon.
Asroni A. (2010). *Balok dan Plat Beton Bertulang.* Yogyakarta: Graha Ilmu.
Iswandi Imran (2022), *Penerapan High-Performance Concrete pada Konstruksi Gedung Tinggi di Indonesia*, webinar

HAKI-ACI.
Krisnamurti. 2017. *Perencanaan Campuran Beton Kinerja Tinggi dengan Semen Portland Pozzolan (PPC) menggunakan Metode Volume Absolut.* Universitas Jember, Jawa Timur.
Neville, Adam M. (1996). *Properties of Concrete.* New York : Wiley.
Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton.* Yogyakarta: Andi.
PBI. 1971. *Peraturan Beton Indonesia.* Bandung: Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik.Sulistyani, R. D., Nur'aeni, N. 2005. *Pengaruh Abu Sekam Padi Terhadap Beton Kinerja Tinggi*. Yogyakarta: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
Tjokrodimulyo, Kardiyono. (1995). *Teknologi Beton*. Jurusan Ilmu-ilmu Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

Studi Numerik Kinerja Bangunan Rumah Tinggal Sederhana Terhadap Bahaya Gempa Bumi

Edy Purwanto[1)], SA Kristiawan[1)], Achmad Basuki[1)], Ahda Dinansya Trisnawan Putra[1)], Arda Arditama[1)]

[1)]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
***e-mail**: edypurwanto68@staff.uns.ac.id*

ABSTRAK

Pembangunan perumahan di wilayah Indonesia harus mempertimbangkan potensi terjadinya gempa bumi, karena wilayah Indoensia terletak di wilayah *ring of fire* yang sangat rawan terjadinya gempa bumi. Beberapa kejadian gempa menunjukkan efek kerusakan yang sangat besar terutama pada hunian masyarakat dan bangunan infrastruktur lainnya. Penelitian ini akan mengkaji kinerja seismik dengan menguji secara numerik model bangunan rumah sederhana dengan *software seismostruct*. Model benda uji yang dianalisis merepresentasikan tipe hunian di masyarakat. Mutu dan detail pengerjaan dari model benda uji berdasarkan pada data penelitian di lapangan. Model benda uji tersebut selanjutnya dilakukan uji numerik dengan software Seismostruct. Model diberi beban akibat beban mati, beban hidup dan beban gempa. Berdasarkan hasil dan analisis model benda uji maka didapatkan hasil bahwa kinerja seisimik dari model benda uji mempunyai persentase kerusakan yang cukup tinggi , yaitu berdasar pada kondisi beban gempa DBE, persentase keruakan pada kondisi *slight* dan *medium* mencapai nilai 100%, sementara pada level *extensive* mencapai nilai 99,98% dan pada level *complete* mencapai nilai 99,55%. Sementara berdasarkan gempa MCE maka persentase kerusakan pada level *slight, medium* dan *extensive* mencapai nilai 100% sementara pada level *complete* mencapai nilai 99,97%. Berdasarkan pada nilai persentase tersebut maka kinerja seismik model benda uji mempunyai kinerja yang sangat rendah dan sangat berbahaya terhadap keselamatan penghuni dan bangunannya karena akan berpotensi mengalami kegagalan total.

Kata kunci: rawan gempa, hunian, *seismostruct,* kerusakan, kinerja seismik.

1. PENDAHULUAN

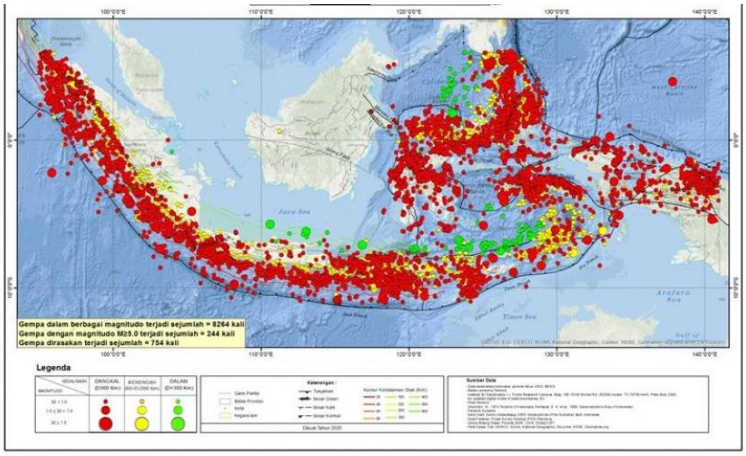
Indonesia terletak di wilayah yang mempunyai kerawanan tinggi terhadap bahaya gempa bumi. Bangunan, khususnya rumah tinggal yang mendukung kehidupan masyarakat sangat rentan terhadap bahaya gempa bumi, hal ini terbukti dengan banyaknya bangunan hunian masyarakat yang hancur akibat adanya bencana gempa bumi. Sebagai salah satu kebutuhan pokok manusia maka perumahan memegang peranan yang sangat penting untuk mewujudkan kesejahteraan dan kenyamanan dalam masyarakat. Ketersediaan tempat tinggal yang kuat dalam mengantisipasi beban gempa sangat penting bagi setiap manusia tetapi di sisi lain terdapat banyak hambatan untuk bisa memenuhi kebutuhan tersebut, terutama adalah ketidakmampuan secara finansial dari setiap orang. Untuk membantu masyarakat kurang mampu dalam memenuhi kebutuhan akan papan atau tempat tinggal maka pemerintah dapat bekerja sama dengan pihak lain memberikan subsidi perumahan bagi masyarakat yang mempunyai keterbatasan ekonomi. Langkah ini bisa menekan masyarakat yang tidak memilikki tempat tinggal sendiri untuk segera memilikkinya. Rumah-rumah sederhana termasuk rumah subsidi di satu sisi sangat penting keberadaannya karena sangat dibutuhkan masyarakat golongan ekonomi lemah, tetapi sebagai tempat tinggal mesti juga mempertimbangkan aspek teknis terkait dengan kenyamanan, kekuatan dan masa layan atau umur bangunan. Sehingga untuk jangka menengah dan jangka panjang mesti dipikirkan suatu bangunan yang murah tetapi juga memenuhi persyaratan bangunan yang baik sesuai standar yang berlaku di Indonesia [1]–[3], khususnya terhadap bahaya gempa bumi, yaitu boleh rusak tetapi tidak boleh roboh sehingga ketika ada peristiwa alam gempa bumi bangunan tersebut tidak menimbulkan korban jiwa bagi penggunanya.

Peristiwa gempa bumi yang pernah terjadi dan menimbulkan korban cukup besar baik harta maupun jiwa antara lain adalah gempa bumi Yogyakarta, Sabtu, 26 Mei 2006 [4] , gempa bumi Lombok, 5 Agustus 2018 [5], gempa Palu, 28 September 2018 [6], gempa bumi Cianjur, 21 Nopember 2022 [7]. Besarnya potensi gempa di wilayah Indonesia karena wilayah Indonesia terletak di antara tiga lempeng tektonik dunia, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Indo Australia dan lempeng Pasifik. Lempeng-lempeng dan juga sesar yang ada di Indonesia ini sangat aktif karena terbukti seringnya terjadi peristiwa gempa bumi di Indonesia dengan korban harta dan nyawa yang cukup besar.

Penelitian ini akan melakukan pengujian numerik dengan meninjau kinerja seismik dari rumah tinggal sederhana, di mana rumah yang diteliti merupakan representasi rumah hunian yang banyak digunakan oleh masyarakat di Indonesia, model bangunan dalam pengujian ini diasumsikan berada wilayah Surakarta.

Kinerja seismik merupakan langkah mitigasi gempa bumi yang sangat penting karena akan menjadi rujukan dalam menangani kemungkinan terjelek akibat peristiwa gempa bumi. Standar untuk menentukan persentase kerusakan dari model benda uji menggunakan acuan dari Hazus [8]. Kriteria kerusakan dari Hazus dibedakan menjadi empat kategori, yaitu *slight* (DS1), *medium/moderate* (DS2), *extensive* (DS3) dan *complete* (DS4). Bangunan perumahan rata-rata dibangun hanya berdasarkan adat istiadat atau dengan kebiasaan yang tidak berdasarkan pada standar peraturan yang baik sehingga masuk kategori bangunan non teknis, sehingga kinerjanya ketika mengalami beban gempa akan mengalami kehancuran yang sangat besar [9], [10]. Melihat potensi gempa yang sangat besar yang terjadi di wilayah Indonesia seperti pada Gambar 1, maka mitigasi bencana gempa bumi menjadi pertimbangan dalam

peneliti mengetahui potensi dan kinerja dari model benda uji. Sehingga bisa dijadikan rujukan pada langkah intrusi yang lebih konkrit yang akan menghasilkan kajian yang sangat berharga untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan hunian di masyarakat, misalnya dengan memperbaiki detail tulangan maupun memperkuat bagian suatu elemen bangunan dengan bahan yang sudah banyak digunakan pada beberapa bangunan dan infrastruktur, misalnya dengan carbon[11], [12], textile reinforced mortar (TRM) [13] maupun pelat baja[14][9]

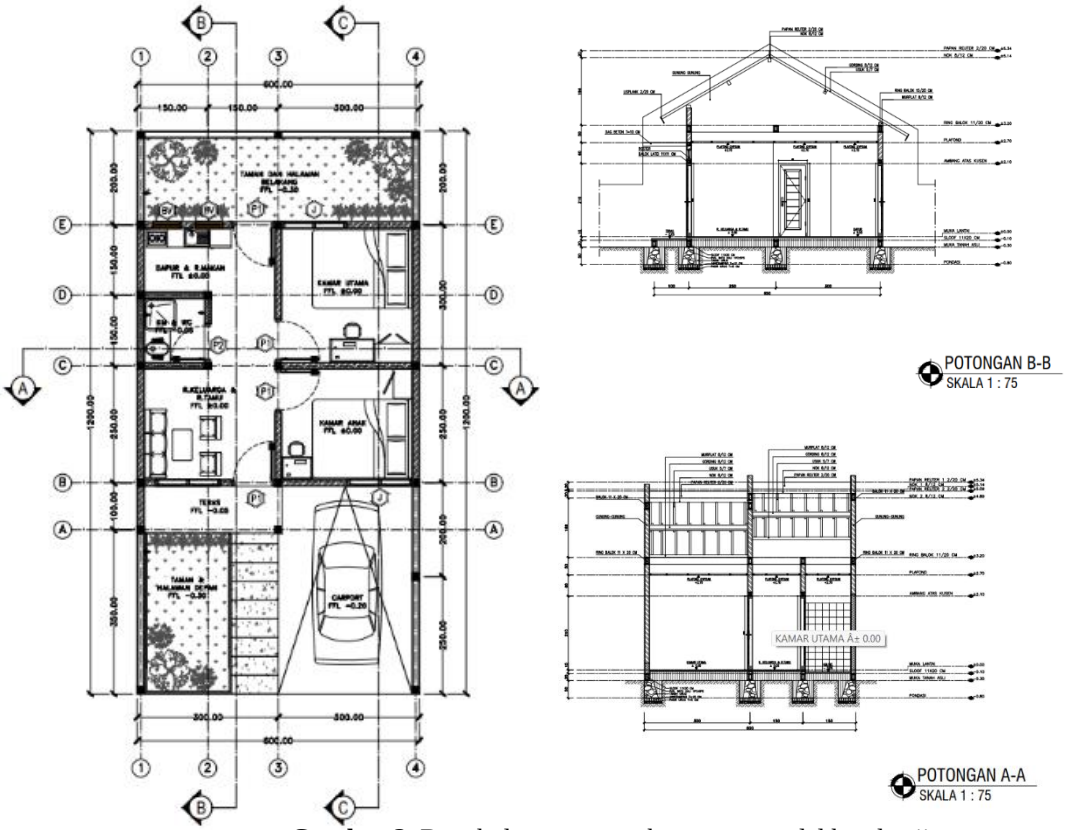


Gambar 1. Peta seismisitas Indonesia

2. METODOLOGI

2.1 Denah model

Model yang dipakai pada penelitian ini berupa rumah tinggal tipe 36 seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah dan potongan bangunan model benda uji

2.2 Materil

Spesifikasi bahan yang diguanakan pada model benda uji disajikan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi bahan

Mutu baja tulangan utama (fy)	479,99 MPa
Mutu baja tulangan sengkang (fy)	426,74 MPa
Mutu bata merah	2 MPa
Mutu mortar	2 MPa

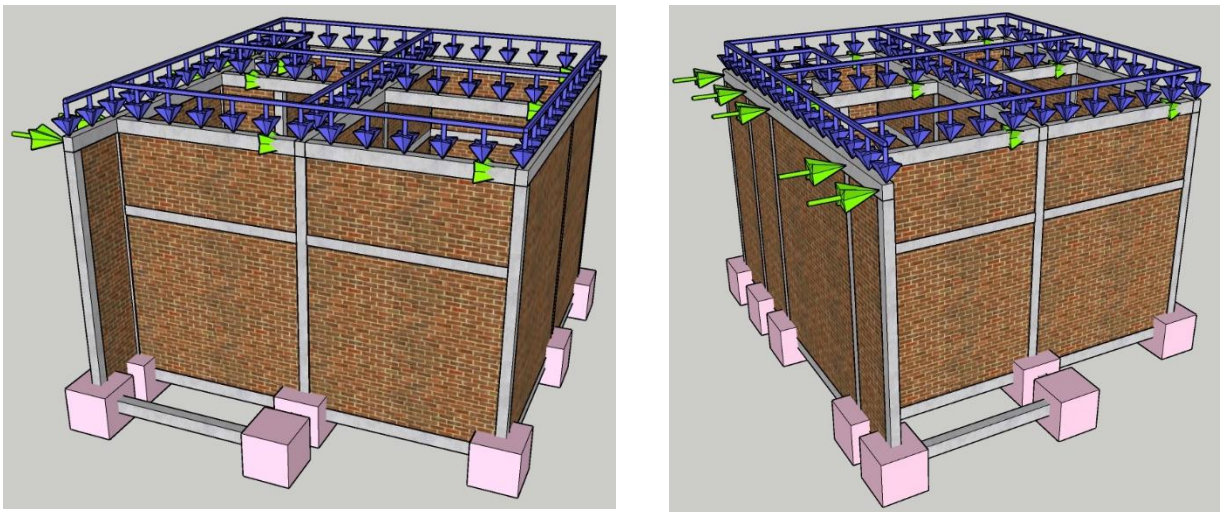
2.3 Dimensi dan penulangan

Tabel 2. Dimensi dan penulangan model benda uji

Elemen	Dimensi	Tulangan Utama	Tulangan Geser
Balok sloof dan balok ring	150 mm x 200 mm	Atas 2D10, Bawah 2D10	D6 – 200
Kolom	150 mm x 150 mm	4D10	D6 – 200
Balok Latei	150 mm x 200 mm	Atas 2D10, Bawah 2D10	D6 – 200

2.4 Pembebanan

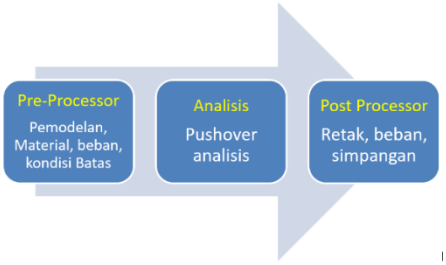
Beban yang dikerjakan meliputi beban mati berat sendiri, beban mati tambahan (atap, dinding) dan beban gempa. Ilustrasi pembebanan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemebebanan pada model benda uji dengan software seismostruct pada arah sumbu X dan sumbu Y

2.5 Pengujian Seismostruct

Model benda uji yang telah ditetapkan selanjutnya dilakukan analisis numerik dengan *software Seismostruct*. Langkah dalam analisis numerik adalah sebagai berikut :

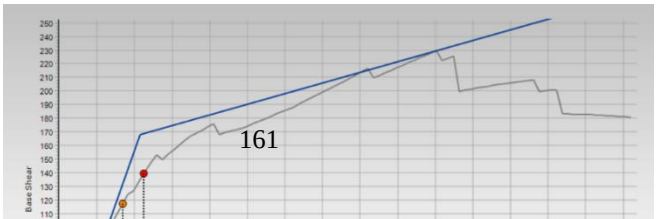


Gambar 4. Denah dan potongan bangunan model benda uji

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hubungan beban dan simpangan

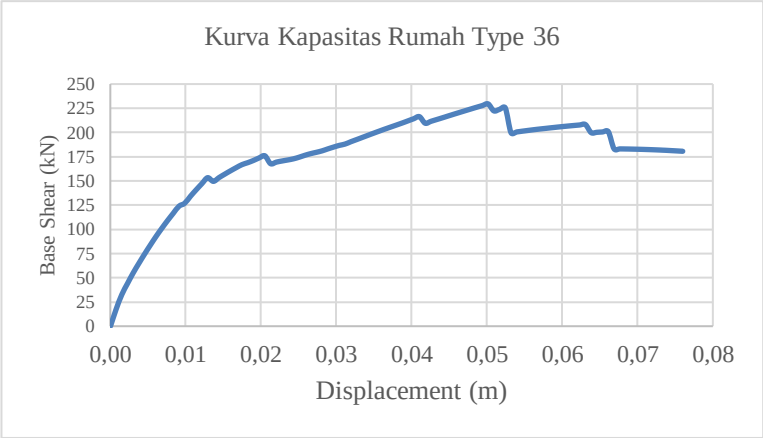
Berdasarkan output analisis *Seismostruct* maka didapatkan grafik pushover seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik *pushover* analisis model benda uji dari *Seismostruct*

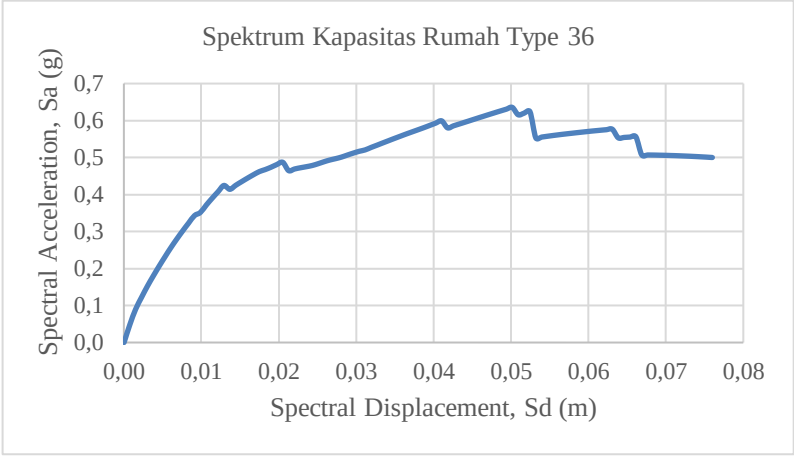
3.2 Kurva kapasitas dan spektrum kapasitas

Berdasarkan nilai beban dan simpangan pada pushover analsisi maka ditampilkan garfik kapasitas seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik kurva kapasitas model benda uji

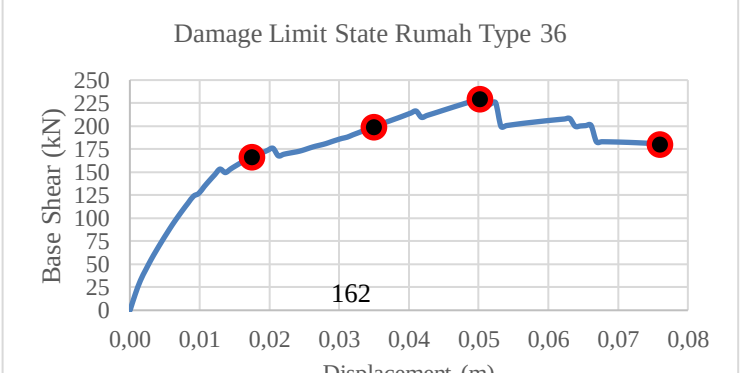
Selanjutnya untuk mendapatkan nilai-nilai damage state dari model benda uji maka grafik kurva kapasitas dikonversi menjadi kurva kapasitas dalam format ADRS (*acceleration and displacement respon spectrum*).



Gambar 7. Spektrum kapasitas model benda uji

3.3 Batas kerusakan

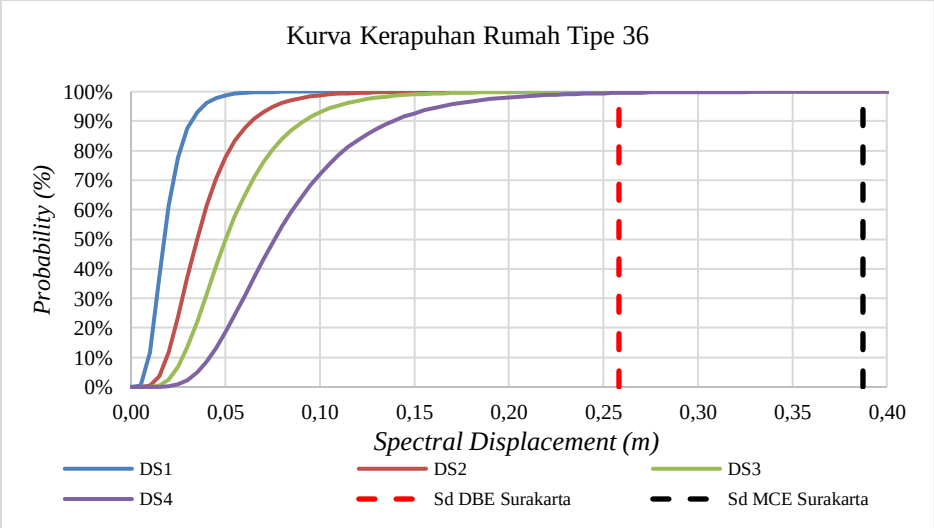
Penentuan batas kerusakan mengacu pada ketentuan Hazus,



Gambar 8. Penentuan batas-batas kerusakan

3.4 Analisis kerapuhan

Untuk mengetahui kinerja dari model rumah sederhana maka dilakukan analisis kerapuhan. Analisis pada disain rumah sederhana ini diasumsikan berlokasi di wilayah Surakarta sehingga mengikuti parameter gempa yang berlaku untuk wilayah Surakarta. Asumsi yang digunakan pada tanah sedang sehingga untuk tinjauan pada kondisi kelas situs tanah bisa menghasilkan nilai yang berbeda-beda.



Gambar 9. Kurva Kerapuhan Rumah Sederhana

Tabel 3. Evaluasi *Diskrit Damage* Berdasarkan DBE dan MCE

Limit State	Sd DBE = 0,2582 m		Sd MCE = 0,3974 m	
	Probability	*Discrete Damage*	*Probability*	*Discrete Damage*
Undamage	0.00%		0.00%	
Slight	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%
Medium	100.00%	0.02%	100.00%	0.00%
Extensive	99.98%	0.43%	100.00%	0.02%
Complete	99.55%	99.55%	99.97%	99.97%
Jumlah		100.00%		100.00%

Berdasarkan pada analisis probabilitas kerapuhan dengan kondisi DBE (gempa dengan periode ulang 500 tahun) dan kondisi MCE (gempa dengan periode ulang 2500 tahun) menunjukkan bahwa jika bangunan yang direncakan terkena gempa mengalami kerusakan hampir 100% baik pada kondisi ringan (*slight*) maupun pada kondisi paling berat (*complete*).

4. KESIMPULAN

Berdasarakan pada hasil dan analisis dari model benda uji dengan uji numerik dengan software Seismostruct maka dapat disimpulkan bahwa model benda uji yang mewakili kondisi hunian rumah tinggal sebagai berikut persentase kerusakan berdasarkan gempa DBE pada kondisi *slight* dan *medium* sebesar 100 %, untuk level *extensive* sebesar 99,98% sementara pada level *complete* sebesar 99,55 %, persentase kerusakan berdasarkan gempa MCE pada kondisi *slight, medium* dan *extensive* sebesar 100 %, level *complete* sebesar 99,97 %, persentase kerusakan yang besar pada semua level kerusakan menunjukkan bahwa kinerja seismik model benda uji yang merepresentasikan hunian di masyarakat mempunyai kinerja seismik yang sangat jelek, kinerja seismik model benda uji menjadi bahan rujukan dalam mitigasi bencana gempa bumi khususnya pada rumah tempat di masyarakat.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] ...n struktur lain 1727:2020," *Badan Standardisasi Nas. 1727:2020*, no. 8, pp. 1–336, 2020.

[2] Badan Standardisasi Nasional (b), "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung," *Sni 17262019*, no. 8, p. 254, 2019.

[3] Badan Standarisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung SNI 2847-2013*. Jakarta, Indonesia, 2013.

[4] Id.wikipedia.org, "Gempa bumi Yogyakarta 2006 - Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_Yogyakarta_2006.

[5] Wikipedia bahasa Indonesia, "Gempa bumi Lombok Juli 2018 - Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_Lombok_Agustus_2018.

[6] "Gempa bumi dan tsunami Sulawesi 2018 - Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_dan_tsunami_Sulawesi_2018.

[7] Id.wikipedia.org, "Gempa Bumi Cianjur 2022- Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." [Online]. Available: https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_Yogyakarta_2006.

[8] FEMA, *HAZUS-MH MR4 Multi-Hazar d Loss Estimation Methodology – Earthquake Model:Technical Manual. Department of Homeland Security*. Washington DC: FEMA, 2003.

[9] E. Purwanto, P. A. Adri, S. A. Kristiawan, S. Sangadji, and S. H. Alfisa, "Strengthening of Non-engineered Building Beam-Column Joint to Increase Seismic Performance with Variation of Steel Plate Width BT - Proceedings of the 5th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering," S. A. Kristiawan, B. S. Gan, M. Shahin, and A. Sharma, Eds. Surakarta, Indonesia: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 215–224.

[10] S. A. Kristiawan, I. R. Hapsari, E. Purwanto, and M. Marwahyudi, "Evaluation of damage limit state for rc frame based on fe modeling," *Buildings*, vol. 12, no. 1, pp. 1–22, 2022, doi: 10.3390/buildings12010021.

[11] Y. Deng *et al.*, "Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of RC beams strengthened with NSM CFRP prestressed concrete prisms," *Compos. Struct.*, vol. 257, p. 113385, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113385.

[12] M. H. Mahmoud, H. M. Afefy, N. M. Kassem, and T. M. Fawzy, "Strengthening of defected beam-column joints using CFRP," *J. Adv. Res.*, vol. 5, no. 1, 2014, doi: 10.1016/j.jare.2012.11.007.

[13] E. Tzoura, E. Tzoura, and T. C. Triantafillou, "Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets Innovative seismic isolation of infill walls View project Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets," doi: 10.1617/s11527-014-0470-9.

[14] Y. Rahmi, A. Saputra, and S. Siswosukarto, "Numerical Modelling of Interior RC Beam-Column Joints for Non-Engineered Buildings Strengthened Using Steel Plates," vol. 138, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201713802007.

STUDI AWAL PENGEMBANGAN METODE PERAWATAN BETON DENGAN METODE BIOMINERALISASI : *LITERATURE REVIEW*

Alvin Alfredo Bara[1*] dan Remigildus Cornelis[1]

[1]Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Universitas Nusa Cendana, Jl. Acisucipto, Kupang*
***e-mail**: alvin_bara@staf.undana.ac.id*
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Acisucipto, Kupang
e-mail: remi@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan referensi inovasi penggunaan bakteri dalam masa perawatan beton. Inovasi pada material beton dengan metode *self-healing* memungkinkan beton untuk memperbaiki retakan pada beton dengan menggunakan agen berupa bakteri. Dari beberapa percobaan yang pernah dilakukan, pengguanaan bakteri pada mortar dan beton meningkatkan kuat tekan beton pada masa perawatan beton 28 hari. Penggunaan bakteri pada beton *self-healing* dengan cara menambahkan bakteri dalam air yang digunakan pada saat pencampuran beton. Penelitian ini dilakukan dengan metode *Systematic Literature Review* (SLR) mengacu pada literatur tentang penelitian beton *self-healing*. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu dimulai dengan identifikasi awal, pemilihan jurnal yang sesuai, analisis metode dan penentuan metode yang dapat diterapkan dalam perawatan beton. Hasil analisis menunjukkan bahwa pembuatan beton *self-healing* dilakukan dengan cara mencampur agen *self-healing* dalam air dan dicampurkan ke dalam beton atau dengan menjadikan agen *self-healing* sebagai bahan tambah dalam pencampuran beton dengan variasi spesis bakteri dan proporsi pencampuran. Penelitian ini membuka jalan agar dilakukan penelitian mengenai metode perawatan beton menggunakan bakteri serta pengujian terhadap interaksi bakteri dan serat sebagai bahan tambah dalam upaya peningkatan kuat tekan beton.

Kata kunci : *beton, self-healing, perawatan beton, bakteri*

1. PENDAHULUAN

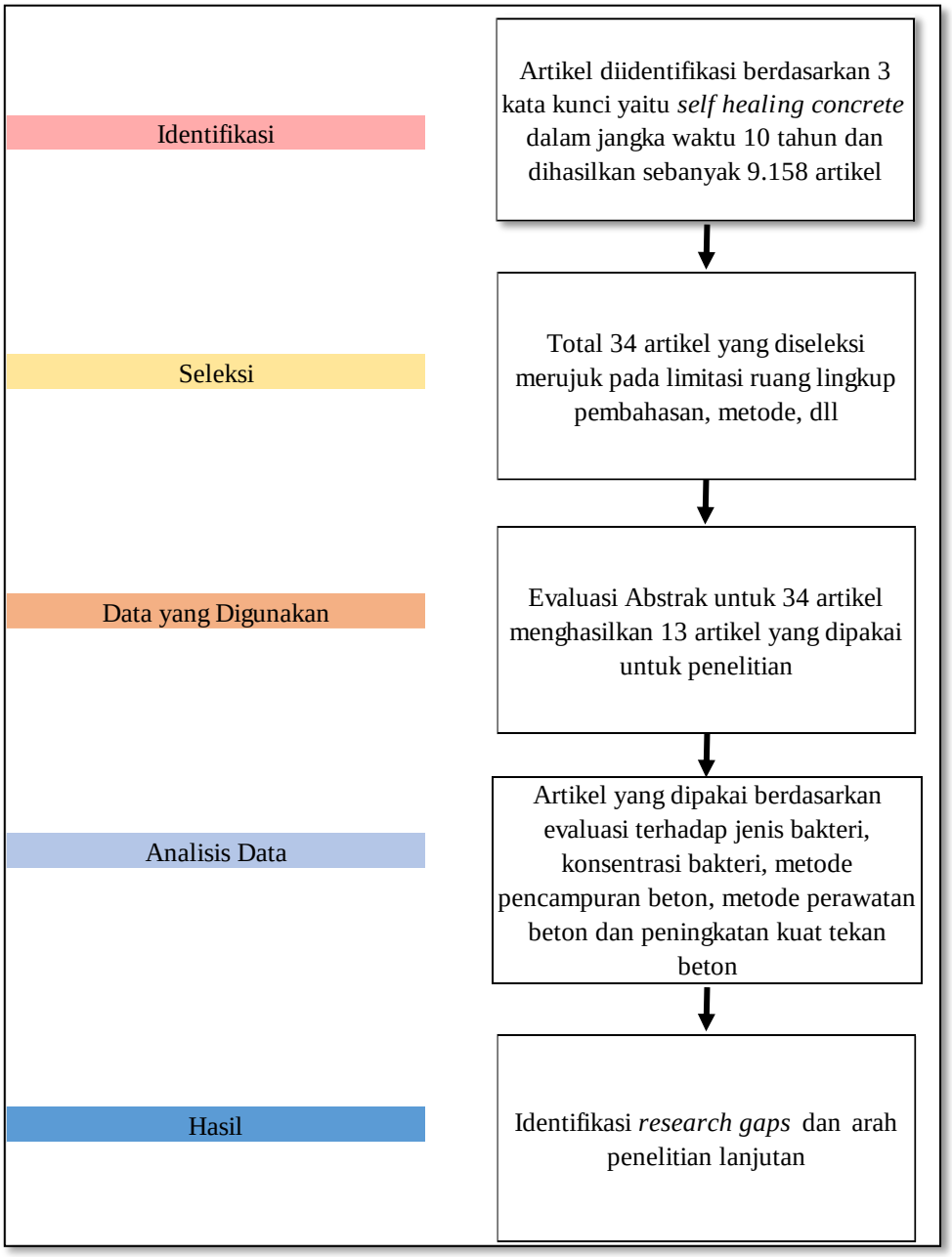
Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan dan efisien di dunia. Beton tahan lama, dapat menahan tekanan tekan yang tinggi, lebih murah daripada sebagian besar material konstruksi lainnya, dan dapat dicetak dalam berbagai bentuk. Meskipun demikian, beton retak karena kelemahannya dalam hal tegangan, penyusutan, beban lelah, dan di bawah pengaruh kondisi lingkungan. Retakan mikro ini dapat mengurangi ketangguhan beton, meningkatkan permeabilitas, yang pada akhirnya dapat menyebabkan berkurangnya integritas struktural, daya tahan, dan masa pakai beton. Beton yang dapat memperbaiki diri dalam konteks tersebut menawarkan solusi yang sebenarnya (Qureshi and Al-Tabbaa 2020). Penyembuhan mandiri (self-healing) pada beton dapat dicapai secara autogen yaitu melalui pencampuran optimal bahan semen dan bakteri berdasarkan karakteristik bawaanya atau dicapai secara autonom dengan cara mencampurkan bakteri dengan kadar tertentu agar dapat meningkatkan proses pengikatan beton yang terjadi. Penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa bakteri, sebagai bentuk penyembuhan otonom adalah salah satu agen penyembuhan diri yang umum digunakan pada material berbasis semen (Tziviloglou et al. 2016; Wang et al. 2012).

Proses utama penyembuhan bakteri pada beton dilakukan melalui pengendapan kalsium karbonat (CaCO3), yang mengisi retakan dan mendorong pemulihannya. Selain itu, presipitasi CaCO3 ini berpotensi menembus rongga internal di dalam beton yang tidak rusak, sehingga meningkatkan kepadatan dan kekuatan keseluruhannya. Namun, hal ini mungkin tidak selalu benar karena berbagai faktor yang mempengaruhi bakteri dan campuran, dapat mempengaruhi proses berpengaruh pada kekuatan beton. Hasilnya, banyak peneliti yang mengeksplorasi pengaruh bakteri terhadap sifat mekanik material berbahan semen, dengan memanfaatkan beragam variabel seperti jenis bakteri yang digunakan (Rauf et al. 2020; Bhaskar et al. 2017), konsentrasi bakteri (Zaerkabeh et al. 2022; Zheng, Qian, and Su 2021), desain campuran beton dan bahan tambah (Justo-Reinoso et al. 2022; Mirshahmohammad et al. 2022), serta pengontrolan kondisi lingkungan dan perawatan beton (Suleiman and Nehdi 2021; Tayebani and Mostofinejad 2019).

2. METODE

Tinjauan pustaka secara umum dapat digambarkan sebagai cara sistematis untuk mengumpulkan dan mensintesis penelitian sebelumnya. Tinjauan pustaka yang efektif dan dilakukan dengan baik sebagai metode penelitian menciptakan landasan yang kuat untuk memajukan pengetahuan dan memfasilitasi pengembangan teori. Dengan mengintegrasikan temuan dan perspektif dari banyak temuan empiris, tinjauan pustaka dapat menjawab masalah penelitian dengan kelebihan bahwa belum pernah ada penelitian sebelumnya. *Systematic Literature Review* (SLR)

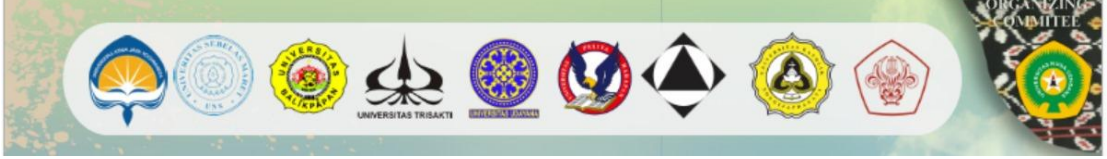
dapat dijelaskan sebagai metode dan proses penelitian untuk mengidentifikasi dan menilai secara kritis penelitian yang relevan, serta untuk mengumpulkan dan menganalisis data dari penelitian tersebut. Tujuan dari tinjauan sistematis adalah untuk mengidentifikasi semua bukti empiris yang sesuai dengan kriteria inklusi yang telah ditentukan sebelumnya untuk menjawab pertanyaan atau hipotesis penelitian tertentu. Dengan menggunakan metode yang eksplisit dan sistematis saat meninjau artikel dan semua bukti yang tersedia, bias dapat diminimalkan, sehingga memberikan temuan yang dapat diandalkan yang darinya kesimpulan dapat ditarik dan keputusan dapat dibuat (Snyder 2019). Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu identifikasi, seleksi, yang ditampilkan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Proses SLR

3. HASIL

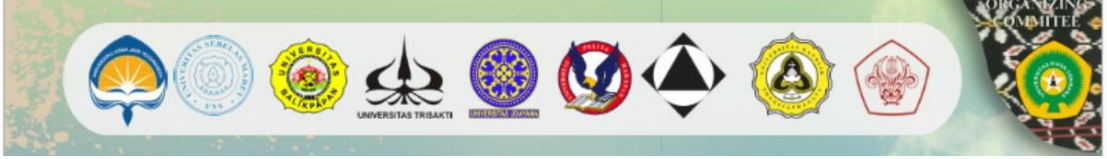
Metode *Systematic Literature Review* ini dipakai untuk menelaah 17 artikel penelitian yang diterbitkan selama 10 tahun terakhir dari tahun 2015-2024. Data hasil analisa setiap artikel ditampilkan dalam Tabel 3.



Tabel 3. Ringkasan Hasil Analisa Penelitian tentang Beton *Self-healing*

Ref	Jenis Bakteri	Jenis Sampel	Media Perawatan	Lama Perawatan	Peningkatan Kekuatan	Lokasi Penelitian
(Rauf et al. 2020)	Bacillus subtillis Bacillus cohnii Bacillus spheaericus	Beton	Air	28 hari	B.sub. Coir (+8) B.sph. Coir (+12) B.sub. Coir (+4) B.sub. Rami (+24) B. sph. Rami (+33) B.coh. flax (+29) B.sub. Rami (+2) B.sph. Rami (+13) B.coh. Jute (+13)	Universitas Sains dan Teknologi Nasional (USTN), Islambad, Pakistan Institut Konservasi Sumber Daya Hayati (SDH), Pusat Penelitian Pertanian Nasional (PPPN), Islambad, Pakistan.
(Jena et al. 2020)	Bacillus subtilis	Beton	Air	28 hari	Kekuatan Tekan Konsentrasi 10^5 (+ 32%) Konsentrasi 10^6 (+ 21,84%)	Odisha, India
(Zheng, Qian, and Su 2021)	Kalsium laktat dan bubuk spora bakteri (RB)	Mortar	Air	28 hari	Kekuatan Tekan RB1% (+4) RB2% (+13) RB3% (+17)	Laboratorium Utama Jiangsu Untuk Bahan Konstruksi, Universitas Tenggara, Nanjing, Tiongkok
(Tayebani and Mostofinejad 2019)	Sporosarcina pasteurii	Mortar	Air	28 hari	Kuat tekan 60%	Jurusan Teknik Sipi;, Universitas Teknologi Isfahan (UTI), Isfahan, Iran.
(Bhaskar et al. 2017)	Sposarcina ureae Sporosarcina	Mortar	Urea	28 hari	Kekuatan tekan S.past. (+14)	Jurusan Teknik Sipil, Universitas Ryerson, 350 Victoria St., Toronto, ON,

	pasteurii				S.urea. (+8) campuran S.past. (+2) S.urea. (Ÿ14)	M5B 2K3, Kanada.
(Helal et al. 2024)	Bacillus Sphaericus	Beton	Air Larutan Sulfat	180 hari 180 hari	Kekuatan tekan (+47%) Kekuatan tekan (+48%)	University of Missouri, Columbia, USA
(Siddique et al. 2016)	Bakteri ureolitik	Beton	Air	28 hari	Kekuatan tekan: 0 DFD (+11) 10 BFD (+8) 20 BFD (+2) 30 BFD (+3)	Jurusan Teknik sipil, Universitas Thapar, Patiala, Punjab, India.
(Tan et al. 2022)	Bacillus cohnii	Mortar	Air	28 hari	Kekuatan tekan Komp. (Ÿ 9) kekuatan lentur (Ÿ 5)	Laboratorium Utama Material Teknik Sipil Tinggkat Lanjut (Universitas Tonggi), Kementrian Pendidikan, Shanghai, 201804, Tiongkok.
(Tie et al. 2024)	Bacillus subtilis	Beton	larutan Na2SO4	28 hari	Kekuatan lentur Kategori 1: Max: 8,7 MPa Rata-rata: 8,2 MPa Kategori 2: Max: 8,3 MPa Rata-rata: 8,2 MPa	Fakultas Teknik Sipil dan Transportasi, Universitas Kehutanan Timur Laut, Harbin, Tiongkok.
(Justo-Reinoso et al. 2022)	Bacillus cohnii DSM 6307	Beton	Air	28 hari	Kekuatan tekan Komp. (Ÿ 50)	Laboratorium Utama Daya Tahan Kelautan, Teknik



					kekuatan lentur (Ÿ 42)	Sipil, Fakultas Teknik Sipiil dan Trasportasi, Shenz, Tiongkok.
(Mirshahmohammad et al. 2022)	Sporosarcina pasteurii	Balok Beton	Air	28 hari	Kekuatan tekan Nu. (+27) Chu. (+9) Daya tarik Nu. (+18) Chu. (+6)	Jurusan Teknik Sipil, Universitas Zanjan, Zanjan, Iran. Lembaga Penelitian Teknik Biologi Modern, Universitas Zanjan, Zanjan, Iran
(Zaerkabeh et al. 2022)	Sporosarcina pasteurii	Mortar	Air	28 hari	Kekuatan tekan dan kekuatan lentur Komp. (+31) Felx. (+16)	Fakultas Teknik Sipil, Universitas Teknologi Sahand, Tabriz, Iran.
(Solarte et al. 2024)	Bacillus subtilis	Beton	Air	28 hari	Kekuatan Tekan (+25,83%)	Universidad Santo Tom´as, Columbia

Tabel 3. menunjukkan adanya variasi pada jenis bakteri yang digunakan sebagai agen *self-healing.* Jenis bakteri yang paling banyak digunakan adalah Bacillus sp. Benda uji yang digunakan juga bervariasi yaitu mortar dan beton. Untuk media perawatan benda uji, sebagian besar menggunakan air dan ada juga yang menggunakan larutan kalsium latat serta urea sebagai media hidup bakteri. Benda uji direndam dalam media perawatan rata-rata selama 28 hari. Hasil dari pengujian-pengujian yang dilakukan memperlihatkan hasil berupa peningkatan kuat tekan beton dibanding dengan beton kontrol. Walaupun nilai peningkatan bervariasi namun semua benda uji yang diberi perlakukan penambahan agen *self-healing* menunjukkan adanya peningkatan.

Penelitian-penelitian yang dilakukan ini tersebar di beberapa negara baik di benua Amerika, Eropa maupun Asia. Dari hasil penelitian yang ada pada Tabel 3. terlihat bahwa semua negara tempat penelitian berada di atas 23,5^{o} LU seperti negara India, Pakistan, Iran, Tiongkok, Belgia dan Kanada. Kondisi ini menimbulkan celah penelitian tersendiri bagi negara di daerah tropis seperti Indonesia terutama di Propinsi Nusa Tenggara Timur yaitu daerah semi arid dengan nilai evapotranspirasi potensial 2.600 mm per tahun (Messakh et al. 2015). Penguapan yang tinggi di daerah semi arid dapat menurunkan kualitas beton jika tidak dirawat dengan baik pada masa perawatan beton selama 28 hari.

Seluruh penelitian yang dianalisis juga memberikan gambaran pengujian pada benda uji kubus dan silinder. Belum ada pengujian pada simulasi kondisi beton pada struktur eksisting. Pada kondisi ini terdapat celah penelitian yang dapat dilakukan yaitu menguji perilaku bakteri jika berinteraksi langsung dengan kondisi perawatan beton pada struktur eksisting.

4. KESIMPULAN

Metode SLR menunjukkan hasil bahwa analisis pada penelitian-penelitian sebelumnya yang dipakai untuk menelaah 13 artikel penelitian yang diterbitkan selama 10 tahun terakhir dari tahun 2015-2024 memberikan hasil bahwa penggunaan bakteri tertentu sebagai agen *self-healing* dapat meningkatkan kuat tekan beton. Media yang digunakan untuk perawatan beton juga bervariasi yaitu air, larutan urea maupun larutan Na2SO4. Celah penelitian yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutknya adalah metode perawatan beton baik menggunakan bakteri dalam bentuk benda uji maupun perawatan kondisi eksisting, pengujian interaksi bakteri dengan serat sebagai bahan tambah dari material lokal seperti serat lontar dan pengujian penggunaan variasi bakteri pada kondisi penguapan tinggi di daerah semi arid.

DAFTAR PUSTAKA

Bhaskar, Sini, Khandaker M. Anwar Hossain, Mohamed Lachemi, Gideon Wolfaardt, and Marthinus Otini Kroukamp. 2017. “Effect of Self-Healing on Strength and Durability of Zeolite-Immobilized Bacterial Cementitious Mortar Composites.” *Cement and Concrete Composites* 82:23–33. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.013.

Helal, Zinab, Hani Salim, Seleem S.E. Ahmad, Hesham Elemam, Ahmed I.H. Mohamed, and Mohamed A.R. Elmahdy. 2024. “Sustainable Bacteria-Based Self-Healing Steel Fiber Reinforced Concrete.” *Case Studies in Construction Materials* 20 (July):e03389. https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2024.E03389.

Jena, Shradha, Bidyadhar Basa, Kishor Chandra Panda, and Naresh Kumar Sahoo. 2020. “Impact of Bacillus Subtilis Bacterium on the Properties of Concrete.” *Materials Today: Proceedings* 32:651–56. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.129.

Justo-Reinoso, Ismael, Bianca J. Reeksting, Charlotte Hamley-Bennett, Andrew Heath, Susanne Gebhard, and Kevin Paine. 2022. “Air-Entraining Admixtures as a Protection Method for Bacterial Spores in Self-Healing Cementitious Composites: Healing Evaluation of Early and Later-Age Cracks.” *Construction and Building Materials* 327 (February): 126877. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126877.

Messakh, Jakobis Johanis, Arwin Sabar, Iwan Kridasantausa Hadihardaja, and Alex Abdi Chalik. 2015. “A Study on Fulfillment of Drinking Water Need of People in Semi-Arid Areas in Indonesia.” *Jurnal Manusia Dan Lingkungan* 22 (3): 271.

Mirshahmohammad, Mohammad, Hamid Rahmani, Mahdi Maleki-Kakelar, and Abbas Bahari. 2022. “Effect of Sustained Service Loads on the Self-Healing and Corrosion of Bacterial Concretes.” *Construction and Building Materials* 322 (October 2021): 126423. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126423.

Qureshi, Tanvir, and Abir Al-Tabbaa. 2020. “Self-Healing Concrete and Cementitious Materials.” In *Advanced Functional Materials*, edited by Nevin Tasaltin, Paul Sunday Nnamchi, and Safaa Saud. Rijeka: IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.92349.

Rauf, Momina, Wasim Khaliq, Rao Arsalan Khushnood, and Iftikhar Ahmed. 2020. “Comparative Performance

of Different Bacteria Immobilized in Natural Fibers for Self-Healing in Concrete." *Construction and Building Materials* 258:119578. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119578.

Siddique, Rafat, Vasu Nanda, Kunal, El Hadj Kadri, M. Iqbal Khan, Malkit Singh, and Anita Rajor. 2016. "Influence of Bacteria on Compressive Strength and Permeation Properties of Concrete Made with Cement Baghouse Filter Dust." *Construction and Building Materials* 106:461–69. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.112.

Snyder, Hannah. 2019. "Literature Review as a Research Methodology: An Overview and Guidelines." *Journal of Business Research* 104 (July): 333–39. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039.

Solarte, Alexander, Bregy Choque, Cristian Perez Yagama, and Samuel Urias Amaya. 2024. "Structural Performance of Self-Healing Concrete by Bacillus Bacteria with Addition of Rice Husk Ash." *Structures* 61 (March):106111. https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2024.106111.

Suleiman, A. R., and M. L. Nehdi. 2021. "Effect of Autogenous Crack Self-Healing on Mechanical Strength Recovery of Cement Mortar under Various Environmental Exposure." *Scientific Reports* 11 (1): 1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-021-86596-2.

Tan, Linzhen, Jing Xu, Yongqi Wei, and Wu Yao. 2022. "The Effect of Bacteria Bacillus Cohnii on the Synthesised Calcium Silicate Hydrate (C–S–H) with Various Calcium to Silica Ratio in Nanoscale." *Cement and Concrete Composites* 134 (November 2021): 104779. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104779.

Tayebani, Bahareh, and Davood Mostofinejad. 2019. "Self-Healing Bacterial Mortar with Improved Chloride Permeability and Electrical Resistance." *Construction and Building Materials* 208:75–86. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.172.

Tie, Yuanyuan, Yongcheng Ji, Hongzhao Zhang, Bingyan Jing, Xinya Zeng, and Peili Yang. 2024. "Investigation on the Mechanical Properties of Bacillus Subtilis Self-Healing Concrete." *Heliyon* 10 (14): e34131. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E34131.

Tziviloglou, E., V. Wiktor, H. M. Jonkers, and E. Schlangen. 2016. "Bacteria-Based Self-Healing Concrete to Increase Liquid Tightness of Cracks." *Construction and Building Materials* 122:118–25. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.080.

Wang. 2012. "Diatomaceous Earth as a Protective Vehicle for Bacteria Applied for Self-Healing Concrete." *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 39 (4): 567–77. https://doi.org/10.1007/s10295-011-1037-1.

Zaerkabeh, Reza, Alireza Mohammadjafari Sadeghi, Hasan Afshin, and Raheleh Majdani. 2022. "Crack Healing and Mechanical Properties of Bacteria-Based Self-Healing Cement Mortar." *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 66 (2): 581–92. https://doi.org/10.3311/PPci.18803.

Zheng, Tianwen, Chunxiang Qian, and Yilin Su. 2021. "Influences of Different Calcium Sources on the Early Age Cracks of Self-Healing Cementitious Mortar." *Biochemical Engineering Journal* 166 (November 2020): 107849. https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107849.

Pemanfaatan Bahan PET Terhadap Daya Serap Air Pada Beton Pracetak Tipe U-Ditch

Siti Abadiyah[1], Sarizwandi Bin Sahrul[2]

*[1,2] * Universitas Muhammadiyah Tangerang Fakultas Teknik Program Studi Teknik Sipil*
***e-mail**:* abadi_dede01@yahoo.com [1]
sarizwandi05@gmail.com [2]

ABSTRAK

Sampah merupakan salah satu pencemaran yang sangat umum ditemui pada saat ini. Hal ini disebabkan konsumsi plastik yang setiap tahunnya terus meningkat, salah satu jenis sampah plastik yang menghasilkan limbah yang terus meningkat setiap tahunnya adalah sampah plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET). Beton yang baik adalah beton yang memiliki daya serap air yang baik dan terkontrol. Hal ini membuat limbah botol plastik jenis PET bisa dijadikan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton pracetak seperti beton tipe *U-Ditch*. Pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan metode eksperimen di laboratorium dan studi pustaka serta literatur terdahulu. Penelitian pencampuran bahan ini dilakukan dengan variasi perbandingan dengan persentase 0%, 2,5%, 5%, dan 7,5% terhadap berat total adukan semen kemudian pengujian beton akan dilakukan pada umur 7, 14 dan 28 hari. Tujuan dari peniltian ini untuk mengetahui dampak dari pemanfaatan bahan PET terhadap kuat tekan dan daya serap (porositas dan absorbsi) pada beton pracetak tipe *U-Ditch*. Hasil kuat tekan beton dengan tipe penambahan 0% limbah PET mendapatkan nilai kuat tekan sebesar K 153,69 Kg/cm² (76,85%) kemudian beton dengan tipe 5% dengan nilai kuat tekan K 93,88 Kg/cm² (46,94%) disusul dengan tipe penambahan 2,5% dan 7,5% dengan kuat tekan sebesar K 68,85 Kg/cm² (34,42%) dan K 64,68 Kg/cm² (32,34%). Kemudian, beton dengan tipe penambahan 0% limbah PET mendapatkan nilai porositas paling rendah dengan nilai sebesar 15,550% disusul beton dengan tipe penambahan 5% dengan nilai sebesar 15,882% kemudian beton dengan tipe penambahan 7,5% dan 2,5% dengan nilai porositas sebesar 16,495% dan 17,160%. Selanjutnya, beton dengan tipe penambahan 0% limbah PET mendapatkan nilai absorbsi paling rendah dengan nilai sebesar 2,7% disusul beton dengan tipe penambahan 5% dengan nilai sebesar 3,7% kemudian beton dengan tipe penambahan 2,5% dan 7,5% dengan nilai absorbsi sebesar 4,1% dan 4,4%. Hal ini menyimpulkan, penambahan limbah PET sesuai persentase yang sudah direncanakan memiliki nilai signifikan terhadap kekuatan beton yang menurun dan daya serap air yang meningkat pada beton pracetak tipe *U-Ditch*.

Kata kunci: PET, *U-Ditch*, Kuat Tekan, Porositas, Absorbsi

.

1. PENDAHULUAN

Sampah merupakan salah satu pencemaran yang sangat umum ditemui pada saat ini, namun memiliki dampak yang sangat merugikan dan mengganggu terhadap keseimbangan ekosistem. Hal ini tidak lepas dari seiring meningkatnya aktivitas produksi bahan pangan untuk memenuhi kebutuhan pangan masyarakat yang terus meningkat setiap tahunnya. Dya, Sahara dan Ayusari (2021) menyatakan sampah merupakan permasalahan yang sangat kompleks dan tak kunjung usai di Indonesia baik di pedesaan maupun di perkotaan, peningkatan jumlah penduduk mengakibatkan produktivitas sampah juga semakin meningkat. Sehingga perbandingan jumlah sampah yang dihasilkan dengan sampah yang diolah menjadi tidak seimbang, permasalahan ini menjadikan keresahan bagi masyarakat Indonesia. Beton pracetak U-Ditch adalah produk saluran air atau drainase berupa beton yang diproduksi berbentuk huruf U dilengkapi dengan wiremesh atau tulangan yang dicor menggunakan beton mutu tinggi maupun mutu rendah. Erwin Syaiful dan Muhammad Tharik (2020) menyatakan U-Ditch beton bertulang merupakan salah satu inovasi dari beton pracetak yang diperuntukkan sebagai saluran, baik untuk saluran drainase maupun saluran irigasi. Oleh karena itu, diperlukannya beton pracetak U-Ditch yang memiliki daya serap air yang terkontrol sehingga dapat menjadi wadah dan bisa mengaliri air dengan baik.

2. LATAR BELAKANG

Konsumsi plastik setiap tahunnya terus meningkat, hal ini berdampak terhadap limbah sampah plastik yang dihasilkan juga ikut meningkat. Menurut situs Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional yang dinaungi oleh Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan pada tahun 2024, jenis sampah terbanyak merupakan jenis sampah sisa makanan yang sebesar 41% dan sampah plastik sebesar 18,9% merupakan jenis sampah kedua terbanyak. Salah satu jenis sampah plastik yang menghasilkan limbah yang terus meningkat setiap tahunnya adalah sampah plastik Polyethylene Terephthalate (PET).

Polyethylene Terephthalate (PET) sering juga disebut sebagai polyester, terbuat dari asam tereftalat yang dimurnikan (PTA) serta mono-etilen glikol (MEG) yang berasal dari minyak mentah dan gas alam. Pada umumnya, jenis plastik ini sering digunakan dalam pembuatan botol soft-drink, botol air sekali pakai, tempat kosmetik dan sebagainya. Kelebihan dari jenis plastik ini adalah tidak pecah atau patah kemudian mudah didaur ulang serta transparan terhadap

radiasi gelombang mikro. Nurfitri, Yusrianti dan Amrullah (2020) menyatakan bahwa plastik PET termasuk salah satu jenis sampah plastik terbesar. Beton yang berpori merupakan salah satu material konstruksi, karena terdapat pori pada beton sehingga dapat dimanfaatkan untuk meminimalisir daya serap air pada permukaan beton. Sehingga limbah botol plastik jenis PET dapat dijadikan sebagai bahan campuran dalam pembuatan beton pracetak seperti beton Tipe U-Ditch. Berdasarkan informasi yang telah diperoleh diatas, maka dilakukan penelitian ini yang bertujuan untuk memanfaatkan sampah plastik khususnya jenis sampah PET (Polyethylene Terephthalate) menjadi bahan campuran dalam beton pracetak U-Ditch. Adapun tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh pemanfaatan bahan PET (Polyethylene Terephthalate) terhadap daya serap air pada beton pracetak U-Ditch.
Tujuan yang akan dicapai didasari dari bagaimana dampak pemanfaatan bahan PET (Polyethylene Terephthalate) terhadap kuat tekan dan daya serap air berdasarkan nilai absorbs dan porositas pada beton pracetak tipe U-Ditch

3. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan studi pustaka serta literatur terdahulu. Tahap awal dari penelitian ini adalah dengan memahami sifat material dan bahan dalam membentuk beton, selain itu juga dengan cara studi pustaka untuk mendapatkan penjelasan tentang karakteristik bahan pembuatan beton seperti pengujian berat isi agregat, berat jenis agregat, analisa saringan, kadar lumpur agregat, dan kadar air. Metode penelitian ini akan menghasilkan data dalam bentuk angka sehingga metode ini juga disebut sebagai metode kuantitatif. Parameter benda uji yang dicari dalam penelitian ini adalah kuat tekan, kuat tarik dan porositas beton pracetak terhadap penambahan sampah plastik. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan observasi benda uji. Observasi dilakukan pada benda uji dengan mencatat hasil pengujian pada sampel yang di buat. Adapun benda uji yang dibuat berbentuk silinder dengan dimensi 15cm x 30cm.
Pencampuran bahan pada penelitian ini pada mutu beton rencana K200 atau sama dengan fc' 16 Mpa. Mutu rencana dibuat lebih rendah dari mutu standar pada U-Ditch yaitu K350. Karna dalam penelitian ini plastik digunakan sebagai bahan tambah, bukan pensubsitusi bahan. Penambahan limbah PET (*Polyethylene Terephthalate*) dilakukan dengan variasi perbandingan persentase sampah PET 0%, 2,5%, 5%, 7,5% terhadap berat agregat halus pada beton. PET yang digunakan merupakan, sampah mika kue yang telah dicacah menjadi ukuran kecil atau setara dengan agregat halus. Benda uji yang telah di cetak akan diberikan pengujian pada umur 7, 14 dan 28 hari. Parameter benda uji yang dicari dalam penelitian ini berdasarkan pada kuat tekan, absorbsi dan porositas beton pracetak dengan penambahan sampah plastik PET.
Pengujian Kuat Tekan beton dilakukan di Laboratorium PT. Bumi Prima Abadi. Menggunakan standar ASTM C 165-95, C 143-74, C 13-75 tentang Standard Test Method for Measuring Compresive Properties of Termal Insulation. Sebanyak 12 benda uji. Pengujian Porositas beton dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Tangerang. Uji porositas dilakukan berdasarkan ASTM C 645-90 dan SNI 03-6433-2000 dengan cara, perbandingan antara berat air dan udara yang berada dalam sampel dengan berat sampel padat. Sebanyak 12 benda uji. Pengujian Absorbsi beton dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Indonesia. Uji absorbsi dilakukan dengan menggunakan standar BS 1881-122:1983 dan SNI 03-6433-2000. Pengujian dilakukan dengan menghitung berat kering dan berat SSD sampel. Pengujian ini dilakukan setelah umur sampel mencapai 28 hari dan sebanyak 4 benda uji.

3. HASIL DAN GAMBAR

Pada benda uji *mix design* yang digunakan tertera pada tabel berikut:

Tabel 1 Mix Design Benda Uji

Komponen	Komposisi			
Ukuran Mixer	0,085	0,085	0,085	0,085
SPLIT	87,55 KG	87,55 KG	87,55 KG	87,55 KG
PASIR	72,25 KG	72,25 KG	72,25 KG	72,25 KG
SEMEN OPC	22,1 KG	22,1 KG	22,1 KG	22,1 KG
AIR	13,6 L	13,6 L	13,6 L	13,6 L
OBAT TYPE D	68 ML	68 ML	68 ML	68 ML
PET	14,66 Kg (7,5%)	9,78 Kg (5%)	4,89 Kg (2,5%)	0 Kg

Sumber: dok peneliti berdasarkan mutu yang akan dicapai

Untuk jumlah sampel beserta dimensi sampel yang digunakan seperti yang tertera pada tabel di bawah ini:

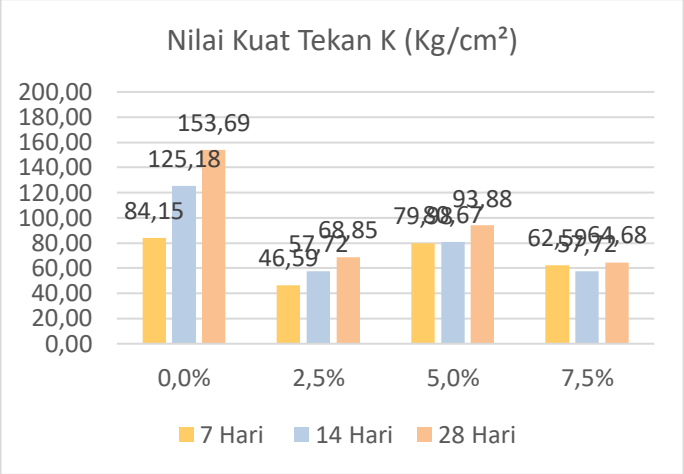
1. **Pengujian Tekan**:
   Berikut ini merupakan hasil pembahasan terkait pengujian kuat tekan beton dengan persentase penambahan

PET sebesar 0%, 2,5%, 5% dan 7,5% pada umur 7,14 dan 28 Hari.

Tabel 2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Sampel	Nilai Kuat Tekan berdasarkan K (Kg/cm²)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
0%	84,15	125,18	153,69
2,5%	46,59	57,72	68,85
5%	79,98	80,67	93,88
7,5%	62,59	57,72	64,68

Sumber: dok.peneliti 2024



Gambar 1 Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan Tabel 4.8 dan Gambar 4.1, Nilai kuat tekan tertinggi terjadi pada beton tipe penambahan 5% limbah PET pada pengujian hari ke 28 dengan nilai sebesar K 93,88 Kg/cm² (46,94%) lebih rendah 59,81 Kg/cm² (29,91%) dari nilai kuat tekan tertinggi beton dengan tanpa penambahan limbah PET.

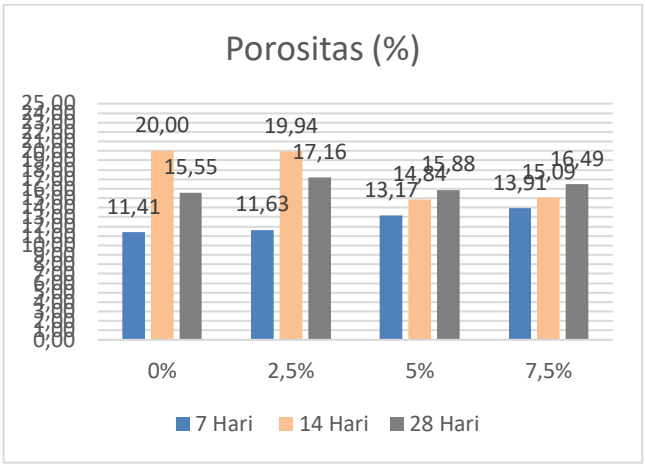
2. **Pengujian Porositas**

Berikut ini merupakan hasil pembahasan terkait pengujian porositas dengan persentase penambahan PET sebesar 0%, 2,5%, 5% dan 7,5% pada umur 7,14 dan 28 Hari.

Tabel 3 Hasil Pengujian Porositas

Sampel	Nilai Porositas (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
0%	11,41	20,00	15,55
2,5%	11,63	19,94	17,16
5%	13,17	14,84	15,88
7,5%	13,91	15,09	16,49

Sumber: dok.peneliti 2024



Gambar 2 Grafik Hasil Pengujian Porositas

Berdasarkan Tabel 4.9 dan Gambar 4.2, beton dengan tipe penambahan 2,5% limbah PET cenderung memiliki nilai porositas yang hampir sama namun lebih tinggi dari tipe beton dengan tanpa penambahan limbah PET. Pada umur pengujian ke 14 hari, beton dengan penambahan 5% limbah PET memiliki nilai porositas paling rendah yaitu sebesar 14,84% lebih rendah 5,16% dari nilai porositas beton dengan tipe tanpa penambahan limbah PET di umur yang sama. Namun pada umur pengujian ke 28 hari, beton dengan penambahan 5% limbah PET memiliki nilai porositas sebesar 15,88% lebih rendah dari tipe penambahan 2,5% dan 7,5 namun lebih tinggi 0,33% dari tipe tanpa penambahan limbah PET di umur yang sama.

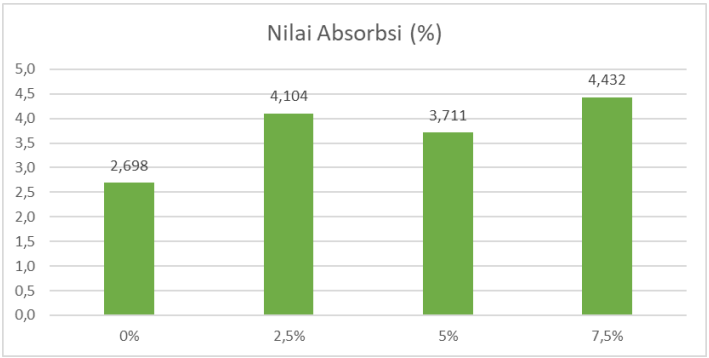
3. **Pengujian Absorbsi**

Berikut ini merupakan hasil pembahasan terkait pengujian absorbsi dengan persentase penambahan PET sebesar 0%, 2,5%, 5% dan 7,5%. Pengujian dilakukan pada beton yang telah memiliki kuat desak maksimal yaitu di umur 28 Hari.

Tabel 4 Hasil Pengujian Absorbsi

Sampel	Nilai Absorbsi (%)
0%	2,698
2,5%	4,104
5%	3,711
7,5%	4,432

Sumber: dok.peneliti 2024



Sumber: dok.peneliti 2024

Berdasarkan Gambar 4.3, nilai absorbsi beton dengan tipe penambahan 5% limbah PET cenderung lebih rendah dibanding dengan beton tipe penambahan limbah PET yang lain pada semua umur pengujian. Nilai absorbsi terendah terjadi pada beton tipe penambahan 5% limbah PET dengan nilai 3,71% lebih tinggi 1,01% dari nilai absorbsi beton dengan tipe tanpa penambahan limbah PET., sedangkan nilai tertinggi didapatkan pada beton tipe penambahan 7,5% limbah PET dengan nilai 4,43% lebih tinggi 1,734% dari nilai absorbsi beton dengan tanpa penambahan limbah PET.

4. PEMBAHASAN

Sifat Fisis beton dengan penambahan palstik PET tidak memberikan dapak yang sigifikan, pada nilai kuat tekan, absorbsi, maupun porositas. Pada kuat tekan beton, sampel dengan penambahan 5% PET memiliki nilai kuat tekan tertinggi pada pengujian hari ke 28 dengan nilai K 93,88 Kg/cm² (46,94%) dibandingkan nilai sampel dengan penambahan PET 2,5% dan 7,5%. Pada nilai porositas sampel penambahan 2,5% limbah PET cenderung memiliki nilai porositas yang hampir sama namun lebih tinggi dari tipe beton dengan tanpa penambahan limbah PET. Pada umur pengujian ke 14 hari, beton dengan penambahan 5% limbah PET memiliki nilai porositas paling rendah yaitu sebesar 14,84%. Pada umur pengujian ke 28 hari, beton dengan penambahan 5% limbah PET memiliki nilai porositas sebesar 15,88%. Nilai Absorbsi beton, Nilai absorbsi terendah didapat pada sampel dengan penambahan 5% limbah PET dengan nilai 3,71%. Untuk nilai tertinggi didapatkan pada sampel dengan penambahan 7,5% limbah PET dengan nilai 4,43%.

5. KESIMPULAN

Penambahan limbah PET sesuai persentase yang sudah direncanakan berpengaruh terhadap sifat fisis beton pra cetak U-ditch. Memiliki kuat tekan yang menurun dari kuat tekan yang di rencanakan, serta memiliki daya serap air yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

A. A. Gede S., 2011, Porositas, Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton Dengan Agregat Kasar Batu Pecah Pasca Dibakar, Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, Vol. 15 No. 1, Januari 2011.

Agus M., 2009, Penurunan Nilai Absorbsi dan Abrasi Beton Dengan Penambahan *Calcium Stearate* Dan *Fly Ash*, Media Teknik Sipil, Volume IX, Januari 2009.

Badan Standarisasi Nasional. 2000. Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. SNI 03-2834-2000. Jakarta.

Badan Standarisasi Nasional. 2000. Metode Pengujian Kerapatan, Penyerapan Dan Rongga Dalam Beton Yang Telah Mengeras. SNI 03-6433-2000. Jakarta.

D. A. Rahma N. R., Sahara, & Ayusari W., 2021, Pengaruh Penambahan Limbah Plastik Jenis *Polyethylene Terephthalate, Low Density Polyethylene* Dan *Polypropylene* Terhadap Nilai Kuat Tekan Dan Daya Serap Air *Paving Block*, Jurnal Fisika Dan Terapannya, Vol. X, 2021

M. Yanuar A. P., 2011, Porositas Dan Permeabilitas Beton Menggunakan Pasir Tailing Tambang Dan Pasir Besi, *Skripsi*, Jurusan Teknik Sipil UNS, Surakarta.

Roza M., Hartati D., & Fajri S., 2022, Pengaruh Penambahan Limbah Plastik Sebagai Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan dan Daya Serap Air Pada *Paving Block*, Jurnal Teknik Sipil Unaya, Vol. 8 No. 1, Januari 2022, 86-97.

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG REHABILITASI BALOK JEMBATAN DENGAN *SPALLING* MENGGUNAKAN SIKA GROUTING DAN GFRP

Achmad Zultan Mansur[1*], Daud Nawir[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Borneo Tarakan, Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan*
e-mail: achmadzultan@gmail.com
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Borneo Tarakan, Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan
e-mail: daudnawir@gmail.com

ABSTRAK

Spalling yang disebabkan oleh paparan klorida yang tinggi pada girder jembatan menimbulkan ancaman signifikan terhadap integritas struktural dan keselamatan pengguna. Penelitian ini berfokus pada evaluasi efektivitas perbaikan lokal menggunakan Sika Grouting yang dikombinasikan dengan perkuatan menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) pada balok beton bertulang yang mengalami *spalling*. Dua belas balok, termasuk balok kontrol dan variasi balok dengan perbaikan grouting (BGR), perkuatan GFRP (BGRS), serta kombinasi keduanya dengan U-Wrap pada tumpuan (BGRST), diuji untuk menganalisis pengaruh intervensi tersebut terhadap kapasitas beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perbaikan grouting saja (BGR) menghasilkan penurunan kapasitas beban hingga 51,58% dibandingkan dengan balok kontrol, mengindikasikan bahwa perbaikan lokal saja tidak cukup untuk mengembalikan kinerja struktural sepenuhnya. Namun, kombinasi grouting dan perkuatan GFRP (BGRS) terbukti efektif dalam mempertahankan masa layan beban, meskipun belum mencapai kapasitas beban balok kontrol. Sementara itu, perkuatan komprehensif dengan grouting, GFRP, dan U-Wrap (BGRST) menunjukkan peningkatan kapasitas beban sebesar 8,1% dibandingkan balok kontrol, menandakan potensi metode ini dalam meningkatkan kinerja struktural balok yang rusak. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi perbaikan lokal dengan Sika Grouting dan perkuatan menggunakan GFRP, terutama dengan penambahan U-Wrap pada tumpuan, menawarkan solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan. Pendekatan ini sangat relevan dalam konteks keterbatasan anggaran dan kebutuhan perbaikan yang mendesak, memberikan alternatif yang layak untuk menjaga integritas dan keamanan infrastruktur jembatan.

Kata kunci: Balok RC, *Spalling*, Grouting, GFRP

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan infrastruktur vital yang menghubungkan berbagai wilayah dan menunjang mobilitas masyarakat. Keberadaannya yang seringkali terpapar kondisi lingkungan ekstrem, seperti daerah pesisir dengan tingkat klorida tinggi, menjadikannya rentan terhadap kerusakan. Salah satu kerusakan yang umum terjadi adalah korosi pada tulangan baja di dalam balok beton bertulang, yang dapat menyebabkan *spalling* (pengelupasan) pada girder jembatan. Fenomena ini mengancam integritas struktural jembatan dan membahayakan keselamatan pengguna. *Spalling* pada girder jembatan terjadi akibat korosi pada tulangan baja yang disebabkan oleh penetrasi ion klorida ke dalam beton. Klorida bereaksi dengan baja, membentuk oksida besi yang volumenya lebih besar daripada baja asli (Wang et al., 2014). Peningkatan volume ini menyebabkan tekanan internal pada beton, yang akhirnya menyebabkan retak dan pengelupasan. Jika tidak ditangani, *spalling* dapat meluas dan mengurangi kapasitas beban girder, bahkan dapat menyebabkan keruntuhan jembatan (Mansur, Djamaluddin, Parung, Irmawaty, et al., 2024). Mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan memerlukan tindakan perbaikan dan perkuatan yang tepat. Namun, keterbatasan anggaran dan urgensi perbaikan seringkali menjadi kendala. Oleh karena itu, diperlukan solusi yang mudah diterapkan, hemat biaya, dan tidak bergantung pada kucuran dana pemerintah. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah melakukan perbaikan lokal pada daerah yang mengalami *spalling*, diikuti dengan perkuatan menggunakan material komposit.

Perbaikan lokal pada daerah *spalling* bertujuan untuk mengembalikan dimensi awal girder dan menghilangkan beton yang rusak. Salah satu metode yang telah terbukti efektif adalah penggunaan Sika Grouting, yaitu jenis mortar khusus yang dapat mengisi rongga dan retakan pada beton (Peng, Hu, Niu, Zhong, et al., 2023). Sika Grouting memiliki daya rekat tinggi terhadap beton lama dan mampu mengembalikan kekuatan struktur pada daerah yang diperbaiki (Peng, Hu, Niu, Zhang, et al., 2023). Setelah perbaikan lokal, perkuatan girder dilakukan untuk meningkatkan kapasitas beban dan mencegah kerusakan lebih lanjut. Salah satu material komposit yang populer digunakan untuk perkuatan struktur beton adalah Fiber Reinforced Polymer (FRP) (Abdallah et al., 2023). FRP terdiri dari serat-serat yang kuat dan ringan yang tertanam dalam matriks polimer. Material ini memiliki kekuatan tarik tinggi, tahan korosi, dan mudah diaplikasikan. Penelitian ini berfokus pada penggunaan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) sebagai material perkuatan pada girder jembatan yang mengalami *spalling*. GFRP dipilih karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan jenis FRP lainnya, seperti biaya yang lebih terjangkau, bobot yang lebih ringan, dan sifat isolasi listrik yang baik. Selain itu, GFRP juga memiliki kompatibilitas yang baik dengan beton dan dapat diaplikasikan dengan mudah menggunakan teknik laminasi basah (*wet lay-up*).

Meskipun penggunaan FRP untuk perkuatan struktur beton telah banyak diteliti, namun penelitian mengenai aplikasi GFRP pada girder jembatan yang mengalami *spalling* masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi pada pengembangan pengetahuan di bidang ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi para praktisi dan akademisi dalam mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan dengan menggunakan metode yang mudah, efektif, berkelanjutan. Penelitian ini juga berupaya untuk meningkatkan pemahaman masyarakat mengenai penggunaan GFRP sebagai alternatif perkuatan struktur beton yang berkelanjutan. Dengan meningkatnya kesadaran akan manfaat GFRP, diharapkan material ini dapat lebih luas diaplikasikan dalam perbaikan dan perkuatan infrastruktur, sehingga dapat memperpanjang umur layanan struktur dan mengurangi dampak lingkungan.

2. SPECIMEN DAN SET-UP PENGUJIAN

2.1 Balok beton bertulang

Sebanyak dua belas balok beton bertulang (RC) telah diproduksi dengan dimensi penampang (150×250) mm dan panjang keseluruhan 3300 mm, dengan jarak efektif 3000 mm. Terdapat dua variasi balok RC yang diproduksi, yaitu balok kontrol dan balok RC yang mengalami perbaikan dan penguatan **(Tabel 1).** Untuk balok RC yang berfungsi sebagai balok kontrol, tulangan baja 3D13 dan 2ϕ8 digunakan pada sisi tarik dan sisi tekan secara berturut-turut. Hal ini dilakukan untuk memastikan kekuatan dan daya tahan balok dalam menghadapi beban yang bekerja pada sisi tarik dan sisi tekan. Untuk mencegah kegagalan akibat geseran selama pengujian, balok yang diuji dilengkapi dengan tulangan melintang (pengaduk) ϕ8 yang ditempatkan pada jarak 80 mm di setiap zona geser (dari penyangga hingga beban yang terpusat). Tulangan melintang di zona lentur (antara dua beban yang terpusat) ditempatkan pada jarak 200 mm. Tujuan dari penggunaan tulangan melintang adalah untuk meningkatkan kekuatan dan keandalan balok terhadap gaya geser yang terjadi selama pengujian. Sembilan balok variasi menggunakan tulangan baja 3ϕ8 dan 2ϕ8 untuk sisi tarik dan sisi tekan. Perubahan penggunaan tulangan pada balok RC variasi diasumsikan sebagai perubahan pada ujung balok RC yang membutuhkan perlakuan segera dan tepat. Hal ini menunjukkan bahwa ekstremitas balok RC memiliki pengaruh signifikan terhadap kebutuhan perbaikan dan penguatan.

2.2 Beton dan Baja

Beton yang digunakan pada semua balok RC adalah beton yang bersumber dari perusahaan ready mix dan dilakukan pengambilan slump tes untuk benda uji silender dan kubus beton pada saat di tempat produksi dan tiba di area laboratorium. Kuat tekan selama 28 hari didapatkan nilai rata-rata sebesar 21 MPa, kapasitas regangan didapatkan sebesar 0.0026 dan modul elastisitas didapatkan sebesar 28360 MPa. Sebagai hasil dari pengujian standar yang dilakukan, kuat leleh tulangan baja dengan Ø 8 telah dihitung sebesar 375 dan kuat tarik sebesar 496 MPa; kuat leleh tulangan baja dengan Ø 13 telah dihitung sebesar 420 dan kuat tarik sebesar 520 MPa. Modulus elastisitas (Es) tulangan sebesar 200 GPa.

Tabel 1. Detail benda uji

Tipe	Kode balok	Item	Tindakan	Material	Perlakuan pada Balok RC
1.	BK	3	Kontrol	-	Tidak
2.	BGR	3	Grouting	Sikagrout-215.	Tambalan 5 cm
3.	BGRS	3	Grouting dan Lembar GFRP	Sikagrout-215., GFRP	Tambalan 5 cm, lapis lembar GFRP pada sisi bawah
4.	BGRST	3	Grouting, Lembar GFRP dan U-Wrap	Sikagrout-215., GFRP	Tambalan 5 cm, lapis lembar GFRP pada sisi bawah dan U-Wrap pada area tumpuan

2.3 Semen grouting

Sikagrout-215 adalah semen grouting siap pakai yang mempunyai karakteristik tidak menyusut, digunakan untuk mengisi celah atau ruang antara elemen struktural beton, seperti kolom, balok, dan dinding penahan, dengan elemen struktural lainnya, seperti baja, besi, atau beton pratekan. Sikagrout-215 memiliki sifat anti segar (*non-shrink*) yang memungkinkan penggunaannya dalam kondisi yang membutuhkan ketahanan terhadap deformasi, serta formulasi khusus yang dapat memperpanjang masa layan dan mengurangi risiko retak akibat pengkerutan. Selain itu, Sikagrout-215 juga dapat diaplikasikan secara mudah dan cepat dengan campuran yang hanya membutuhkan tambahan air saja. Sifat-sifat mekanik mortar ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat-sifat mekanis dari Sikagrout-215

Uji sampel (hari)	Kuat tekan (MPa)	Kuat lentur (MPa)
7	28	4
28	34	10.6

2.4 *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)

GFRP, komposit serat kaca rajutan searah, dipilih sebagai bahan penguat eksternal karena ketahanannya terhadap cuaca dan air asin. Aplikasi GFRP pada permukaan beton bertulang (RC) menuntut pembersihan menyeluruh dan penggunaan roller khusus untuk menjamin adhesi optimal serta mencegah pembentukan gelembung udara. Lembaran GFRP yang digunakan, produksi Fyfe Co. LLC, memiliki spesifikasi: tegangan tarik ultimate 575 MPa, modulus tarik 26,1 GPa, regangan 2,20%, dan tebal 1,3 mm. Perekat epoksi dua komponen, juga dari Fyfe Co. LLC, digunakan pada seluruh balok RC yang terbuat dari beton ready mix.

2.5 Prosedur pembuatan benda uji

Benda uji balok RC yang dibuat di laboratorium merupakan benda uji yang diasumsikan mengalami *spalling* pada bagian bawah balok RC sehingga penulangan juga dianggap mengalami reduksi. Benda uji balok RC variasi merupakan hasil reduksi tulangan dari balok RC control sebesar 38,5% yaitu perubahan penggunaan tulangan besi diameter 13 menjadi tulangan diameter 8.



(a) (b) (c) (d)

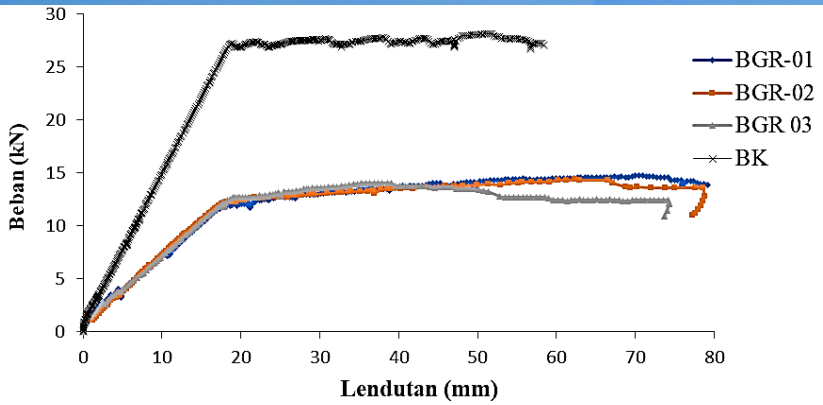
Gambar 3 (a) Tulangan besi D 13 dan ϕ8 (b) Mortar Sikagrout-215. dan Sika bonding adhesive (c) lembar GFRP Woven (d) epoxy resin FRP komponen A dan B

Prosedur terakhir pekerjaan pembuatan benda uji yaitu melakukan perkuatan pada balok RC menggunakan GFRP komposit. a) Meratakan permukaan balok yang akan diperkuat dengan lapisan GFRP dan Uwrap serta membersihkannya dari segala kotoran yang mungkin mengurangi lekatan beton; b) Mempersiapkan campuran bahan perekat epoxy resin komponen A dan komponen B dengan perbandingan berat 2:1. Proses pengadukan tidak boleh berlebihan hingga menghasilkan busa dan gelembung yang bisa terperangkap sebagai rongga udara dalam perekat; c) Menempelkan bahan perkuatan yang telah dipotong dan diberi perekat dengan arah longitudinal balok dan ditekan perlahan terhadap perekat yang masih basah. Rongga udara yang terjebak antara lapisan perkuatan dengan permukaan beton akan dilepas dengan tekanan roller searah serat perkuatan agar perekat menyatu dengan serat dan permukaan betonBenda uji balok RC yang dibuat di laboratorium merupakan benda uji yang diasumsikan mengalami *spalling* pada bagian bawah balok RC sehingga penulangan juga dianggap mengalami reduksi. Benda uji balok RC variasi merupakan hasil reduksi tulangan dari balok RC control sebesar 38,5% yaitu perubahan penggunaan tulangan besi diameter 13 menjadi tulangan diameter 8.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

2.1 Balok beton bertulang

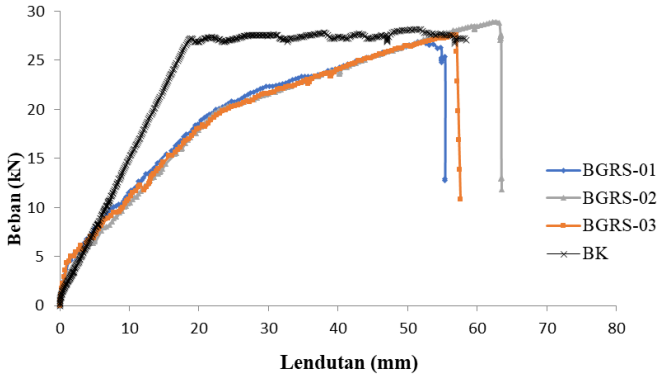
Nilai rata-rata beban pada tiga balok kontrol pada tahap retak awal mencapai 2,61 kN, dengan defleksi sebesar 1,29 mm terjadi di bagian tengah balok, dan retak lentur pertama terjadi pada zona ke-2 di bagian bawah balok. Saat beban mencapai titik leleh sebesar 25,87 kN, terjadi lendutan sebesar 17,67 mm. Pada tahap pembebanan berlanjut, peningkatan beban tetap terbatas, namun lendutan terus meningkat. Ketika beban mencapai puncak sebesar 29,74 kN, balok percobaan mengalami defleksi sebesar 53,59 mm. Tiga balok RC yang dalam kondisi kritis dengan kode BGR telah diperbaiki dengan mortar grouting pada permukaan bawahnya. Saat beban rata-rata mencapai 2,38 kN pada balok BGR, terjadi defleksi sebesar 2,18 mm di bagian tengah balok. Tulangan baja mulai meleleh pada beban rata-rata 12,17 kN, dan defleksi yang sesuai dengan beban tersebut diukur sebesar 19,06 mm. Ketika mencapai beban puncak, balok kehilangan daya dukung dan runtuh pada beban 14,39 kN. Balok mengalami defleksi sebesar 28,17 mm, kehilangan daya dukungnya, dan runtuh (Gambar 4). Terjadi penurunan yang signifikan dalam kapasitas dukung beban balok BGR sebesar 51,58% jika dibandingkan dengan balok kontrol. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Sawan et al. (2022), kualitas mortar mampu meningkatkan kapasitas beban hingga 65% dari balok kontrol, begitu pula dengan penelitian yang dilakukan oleh Mansur et al., 2024; Ombres & Verre, 2019; Peng, Hu, Niu, Zhong, et al., 2023), di mana mortar grouting yang digunakan berhasil meningkatkan daya dukung beban masing-masing sebesar 72% dan 120%.



Gambar 4. Hubungan Beban – Lendutan untuk balok BGR

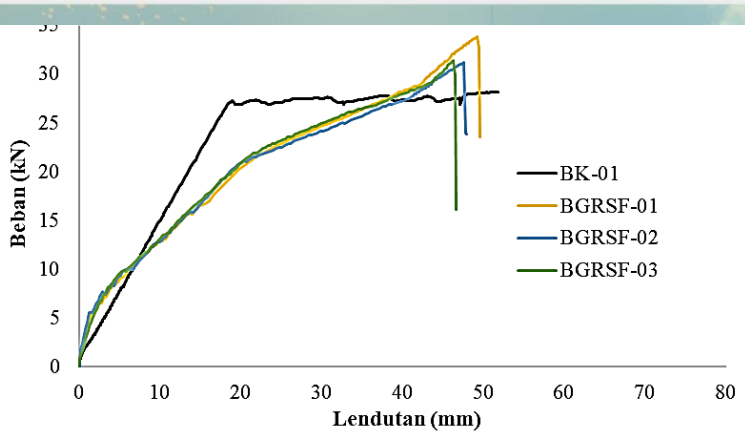
Tiga balok RC dengan kode BGRS direhabilitasi menggunakan mortar Sikagrout-215 dan diperkuat dengan lembar GFRP komposit pada permukaan bawah balok. Pada beban rata-rata 7.22 kN, terjadi lendutan sebesar 4.85 mm di bagian tengah balok dan retak lentur pertama terjadi pada zona ke-2 bagian bawah balok. Ketika beban mencapai 18.50 kN, tulangan mulai meleleh dan lendutan yang sesuai dengan beban tersebut adalah sekitar 24.97 mm. Pada beban 27.81 kN, balok mengalami defleksi sebesar 50.24 mm, kehilangan daya dukung, dan runtuh (Gambar 5). Perkuatan balok RC BGRS dengan grouting dan lembar GFRP komposit mengalami penurunan daya dukung ultimit sebesar 6.49% dibandingkan dengan balok kontrol. Penelitian sebelumnya (Ali et al., 2021; Mansur et al, 2024; Mansur et al., 2024)) telah berhasil melakukan perkuatan pada permukaan bawah balok, menjaga kualitas struktur balok dari beban berulang dan kondisi ekstrem.

Penggunaan lembar GFRP komposit pada permukaan bawah beton (BGRS) belum sepenuhnya mengembalikan fungsi balok seperti balok kontrol, namun dapat mempertahankan masa layan beban dibandingkan dengan penggantian beton baru. Penurunan daya dukung ultimit BGRS disebabkan oleh kelemahan material beton bertulang dan kualitas tulangan yang lebih rendah pada benda uji dibandingkan dengan balok kontrol (Abdallah et al., 2023). Proses perkuatan yang dilakukan mungkin tidak optimal, sehingga tidak selalu menghasilkan peningkatan daya dukung yang maksimal. Meskipun demikian, jika nilai beban yang tercapai memenuhi persyaratan keamanan dan keandalan struktur, perbaikan dapat dianggap berhasil dalam memperkuat struktur yang rusak atau lemah (Sawant & Jadhav, 2022)



Gambar 5. Hubungan Beban – Lendutan untuk balok BGRS

Tiga buah balok RC dengan kode BGRST diperkuat dengan grouting dan full wrapping pada seluruh zona struktur balok. Pada beban rata-rata 7,24 kN pada balok BGRST, terjadi defleksi sebesar 2,96 mm di tengah balok dan retak lentur pertama terjadi pada zona bawah ke-2 balok. Pada beban 21,54 kN, tulangan mulai meleleh dan lendutan yang sesuai dengan beban tersebut adalah sekitar 21,60 mm. Pada beban maksimum 32,14 kN, balok mengalami defleksi sebesar 47,72 mm, kehilangan daya dukung, dan runtuh (Gambar 6). Penggunaan GFRP pada struktur balok BGRST memberikan pengaruh yang signifikan di mana perkuatan pada balok yang dalam kondisi kritis mampu meningkatkan kapasitas beban balok kontrol sebesar 8,1% (Mansur et al., 2024). Dalam penelitian yang menggunakan konfigurasi perkuatan yang berbeda dengan menggunakan GFRP serupa dengan model BGRS, diperoleh peningkatan kekuatan sebesar 118% dan 90% dibandingkan dengan balok kontrol (Mansur et al., 2024)



Gambar 6 Hubungan Beban – Lendutan untuk balok BGRST

Meskipun balok beton RC mengalami keruntuhan, perkuatan GFRP pada daerah tumpuan membantu meningkatkan kapasitas balok dan memungkinkannya menahan beban yang lebih tinggi sebelum mencapai batas kegagalan. Perkuatan GFRP pada daerah tumpuan pada balok memberikan peningkatan kekakuan struktural yang signifikan dengan ikatan mekanik yang kuat antara GFRP dan beton, sehingga transfer gaya yang efisien terjadi antara keduanya dan meningkatkan kekakuan balok secara keseluruhan (Ombres & Verre, 2019). Distribusi beban yang merata di sepanjang balok merupakan manfaat lain dari perkuatan GFRP pada daerah tumpuan, mengurangi konsentrasi beban pada titik-titik kritis (Ali et al., 2021) dan mencegah kegagalan atau keretakan pada balok. Kekakuan akibat perkuatan GFRP memungkinkan balok mengalami deformasi elastis dan elastoplastis tanpa retakan yang signifikan (Abdallah et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perbaikan lokal dengan Sika Grouting dan perkuatan menggunakan GFRP efektif dalam mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan. Perbaikan dengan grouting saja (BGR) mampu meningkatkan kinerja balok yang mengalami kerusakan, namun mengalami penurunan daya dukung ultimit sebesar 51,58% dibandingkan balok kontrol. Kombinasi perbaikan grouting dan perkuatan GFRP (BGRS) lebih lanjut meningkatkan kapasitas beban dan kekakuan struktural, dengan penurunan daya dukung ultimit sebesar 6,49% dibandingkan balok kontrol. Penggunaan U-Wrap pada daerah tumpuan (BGRST) memberikan peningkatan tambahan pada kapasitas beban, yaitu sebesar 8,1% dibandingkan balok kontrol. Penelitian ini memberikan bukti bahwa metode perbaikan dan perkuatan ini merupakan solusi yang layak dan berkelanjutan untuk memperpanjang umur layanan jembatan dan meningkatkan keselamatan pengguna, terutama di daerah dengan paparan klorida tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Abdallah, M., Al Mahmoud, F., Khalil, N., & Khelil, A. (2023). Effect of the strengthening patterns on the flexural performance of RC continuous beams using FRP reinforcements. Engineering Structures, 280. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115657

Ali, H., Assih, J., & Li, A. (2021). Flexural capacity of continuous reinforced concrete beams strengthened or repaired by CFRP/GFRP sheets. International Journal of Adhesion and Adhesives, 104, 102759. https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2020.102759

Mansur, A. Z., Djamaluddin, R., Parung, H., & Irmawaty, R. (2024). Study of Post-Spalling Reinforced Concrete Beam Repair Using Grouting and GFRP Reinforcement. Civil Engineering Journal (Iran), 10(1), 131–144. https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-01-08

Mansur, A. Z., Djamaluddin, R., Parung, H., Irmawaty, R., & Nawir, D. (2024). Effectiveness of Grouting and GFRP Reinforcement for Repairing Spalled Reinforced Concrete Beams. Civil Engineering Journal, 10(7). https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-07-05

Ombres, L., & Verre, S. (2019). Flexural Strengthening of RC Beams with Steel-Reinforced Grout: Experimental and Numerical Investigation. Journal of Composites for Construction, 23(5), 04019035. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000960

Peng, G., Hu, X., Niu, D., Zhang, Y., & Zhong, S. (2023). Study on the axial compression behavior of RC columns strengthened with cementitious grout. Engineering Structures, 284. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115742

Peng, G., Hu, X., Niu, D., Zhong, S., & Huang, D. (2023). Experimental study on the shear behavior of RC beams strengthened with cementitious grout. Structures, 50, 1403–1415. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.115

Sawant, S. G., & Jadhav, H. S. (2022). Flexural behaviour of GFRP strengthened RC beams under cyclic loading. Materials Today: Proceedings, 59, 188–195. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.396

Wang, L., Zhang, X., Zhang, J., Ma, Y., Xiang, Y., & Liu, Y. (2014). Effect of insufficient grouting and strand

corrosion on flexural behavior of PC beams. Construction and Building Materials, 53, 213–224. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.069

AGREGAT BUATAN UNTUK BETON YANG TERBUAT DARI PLASTIK PET (*Polyethylene Terephthalate*) DENGAN CAMPURAN ABU SEKAM PADI

Ketut Aswatama Wiswamitra[1], Ary Wahyu Perdana[1], Krisnamurti[1]

1 Jurusan Teknik Sipil, Universitas Jember, Jl. Kalimantan No.37 Jember
ketut.teknik@unej.ac.id, *wahyuary400@gmail.com*, *murti_krisna.teknik@unej.ac.id*

ABSTRAK

Indonesia menyumbang sampah plastik ke laut terbanyak kedua di dunia. Diperlukan inovasi penanganan sampah plastik khususnya jenis PET yang digunakan sebagai agregat buatan sebagai bahan penyusun beton. Untuk meningkatkan daya ikat agregat buatan dengan pasta semen ditambahkan abu sekam padi saat pembuatan agregat. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik mekanik beton yang menggunakan agregat buatan yang berasal dari campuran plastik PET dengan abu sekam padi. Penelitian dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama untuk mengetahui kadar optimal abu sekam padi. Tahap kedua untuk mengetahui karakteristik mekanik beton termasuk berat isi beton. Hasil pengujian tahap satu yang menggunakan agregat buatan sebagai agregat kasar menunjukkan kuat tekan optimal pada umur tujuh hari sebesar 24,85 MPa dan berat isi sebesar 1900 kg/m^3. Pada pengujian tahap dua, dengan memanfaatkan agregat buatan berukuran halus sebagai pengganti pasir alami menunjukkan bahwa persentase agregat halus buatan sebesar 0% memiliki hasil paling tinggi, dengan kuat tekan pada umur 28 hari yaitu 18,21 MPa, kuat tarik belah 1,66 MPa dan berat isi beton sebesar 2131,82 kg/m^3.

Kata kunci: plastik PET, abu sekam padi, agregat ringan, agregat buatan

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Permasalahan sampah nasional telah relatif meresahkan. Saat ini, Indonesia adalah negara penyumbang sampah plastik ke laut terbanyak kedua di dunia (Hakim, 2019). Sampah yang dihasilkan dari aktivitas manusia terdiri dari 60-70% sampah organik dan sisanya 30-40% sampah non organik. Sampah plastik merupakan komposisi terbesar kedua dari sampah non organik yaitu 14 % (Purwaningrum, 2016). Dari kasus tersebut terdapatlah inovasi dari penanganan sampah plastik khususnya sampah plastik jenis PET. Sampah plastik PET digunakan sebagai agregat buatan dalam campuran pembuatan beton.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Pratikto (2010) dengan membuat beton ringan dengan menggunakan campuran limbah plastik (PET) sebagai bahan untuk pengganti agregat kasarnya. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Rocky Armidion dan Tanjung Rahayu (2018) membuat beton dengan ditambahkannya limbah botol plastik (PET) yang sudah di cacah dengan persentase campuran 0%, 0,5%, 0,6%, 0,7% terhadap volume silinder beton. Beton dibuat masing-masing 3 sampel per persentase campuran. Campuran ini akan menjadi beton serat yang akan meningkatkan kuat tarik belah beton. Menurut K A Wiswamitra, dkk (2021) bahwa penggunaan plastik PET sebagai agregat kasar (sementara agregat halus menggunakan pasir alam) dapat menghasilkan efisiensi struktural yang lebih besar dari beton dibandingkan dengan beton dengan agregat alami seluruhnya.

Namun disisi lain terdapat sifat plastik yang sulit untuk menyerap air sehingga mengakibatkan ikatan agregat yang lemah dengan pasta semen. Berdasarkan penelitian terdahulu untuk meningkatkan ikatan agregat maka ditambahkan suatu mineral. Pada penelitian yang dilakukan oleh K A Wiswamitra, dkk (2020) mineral yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir halus, fly ash, abu sekam padi, dan semen portland. Kecuali semen Portland, mineral yang dipilih dalam penelitian ini adalah limbah dan mudah diperoleh dari sekitar lokasi penelitian. Fly ash tipe F diambil dari PLTU batubara, abu sekam diperoleh dari sekam padi yang dibakar dalam proses membuat batu bata tanah liat di tempat pembuatan batu bata yang ditemukan di pinggiran kota, dan pasir halus diperoleh dengan menyaring pasir lokal.

Dari gambaran tersebut di atas, penelitian ini akan membuat beton dengan agregat buatan yang berasal dari limbah plastik botol jenis PET dan menggunakan abu sekam padi sebagai mineral dengan komposisi campuran abu sekam padi dan PET yakni 1:4,1:5, dan 1:6. Adapun agregat halus yang digunakan adalah pasir dari Lumajang

Agregat ringan

Menurut SNI 03-2461-2002 agregat ringan merupakan agregat yang memiliki berat isi kering oven gembur maksimum 1120 kg/m³. agregat ringan ini dibedakan menjadi dua yaitu agregat buatan dan agregat ringan alami. Agregat buatan merupakan agregat yang dibuat dengan membekahkan atau memanaskan bahan-bahan, seperti meleburkan besi, tanah liat diatome, abu terbang, tanah serpih, batu tulis dan lempung. Sedangkan agregat ringan alami merupakan agregat yang diperoleh dari bahan-bahan alami seperti batu apung, batu letusan gunung atau batuan lahar. Menurut SNI 03-2461-2002 terdapat persyaratan fisis agregat ringan yang dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Jumlah benda uji untuk pengujian kuat tekan tahap 1

No.	Sifat fisis	Persyaratan
1.	Berat jenis	1-1,8
2.	Penyerapan air maksimum (%), setelah direndam 24 jam	20
3.	Berat isi maksimum	
	- Gembur kering (kg/cm)	1120
	- Agregat halus	880
	- Agregat kasar	1040
	- Campuran agregat kasar dan halus	60
4.	Nilai persentase volume padat (%)	9-14
5.	Nilai 10% kehalusan (ton)	
6.	Kadar bagian yang terapung setelah direndam dalam air 10 menit maksimum (%)	5
7.	Kadar bahan yang mentah (clay dump) (%)	<1
8.	Nilai keawetan, jika dalam larutan magnesium sulfat selama 16 – 18 jam, bagian yang larut maksimum (%)	12

(SNI 03-2461,2002)

Plastik PET

Menurut Sasmitha dan Marsono (2017) PET merupakan plastik yang banyak digunakan untuk botol minuman. Plastik ini memiliki kode segitiga yang didalamnya ada angka 1. Botol dengan jenis PET ini direkomendasikan untuk satu kali pemakaian. PET digunakan sebagai bahan dasar botol kemasan yang mencapai 30% pemakaian dunia. Plastik ini juga digunakan sebagai serat sintetis yang mencapai 60% dari pemakaian dunia.

Plastik PET mempunyai ciri-ciri yaitu berwarna jernih, tembus pandang, kuat dan tahan panas. Salah satu keunggulan plastik PET adalah dapat didaur ulang kembali menjadi barang yang mempunyai nilai ekonomis seperti pot bunga, tas, karpet, furniture, dll.

Abu sekam padi

Abu sekam padi adalah hasil dari sisa pembakaran sekam padi. Menurut Suhirman dkk (2012) abu sekam padi memiliki kandungan senyawa, diantaranya adalah SiO_2 (89,64%) , Fe_2O_3 (0,06%) , Al_2O_3 (0,73%), CaO (3,56%). Dilihat dari kandungan senyawa tersebut, abu sekam padi dapat digunakan sebagai pozzolan karena $SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3$ melebihi dari 70% dan sesuai dengan mutu pozzolan yang disyaratkan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimen. Membuat benda uji untuk eksperimen penelitian. Benda uji yang digunakan ada 2 yaitu benda uji berbentuk kubus dan silinder. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur Fakultas Teknik Universitas Jember. Penelitian ini dimulai dengan membuat agregat buatan dari plastik PET dan abu sekam padi. Perbandingan yang digunakan antara plastik PET dan abu sekam padi yaitu 1:4, 1:5, dan 1:6, serta membuat agregat ringan tanpa ada campuran abu sekam padi.

Pada proses pembuatan agregat buatan ini, plastik yang digunakan akan dilelehkan pada wajan. Sumber panas berasal dari gas LPG dengan seperangkat alat kompor gas. Setelah plastik mulai meleleh, abu sekam padi dimasukkan ke penggorengan. Adapun suhu pemanasan yang diukur saat pelelehan adalah ± 270°C. Hal yang perlu diperhatikan yaitu apabila campuran tidak segera diaduk saat mulai meleleh, maka suhu dapat meningkat melebihi suhu leleh PET yang menghasilkan bahan agregat plastik PET yang rapuh. Adapun proporsi campuran antara abu sekam padi dan plastik yaitu 1:4, 1:5, 1:6 dan ada yang dibuat tanpa campuran abu sekam padi. Ketika campuran abu sekam padi dan plastik sudah mulai menyatu dan cairannya sudah mulai berwarna hitam, selanjutnya cairan tersebut dituangkan ke dalam cetakan dan proses pendinginan. Setelah itu, proses selanjutnya yaitu penghancuran agregat buatan ke dalam *stone crusher*. Kemudian dilakukan pengayakan, dibedakan tiap saringan, mulai dari yang masuk ke dalam agregat kasar dan agregat halus. Proses pembuatan agregat buatan dapat dilihat pada gambar 1.


(a)


(b)


(c)

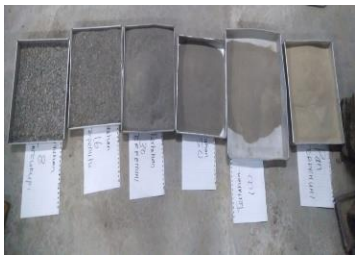

(d)


(e)


(f)


(g)


(h)


(i)

(a) Pelelehan PET; (b) Pencampuran dengan Abu Sekam padi; (c) PET dan Abu Sekam Padi Menyatu; (d) Penuangan ke dalam Cetakan; (e) Penghancuran dengan *Stone Crusher*; (f) Agregat buatan Hancur; (g) Pengayakan; (h) Agregat Kasar Setelah Pengayakan; (i) Agregat Halus Setelah Pengayakan

Gambar 1. Proses Pembuatan Agregat buatan

Pada penelitian ini, kuat tekan yang direncanakan adalah sebesar fc' 35 MPa. SNI 03-3449-2002 sebagai acuan dalam pembuatan *mix design* campuran bahan untuk beton. Penelitian ini terbagi dalam 2 tahapan pembuatan beton. Tahap 1 yaitu membuat beton dengan agregat buatan dari perbandingan antara plastik PET dan abu sekam padi. Agregat buatan akan menggantikan seluruh agregat kasar alami. Beton tahap 1 akan diuji kuat tekan pada saat beton berumur 7 hari. Tahap 2 yaitu membuat beton dengan agregat buatan dari proporsi optimal yang akan menggantikan agregat kasar dan halus alami. Persentase penggunaan agregat halus buatan terhadap agregat halus alami yaitu 0%,50%, dan 100%. Beton tahap 2 akan diuji kuat tekan dan kuat tarik belah beton saat beton berumur 28 hari. Kebutuhan benda uji dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2, 3, dan 4.

Tabel 2. Jumlah benda uji untuk pengujian kuat tekan tahap 1

Kode Benda Uji	Proporsi Perbandingan Campuran Mineral dan PET	Jumlah Benda Uji
		7 Hari
BK 1	PET murni	3
BK 2	1:4	3
BK 3	1:5	3
BK 4	1:6	3
	Total	12

Tabel 3. Jumlah benda uji untuk pengujian kuat tekan tahap 2

Kode Benda Uji	Proporsi Perbandingan Pasir Alami dan Buatan	Jumlah Benda Uji
		28 Hari
BS 1	100%:0%	3
BS 2	50%:50%	3
BS 3	0%:100%	3
Total		9

Tabel 4. Jumlah benda uji untuk pengujian kuat tekan tahap 2

Kode Benda Uji	Proporsi Perbandingan Pasir Alami dan Buatan	Jumlah Benda Uji
		28 Hari
BS 1	100%:0%	3
BS 2	50%:50%	3
BS 3	0%:100%	3
Total		9

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian material

Pengujian material dilakukan untuk agregat alami dan agregat buatan. Hasil pengujian material dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian material

No.	Pengujian	Hasil Pengujian	Satuan
1.	Analisa Saringan Pasir Alami	Zona 2	-
2.	Berat Jenis Pasir Alami	2,69	-
3.	Berat Volume Pasir Alami	1483,03	kg/m³
4.	Air Resapan Pasir Alami	2,49	%
5.	Kelembapan Pasir Alami	2,18	%
6.	Berat Volume Kerikil Alami	1332,9	kg/m³
7.	Berat Jenis Kerikil Alami	2,8	-
8.	Analisa Saringan Pasir Buatan	Zona 3	-
9.	Berat Jenis Pasir Buatan	1,39	-
10.	Berat Volume Pasir Buatan	699,72	kg/m³
11.	Air Resapan Pasir Buatan	7,53	%
12.	Kelembapan Pasir Buatan	0,90	%
13.	Analisa Saringan Kerikil Buatan	Zona 2	-
14.	Berat Jenis Kerikil Buatan Proporsi PET murni	1,25	-
15.	Berat Jenis Kerikil Buatan Proporsi 1:4	1,39	-
16.	Berat Jenis Kerikil Buatan Proporsi 1:5	1,33	-
17.	Berat Jenis Kerikil Buatan Proporsi 1:6	1,26	-
18.	Berat Volume Kerikil Buatan Proporsi PET murni	619,3	kg/m³
19.	Berat Volume Kerikil Buatan Proporsi 1:4	691,7	kg/m³
20.	Berat Volume Kerikil Buatan Proporsi 1:5	627,3	kg/m³
21.	Berat Volume Kerikil Buatan Proporsi 1:6	571	kg/m³
22.	Air Resapan Kerikil Buatan Proporsi PET murni	1,92	%
23.	Air Resapan Kerikil Buatan Proporsi 1:4	2,98	%
24.	Air Resapan Kerikil Buatan Proporsi 1:5	2,88	%
25.	Air Resapan Kerikil Buatan Proporsi 1:6	3,95	%
26.	Kelembapan Kerikil Buatan Proporsi PET murni	0,36	%
27.	Kelembapan Kerikil Buatan Proporsi 1:4	0,38	%
28.	Kelembapan Kerikil Buatan Proporsi 1:5	0,41	%
29.	Kelembapan Kerikil Buatan Proporsi 1:6	0,41	%

Kebutuhan material pembuatan beton

Perhitungan *mix design* campuran bahan untuk beton menggunakan SNI 03-3449-2002. *Mix design* dibuat menjadi 2 rencana, untuk pembuatan beton tahap 1 dan tahap 2. Setelah melakukan *mix design* maka didapatkan kebutuhan bahan material untuk pembuatan beton. Kebutuhan material dapat dilihat pada tabel 6, 7, dan 8.

Tabel 6. Kebutuhan bahan material per m^3

Bahan Material	Nilai		Satuan
	Tahap 1	Tahap 2	
Semen	488,1	488,1	kg
Air	205	205	liter
Pasir	743,15	831,6	kg
Kerikil	1026,3	937,8	kg

Tabel 7. Kebutuhan bahan tiap benda uji untuk tahap 1

Bahan Material	Proporsi				Satuan
	PET murni	1:4	1:5	1:6	
Semen	0,488	0,488	0,488	0,488	kg
Air	0,205	0,205	0,205	0,205	liter
Pasir	0,743	0,743	0,743	0,743	kg
Kerikil buatan	0,477	0,533	0,483	0,440	kg

Tabel 8. Kebutuhan bahan tiap benda uji untuk tahap 2

Bahan Material	Persentase pasir buatan			Satuan
	0%	50%	100%	
Semen	0,77	0,77	0,77	kg
Air	0,32	0,32	0,32	liter
Pasir Alami	1,31	0,65	0	kg
Pasir Buatan	0	0,31	0,62	kg
Kerikil buatan	0,8	0,8	0,8	kg

Hasil pengujian *slump*

Pengujian *Slump* dilakukan untuk mengetahui *workability* dari beton segar. Pengujian *slump* dilakukan sebelum beton segar dituangkan ke dalam cetakan bekisting. Pengujian *slump* ini dilakukan hanya di pengecoran beton tahap 2. Contoh gambar pengujian *slump* dapat dilihat pada gambar 2 dan hasil pengujian *slump* dapat dilihat pada tabel 9.



Gambar 2. Pengujian slump beton (Perdana dkk, 2021)

Tabel 9. Kebutuhan bahan tiap benda uji untuk tahap 2

No.	Persentase Campuran Pasir Alami Dan Buatan	Nilai *Slump*	Satuan
1.	100%:0%	9	cm
2.	50%:50%	10	cm
3.	0%:100%	9	cm

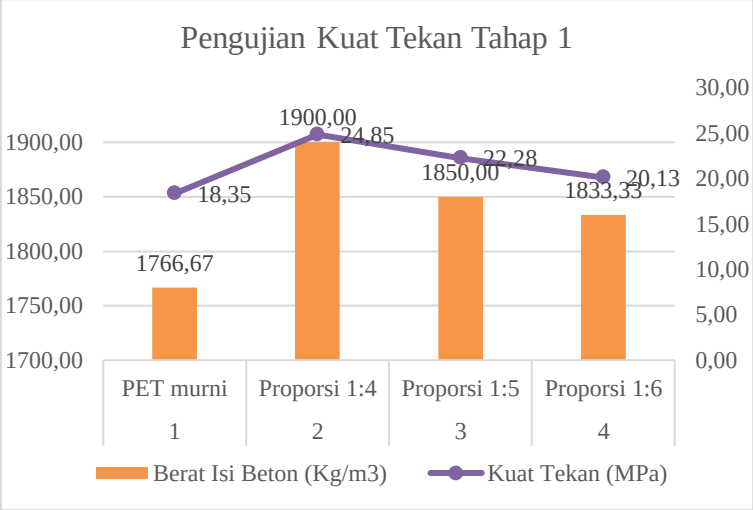
Dari hasil tersebut menunjukkan bahwa nilai *slump* test sesuai dengan perencanaan.

Hasil pengujian kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan menjadi 2 tahap. Tahap 1, saat beton berumur 7 hari, sedangkan tahap 2, saat beton berumur 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan tahap 1 dapat dilihat pada tabel 10 dan gambar 3.

Tabel 10. Hasil pengujian kuat tekan beton tahap 1

Proporsi Agregat buatan	Umur Beton (hari)	Kuat Tekan (MPa)	Berat Isi Beton (kg/m³)
PET Murni	7	18,35	1766,67
1:4	7	24,85	1900
1:5	7	22,28	1850
1:6	7	20,13	1833,33



Gambar 3. Hasil pengujian kuat tekan tahap 1 (Perdana dkk, 2021)

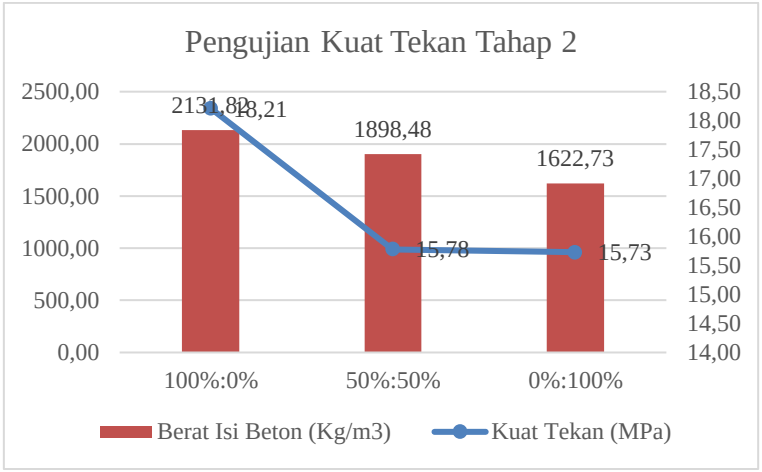
Dari pengujian tahap 1, didapatkan nilai proporsi optimal dari abu sekam padi banding PET sebagai agregat buatan yang menghasilkan kuat tekan beton optimal pada perbandingan 1:4. Kuat tekan yang dihasilkan sebesar 24,85 MPa dan berat isi beton sebesar 1900 kg/m³.

Pada pembuatan dan pengujian beton tahap 1, terdapat 3 proporsi yaitu PET murni, 1:5, dan 1:6 yang masuk ke dalam kriteria beton ringan struktural. Menurut SNI 03-3449-2002 kriteria beton ringan struktural yaitu memiliki nilai kuat tekan antara 17,24-41,36 MPa dan berat isi beton antara 1400-1850 kg/m³. Pada proporsi 1:4 tidak memenuhi kriteria beton ringan struktural dikarenakan berat isi beton melebihi batas maksimal.

Selanjutnya, pada tahap 2 akan menggunakan proporsi 1:4 sebagai proporsi optimal untuk digunakan sebagai pembuatan beton yang akan menggantikan agregat kasar dan halus alami. Proporsi 1:4 akan dicoba pada tahap 2 yang bertujuan untuk menurunkan berat isi beton dengan cara menggantikan pasir alami dengan pasir buatan, serta untuk mengetahui nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton. Hasil pengujian kuat tekan tahap 2 dapat dilihat pada tabel 11 dan gambar 4.

Tabel 11. Hasil pengujian kuat tekan beton tahap 2

Persentase Agregat Halus Alami dan Buatan	Umur Beton (hari)	Kuat Tekan (MPa)	Berat Isi Beton (kg/m³)
0%:100%	28	18,21	2131,82
50%:50%	28	15,78	1898,48
100%:0%	28	15,73	1622,12



Gambar 4. Hasil pengujian kuat tekan tahap 2 (Perdana dkk, 2021)

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton tahap 2, beton yang menggunakan persentase agregat halus buatan 0% memiliki nilai kuat tekan sebesar 18,21 MPa, sedangkan untuk persentase 50% mendapatkan nilai kuat tekan sebesar 15,78 MPa dan untuk persentase agregat halus buatan 100% mendapatkan nilai kuat tekan sebesar 15,73 MPa.

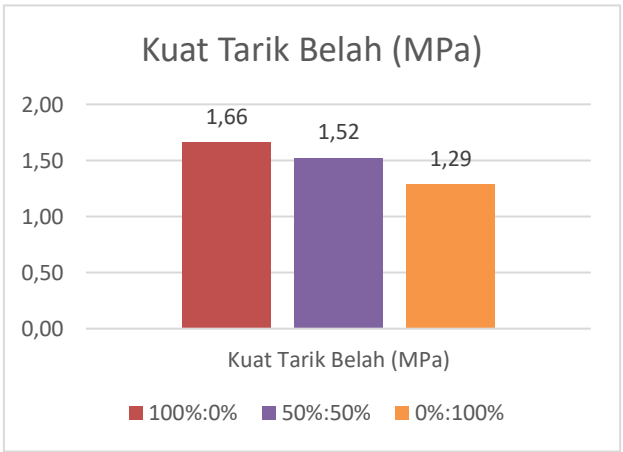
Pada persentase agregat halus buatan 0% dan 50% beton termasuk ke dalam beton normal. Menurut Panennungi T dan Nurlita Pertiwi (2018) beton normal memiliki berat isi beton antara 1,8 – 2,8 t/m³. Sedangkan untuk persentase agregat halus buatan 100% tidak bisa masuk ke dalam jenis beton. Jika dimasukkan ke dalam kriteria beton ringan, harus memenuhi syarat baik berat isi beton maupun kuat tekan beton. Pada persentase agregat halus buatan 0%:100% hanya bisa di lihat dari segi berat isi betonnya tetapi untuk nilai kuat tekan beton tidak bisa dikategorikan sebagai beton ringan.

Hasil pengujian kuat tarik belah beton

Pengujian kuat tarik belah dilakukan hanya pada beton tahap 2. Pengujian dilakukan saat beton berumur 28 hari. Hasil pengujian kuat tarik belah beton dapat dilihat pada tabel 12 dan gambar 5.

Tabel 12. Hasil pengujian kuat tarik belah beton tahap 2

Persentase Agregat Halus Alami dan Buatan	Umur Beton (hari)	Kuat Tarik Belah (MPa)
0%:100%	28	1,66
50%:50%	28	1,52
100%:0%	28	1,29



Gambar 5. Hasil pengujian kuat tarik belah beton tahap 2 (Perdana dkk, 2021)

Hasil pengujian kuat tarik belah beton, persentase agregat halus buatan 0% memiliki nilai kuat tarik belah paling tinggi dari persentase lainnya. Persentase agregat halus buatan 0% memiliki nilai kuat tarik belah beton sebesar 1,66 MPa, kemudian untuk persentase 50% mendapatkan nilai sebesar 1,52 MPa dan untuk persentase agregat halus buatan 100% memiliki nilai sebesar 1,29 MPa.

Nilai kuat tarik belah beton dan nilai kuat tekan beton mengalami penurunan akibat penggunaan persentase agregat halus buatan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Beton yang menggunakan agregat buatan dari campuran abu sekam padi-PET lebih tinggi kuat tekannya dibanding agregat buatan yang dibuat hanya dari plastik PET saja. Dari penelitian diatas didapatkan nilai kuat tekan optimal pada proporsi campuran abu sekam padi dan plastik PET yaitu 1:4. Kuat tekan yang dihasilkan sebesar 24,85 MPa. Sedangkan untuk berat isi betonnya sebesar 1900 kg/m³.

Pada penelitian diatas beton dibuat dari proporsi optimal abu sekam padi-PET 1:4 sebagai agregat buatan yang menggantikan agregat kasar dan halus alami. Didapatkan hasil paling tinggi di persentase agregat halus alami dan buatan 100%:0%. Kuat tekan yang dihasilkan sebesar 18,21 MPa, kuat tarik yang dihasilkan sebesar 1,66 MPa dan berat isi beton sebesar 2131,82 kg/m³. Selanjutnya pada persentase agregat halus alami dan buatan 50%:50%. Kuat tekan yang dihasilkan sebesar 15,78 MPa, kuat tarik yang dihasilkan sebesar 1,52 MPa dan berat isi beton sebesar 1898,48 kg/m³. Kemudian pada persentase agregat halus alami dan buatan 0%:100%. Kuat tekan yang dihasilkan sebesar 15,73 MPa, kuat tarik yang dihasilkan sebesar 1,29 MPa dan berat isi beton sebesar 1622,12 kg/m³.

Saran

Pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan agregat halus buatan dengan persentase sebesar 60%,70%,80%,90% dan 100% pada proporsi abu sekam padi-PET 1:4. Serta penggunaan rasio semen dengan agregat yang lebih besar. Mencoba penggunaan bahan lain yang lebih ringan dari abu sekam padi untuk campuran dengan plastik PET seperti batu apung. Ukuran agregat kasar yang digunakan bisa dicoba pada ukuran 10 mm.

DAFTAR PUSTAKA

Armidion, R., & Rahayu, T. (2018). *PENINGKATAN NILAI KUAT TARIK BELAH BETON DENGAN CAMPURAN LIMBAH BOTOL PLASTIK POLYETYLENE TEREPHTHALATE (PET)*. *10*(1), 117–126.

Hakim, M. Z. (2019). *Pengelolaan dan Pengendalian Sampah Plastik Berwawasan Lingkungan*. *27*(2), 111–121.

Panennungi, T., & Pertiwi, N. (2018). *Ilmu Bahan Bangunan*.

Pratikto. (2010). *Beton Ringan Ber-agregat Limbah Botol Plastik jenis PET (Poly Ethylene Terephthalate) Abstrak*. *9*(1), 1–8.

Purwaningrum, P. (2016). *UPAYA MENGURANGI TIMBULAN SAMPAH PLASTIK*. *8*(2), 141–147.

Sasmitha, D., & Marsono, B. D. (2017). Pemanfaatan Sampah Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) sebagai Media pada Unit Pre-filter. *Jurnal Teknik ITS*, *6*(1). https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i1.21744

SNI 03-2461. (2002). Spesifikasi agregat ringan untuk beton ringan struktural. In *Badan Standardisasi Nasional* (p. 2461).

SNI 03-3449-2002. (2002). Tata cara rencana pembuatan campuran beton ringan dengan agregat ringan. In *Yayasan LPMB* (pp. 1–32).

Suhirkam, D., Tanzil, G., & Astira, I. F. (2012). *PENGARUH PENAMBAHAN ABU SEKAM PADI DAN SUPERPLASTICIZER TERHADAP KEKUATAN BETON MUTU K - 500*. 283.

Wiswamitra, K. A., Dewi, S. M., Choiron, M. A., & Wibowo, A. (2020). The Effect of Adding Minerals on Plastic Aggregate to Lightweight Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *506*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012046

Wiswamitra, Ketut Aswatama, Dewi, S. M., Choiron, M. A., & Wibowo, A. (2021). Heat resistance of lightweight concrete with plastic aggregate from PET (polyethylene terephthalate)-mineral filler. *AIMS Materials Science*, *8*(1), 99–118. https://doi.org/10.3934/MATERSCI.2021007

ANALISIS KARAKTERISTIK BAMBU SEBAGAI MATERIAL DINDING NON STRUKTURAL

Desi Putri[*], Astuti Masdar[2], Endah Lestari[1] dan Abdul Rokhman[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Jakarta*
e-mail: desi.putri@itpln.ac.id
[1]Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Payakumbuh, Jl. Sawah Padang Payakumbuh, Sumbar
e-mail: astuti_masdar@yahoo.com
[2] Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Jakarta
e-mail: endahlestari@itpln.ac.id
[3]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Jakarta
e-mail: abdulrokhman@itpln.ac.id

ABSTRAK

Bambu merupakan material konstruksi ramah lingkungan mempunyai keunggulan dari segi kekuatan yang diketahui dari sifat mekaniknya seperti kuat tarik, kuat tekan dan kuat lentur. Bambu diaplikasikan sebagai material pada komponen struktur seperti balok, kolom dan *truss.* Bambu juga dapat diaplikasikan sebagai komponen non struktur berupa dinding. Pada saat gempa bumi kerusakan pada bangunan didominasi oleh kerusakan pada dinding, meskipun dinding bukan sebagai komponen struktur. Keruntuhan pada dinding non struktur banyak menimbulkan kerugian dan korban luka termasuk korban jiwa. Salah satu upaya untuk mencegah timbulnya korban jiwa akibat runtuhnya dinding bangunan pada saat terjadi gempa adalah dengan membuat dinding terbuat dari bambu laminasi. Dengan kegagalan dinding dimana kekuatan terendah adalah geser sehingga perlu diketahui kekuatan mekanik bambu khususnya geser sebagai pertimbangan dalam desain. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui sifat fisik dan sifat mekanik bambu Petung sebagai bahan dasar dalam pembuatan bambu laminasi. Bambu Petung dilakukan dengan dua kondisi, kondisi pertama bambu Petung tanpa dilakukan pengawetan bambu dan kondisi kedua bambu Petung dengan dilakukan pengawetan pada bambu. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan standar ISO N225157-1 untuk pembuatan benda uji dan Standar N22157-2 untuk pengujian material. Pengawetan bambu mengacu pada SNI 8909-2020. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa bambu Petung yang dilakukan pengawetan memiliki sifat fisik dan sifat mekanik yang lebih tinggi dari pada bambu Petung tanpa dilakukan pengawetan. Kadar air pada bambu Petung mengalamai kenaikan 1,22% pada daerah nodia dan 2,76 % pada daerah internodia. Kerapatan Bambu Petung mengalami kenaikan sebesar 8,33% pada daerah nodia dan 11,36 % pada daerah internodia. Kuat geser pada Bambu Petung baik pada daerah nodia maupun pada daerah internodia masing masing sebesar 25,19% untuk daerah nodia dan pada daerah internodia terjadi peningkatan kuat geser bambu Petung sebesar 28,21%.

Kata kunci: bambu, sifat fisik, sifat mekanik, pengawetan

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu ancaman bencana yang paling sering terjadi di Indonesia. Gempa bumi dapat didefinisikan sebagai sebuah getaran di permukaan bumi yang diakibatkan oleh pelepasan energi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng bumi atau letusan gunung api (Widodo, 2012). Indonesia menjadi salah satu negara dengan riwayat panjang kejadian gempa karena terletak di antara pertemuan Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, serta Lempeng Pasifik. Lempeng-lempeng tektonik ini bergerak ke arah tertentu dengan kecepatan tertentu sehingga menghasilkan tumbukan yang berkibat pada terjadinya gempa bumi.

Dinding merupakan struktur padat yang membatasi dan kadang melindungi suatu area. Fungsi dinding adalah membatasi suatu bangunan dan menyokong struktur lainnya, membatasi ruang dalam bangunan menjadi ruangan-ruangan, melindungi atau membatasi suatu ruang di alam terbuka. Ditinjau dari segi struktur dan konstruksi, dinding ada yang berupa dinding partisi/pengisi (tidak menahan beban) dan ada yang berupa dinding struktural (*bearing wall*). Meskipun dinding bukan sebagai komponen struktur, pada saat gempa bumi kerusakan pada bangunan didominasi oleh kerusakan pada dinding. Satu hal yang perlu digarisbawahi adalah gempa tidak menyebabkan korban jiwa secara langsung. Sebagian besar korban jiwa yang timbul dalam kejadian bencana gempa bumi, disebabkan oleh reruntuhan bangunan yang kemudian menimpa penghuni di dalamnya.

Fakta yang bisa dilihat dari pasca gempa adalah bangunan rusak dan roboh. Komponen yang sangat vital adalah komponen dinding. Salah satu dinding yang banyak mengalami keruntuhan dan rusak berat adalah dinding yang menggunakan bahan dari batu bata. Oleh sebab itu perlu dicari solusi untuk membuat dinding yang tahan gempa yaitu dengan menggunakan material lain yang ringan, kuat dan mudah didapatkan sehingga kerugian moril dan materil dapat diminimalisir. Salah satu upaya untuk mencegah timbulnya korban jiwa akibat runtuhnya dinding bangunan

pada saat terjadi gempa adalah dengan membuat dinding bangunan menggunakan material dinding terbuat dari bambu laminasi.

Bambu dengan nama botani *Dendrocalamus asper*, di Indonesia dikenal dengan nama bambu petung, merupakan salah satu jenis bambu yang memiliki ukuran lingkar batang yang besar dan termasuk ke dalam suku rumput-rumputan. Bambu Petung adalah salah satu jenis bambu yang banyak digunakan sebagai material konstruksi karena memiliki keunggulan dari sifat fisik maupun mekaniknya. Bambu Petung memiliki batang dengan ketinggian 20-30m dan bentuk tegak serta melengkung dengan panjang ruas berkisar antara 40- 50cm (Damayanti, dkk, 2015). Bambu Petung pada umur 3 sampai 5 dengan berat jenis 0,72 kg/cm3 dan kadar air 15,5% memiliki nilai modulus elastisitas sekitar 12888 MPa. Bila diklasifikasikan menurut EN338, bambu Petung setara dengan kayu lunak C35 atau kayu keras D40 (Irawati, dkk, 2012). Kondisi tanah dan topografi tempat tumbuh bambu Petung mempengaruhi sifat fisik dan sifat mekanik bambu Petung (Masdar, dkk, 2010).



Gambar 1. Bambu Petung (*Dendrocalamus asper*)

Gambar di atas menampilkan beberapa batang bambu petung (*Dendrocalamus asper*) yang memiliki ciri khas berupa ukuran batang yang besar dengan ruas-ruas yang jelas. Bambu petung, seperti yang terlihat pada gambar, memiliki batang tebal dan kuat dengan permukaan kasar. Pada bagian nodus atau ruas, sering kali tumbuh tunas dan cabang-cabang kecil (lihat Gambar 1). Sifat fisik dan sifat mekanik bambu merupakan sifat yang harus diperhatikan dalam merancang bangunan yang menggunakan bahan dari bambu karena kedua sifat ini sangat diperlukan sebagai pertimbangan untuk mendapatkan hasil perancangan yang lebih optimal. Dengan kegagalan dinding dimana kekuatan terendah adalah geser sehingga perlu diketahui kekuatan mekanik bambu khususnya geser sebagai pertimbangan dalam desain dinding. Bambu Petung adalah bahan organik yang sangat rentan terhadap gangguan organisme perusak seperti jamur pewarna, jamur pelapuk, rayap tanah, rayap kayu kering, kumbang ambrosia serta bubuk kayu kering. Batangnya yang memiliki banyak zat pati dengan rasa yang manis sangat digemari oleh kumbang ataupun bubuk. Kondisi ini menjadi penghalang pemanfaatan bambu Petung sebagai bahan konstruksi. Tanpa pengawetan umur bangunan akan pendek, hanya mencapai 5 tahun sehingga tidak efektif meskipun secara kharakterikstik mekanik bambu Petung mempunyai kekuatan tinggi dibandingkan bambu jenis lain.

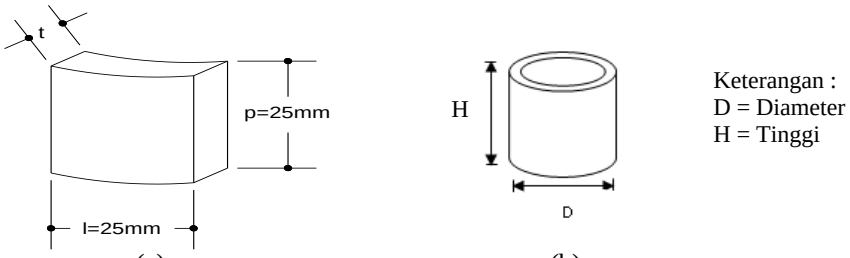
Pengawetan merupakan upaya yang dilakukan untuk meningkatkan durabilitas bambu Petung sebagai bahan konstruksi. Metode pengawetan bambu secara tradisional dilakukan dengan cara perendaman batang bambu di kolam atau di sungai. Metode ini memerlukan waktu yang lama sekitar 3 - 6 bulan sehingga untuk kebutuhan bambu yang banyak atau produksi dalam jumlah besar memerlukan waktu yang lama atau media rendaman yang luas (Masdar, dkk, 2023).

Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sifat fisik dan sifat mekanik bambu Petung dengan dilakukan pengawetan dan tanpa dilakukan pengawetan. Hasil penelitian dijadikan referensi dalam pembuatan bambu laminasi yang digunakan sebagai material dalam pumbuatan dinding non struktural. Hasil penelitian bisa juga dijadikan sebagai referensi dalam perencanaan struktur konstruksi yang menggunakan bahan bambu sehingga dapat mendorong masyarakat dalam menggunakan bambu sebagai bahan material pilihan dengan dukungan data dan penelitian terkait material bambu.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium. Ada dua tahapan dalam penelitian ini yaitu tahapan pengujian sifat fisik bambu dan tahapan pengujian sifat mekanik bambu untuk berbagai macam variasi benda uji. Pada tahapan pengujian sifat fisik bambu dilakukan pengujian kadar air bambu dan kerapatan bambu terhadap nodia dan internodia untuk bambu yang diawetkan dan bambu tanpa pengawetan. Pada pengujian sifat mekanik dilakukan pengujian kuat geser terhadap nodia dan internodia pada bambu tanpa pengawetan dan dengan pengawetan. Sebelum pengujian, pada bambu dengan pengawetan terlebih dahulu diawetkan menggunakan metode gravitasi, sebagaimana tercantum dalam SNI 8909 2020. Pengawet yang digunakan adalah Borax dan Boric Acid. Pengawetan yang dilakukan terhadap Bambu Petung dengan kosentrasi larutan sebesar 5%. Pengontrolan konsentrasi larutan pengawet dilakukan dengan menggunakan alat Hidrometer.

Pembuatan benda uji sifat fisik dan benda uji sifat mekanik dibuat menurut Standard ISO N22157- 1:2004. Bagian bambu petung yang diambil untuk pengujian sifat fisik dan sifat mekanik yaitu *internodia* dan *nodia*. Jumlah benda uji untuk masing-masing variasi adalah 10 benda uji dengan jumlah total benda uji sebanyak 80 buah benda uji. Ukuran benda uji untuk keperluan pengujian dengan bentuk spesimen seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk dan Ukuran Benda Uji a) Kadar air dan kerapatan b) Kuat geser

Pengujian benda uji sifat fisik dan benda uji sifat mekanik dilakukan berdasarkan Standar ISO N22157- 2:2004. Pengujian geser dilakukan menggunakan alat uji tekan *(compression testing machine).* Perhitungan nilai kadar air dan kerapatan pada Bambu Petung dilakukan menggunakan rumusan yang tercantum dalam ISO N22157.2 sebagaimana disajikan pada Persamaan (1) dan Persamaan (2)

$$Mc = \frac{M-Mo}{Mo} \text{ x } 100\% \quad (1)$$

dengan Mc = kadar air, M = berat sebelum di oven dan Mo = berat setelah di oven

$$\rho = \frac{Mo}{V} \text{ x } 100\% \quad (2)$$

dengan ρ = berat jenis, Mo = berat setelah di oven dan V = volume sebelum di oven

Untuk kuat tekan geser Bambu Petung dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3) berdasarkan prosedur ISO N22157-1:2004

$$\tau\ ult = \frac{P}{\sum(t\ x\ h)} \quad (3)$$

Dengan $\tau\ ult$ = tegangan geser, P = beban maksimum, t = tebal benda uji dan h = tinggi benda uji

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kadar Air dan Kerapatan

Pengujian kadar air dan kerapatan Bambu Petung dilakukan pada bambu yang tidak diawetkan dan pada bambu diawetkan baik pada daerah nodia/ruas maupun pada daerah inter nodia/ antar ruas sebagaimana yang disajikan pada Gambar 3. Hasil Pengujian kadar air dan kerapatan bambu Petung dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2

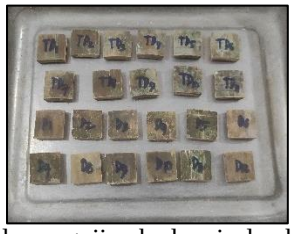
Tabel 1. Rata-rata Kadar Air Bambu Petung

Posisi pada batang	Kadar Air (%)

bambu	Tanpa pengawet	Dengan pengawet	Peningkatan kadar air (%)
Nodia	13,95	14,12	1,22
Internodia	13,43	13,80	2,76

Tabel 2. Rata-rata Kerapatan Bambu Petung

Posisi pada batang bambu	Kerapatan (%)		
	Tanpa pengawet	Dengan pengawet	Peningkatan kerapatan (%)
Nodia	0,96	1,04	8,33
Internodia	0,88	0,98	11,36



Gambar 3. Spesimen pada pengujian kadar air dan kerapatan pada bambu Petung

Hasil pengujian kadar air dan kerapatan bambu dihitung berdasarkan persamaan (1) dan (2). Dari hasil pengujian sifat fisik diketahui kadar air pada daerah nodia lebih tinggi daripada kadar air pada daerah internodia untuk masing-masing kondisi baik dengan pengawetan dan tanpa pengawetan. Nilai kadar air bambu bila dibandingkan dengan pengawetan dan tanpa pengawetan mengalami peningkatan pada bambu dengan pengawetan dengan besaran nilai kenaikan 1,22% pada daerah nodia dan 2,76 % pada daerah internodia.
Nilai kerapatan bambu pada daerah nodia lebih besar dari kerapatan bambu pada daerah internodia untuk masing-masing kondisi dengan pengawetan maupun tanpa pengawetan. Nilai kerapatan bambu bila dibandingkan dengan pengawetan dan tanpa pengawetan mengalami peningkatan pada bambu dengan pengawetan dengan besaran nilai kenaikan 8,33% pada daerah nodia dan 11,36% pada daerah internodia. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis diketahui bahwa pengawetan mempengaruhi kerapatan bambu dimana bambu dengan pengawetan mempunyai kerapatan yang lebih tinggi dari pada bambu tanpa diawetkan terlebih dahulu.

3.2 Kuat Geser Bambu Petung

Pengujian kuat geser sejajar serat pada Bambu Petung dilakukan untuk mengetahui kemampuan bahan menahan gaya akibat beban yang bekerja dan akibat pengawetan bambu. Pengujian dilakukan sampai beban maksimum (P_{ult}) sebagaimana disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian Kuat Geser Bambu

Hasil pengujian kuat geser sejajar serat dihitung berdasarkan persamaan (3), sedangkan hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rata-rata Kuat Geser Bambu Petung

Posisi pada batang bambu	Kuat Geser (MPa)		
	Tanpa pengawet	Dengan pengawet	Peningkatan kuat tekan (%)
Nodia	8,06	10,09	25,19
Internodia	7,41	9,50	28,21

Nilai kuat geser rata-rata untuk bambu yang diawetkan pada daerah nodia maupun daerah internodia sebagaimana yang disajikan pada Tabel 3 menunjukan adanya peningkatan. Nilai kuat geser rata-rata Bambu Petung pada daerah nodia atau ruas adalah sebesar 8,06 MPa untuk bambu yang tidak diawetkan sedangkan setelah dilakukan pengawetan nilai kuat geser rata-rata pada daerah nodia menjadi 10,09 MPa yaitu meningkat sebesar 25,19%. Peningkatan nilai kuat geser ini juga terjadi pada Bambu Petung pada daerah internodia atau antar ruas. Hasil analisis menunjukkan nilai rata-rata kuat geser Bambu Petung pada daerah internodia adalah sebesar 7,41 MPa dimana nilai rata-rata Bambu Petung untuk bambu yang diawetkan pada daerah internodia adalah sebesar 9,50 MPa atau meningkat sebesar 28,21%. Nilai kuat geser akibat dilakukannya pengawetan pada Bambu Petung baik pada daerah nodia maupun internodia mengalami peningkatan sebagaimana terjadi pada penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Masdar, dkk (2023) pada pengujian kuat tekan Bambu Petung yang diawetkan. Peningkatan yang terjadi pada daerah internodia lebih besar dari pada daerah nodia meskipun perbedaannya relatif kecil. Bentuk kerusakan pada benda uji kuat geser pada nodia dan internodia disajikan pada Gambar 5.



(a) Kerusakan pada bagian nodia (b) Kerusakan pada bagian internodia

Gambar 5. Kerusakan setelah dilakukan Pengujian Kuat Geser

Kerusakan yang terjadi pada bagian nodia adalah berupa retak-retak kecil yang terjadi karena gaya geser yang diterima oleh bambu terhalang oleh keberadaan nodia sehingga benda uji tidak terbelah. Berbeda dengan nodia kerusakan yang terjadi pada bagian internodia adalah retak vertikal searah serat yang diawali pada posisi beban sampai kebagian tumpuan. Kerusakan terjadi sampai bambu terbelah atau terpisah dari bagian lainnya. Pecahan yang terjadi sesuai dengan banyaknya posisi beban pada benda uji yaitu ada empat titik beban.
Berdasarkan perilaku kerusakan yang terjadi pada benda uji dapat diketahui keberadaan nodia dapat berpengaruh terhadap kerusakan geser bambu Petung.

4. KESIMPULAN

Pengawetan yang dilakukan pada bambu Petung berpengaruh terhadap kerapatan dan kuat geser bambu. Terjadi peningkatan kadar air dan kerapatan pada bambu Petung baik pada daerah nodia maupun pada daerah internodia pada bambu yang diawetkan bila dibandingkan dengan tanpa pengawetan. Kadar air pada bambu Petung mengalamai kenaikan sebesar 1,22% pada daerah nodia/ruas dan 2,76 % pada daerah internodia atau antar ruas. Kerapatan Bambu Petung mengalami kenaikan 8,33% pada daerah nodia dan 11,36% pada daerah internodia. Kuat geser pada Bambu Petung baik pada daerah nodia maupun pada daerah internodia masing masing sebesar 25,19% untuk daerah nodia dan pada daerah internodia atau antar ruas terjadi peningkatan kuat geser Bambu Petung sebesar 28,21%. Dapat disimpulkan bahwa selain untuk meningkatkan daya tahan bambu, proses pengawetan pada Bambu Petung dapat meningkatkan kekuatan geser Bambu Petung.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih atas pendanaan penelitian ini oleh Kementrian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi (Kemenristekdikti) Tahun Anggaran 2024 dan juga semua pihak-pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Irawati, IS., Saputra A., 2012, Analisis Statistik Sifat Mekanika bambu Petung. Simposium Nasional Rekayasa dan Budidaya Bambu (Sinar Bambu).UGM. Yogyakarta. pp. 60-65

Junnaidy, R., Masdar, A.D., Marta and Masdar, A., 2017, Penggunaan serat bambu pada campuran beton untuk meningkatkan daktalitas pada keruntuhan beton, seminar nasional strategi pengembangan infrastruktur ke-3 (SPI-3), 131-135.

Masdar, A., Pilko Sakiko, Ronny Junaidy, Anita Dewi Masdar, 2023, Pengaruh Pengawetan terhadap Kuat Geser Bambu Petung (Dendrocolamus Asper), Buletin Civil Engineering Vol.3 No.2, Agustus 2023, 1-6

Masdar, Suhendro., B, Siswosukarto, S., Sulistyo., J, 2014, Determinant of Critical Distance of Bolt on Bamboo Connection, *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, Volume 69:6, 111–115.

Masdar, A., Noviarti and Zufrimar, 2016, Penggunaan penghubung geser dari ranting bambu sebagai upaya untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan balok bambu susun, Jurnal Ipteks Terapan Research of Applied Science and Education V10.i1, 66-70

Masdar, A., Junnaidy, R., Miharti, I., dan Masdar, A. D., 2018 , Peningkatan kekuatan tarik beton berserat menggunakan serat bagian dalam bambu, Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 12, MT101-107

Masdar, A., Siswosukarto, S., Noviarti and Suryani, D., Implementation of Connection System of Wooden Plate and Wooden Clamp on Joint Model of Bamboo Truss Structure. International Journal of GEOMATE, Vol. 17, Issue 59, 2019, 15-20

Masdar, A., Noviarti, Suhendro, B, Siswosukarto, S and Joko Sulistyo, 2019, Elastic Behavior of Connection System with Addition of Wooden Clamp on Bamboo Truss Structure, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, 7(6S5), 999-1004.

Purwanto, D. 2011. Pembuatan Balok dan Papan dari Limbah Industri Kayu. Balai Riset dan Standarisasi Industri Banjarbaru. Jurnal Riset Industri. Vol. 5. 13-20

Widodo. 2012. Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan. Pustaka Belajar

APLIKASI METODE KEKAKUAN UNTUK MENGHITUNG DISTRIBUSI GAYA TIANG FONDASI DENGAN MODEL KEPALA TIANG KAKU

Yoyong Arfiadi[1*] dan Richard Frans[2]

[1]Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari no 44, Yogyakarta*
***e-mail**: yoyong.ar@uajy.ac.id*
[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang no 23, Makassar
e-mail: richardfrans.rf@gmail.com

ABSTRAK

Pada gedung bertingkat tinggi atau jembatan, umum digunakan fondasi tiang yang disatukan dengan kepala tiang (*pile cap*) untuk mendukung beban bangunan pada kolom tertentu. Jika beban yang bekerja, baik gaya aksial maupun momen, nilainya besar maka diperlukan lebih dari 1 tiang. Untuk menentukan kapasitas dan gaya yang dapat didukung oleh tiang, akibat gaya aksial dan momen dari struktur atas, dapat diturunkan berdasarkan prinsip-prinsip metode kekakuan. Hubungan antara perpindahan pada koordinat lokal dan global diperoleh dengan suatu matriks transformasi dengan menganggap kepala tiang (pur) sebagai elemen yang kaku. Selanjutnya dengan matriks transformasi ini, matriks kekakuan kelompok tiang dapat diperoleh dengan menganggap masing-masing mempunyai kekakuan pegas aksial sebagai kekakuan dalam sumbu lokal. Dengan anggapan ini maka hubungan antara gaya dan perpindahan global tiang dapat diperoleh, sehingga gaya-gaya pada masing-masing tiang akhirnya dapat ditentukan.

Kata kunci: gaya pada tiang, kelompok tiang, distribusi gaya, fondasi tiang, metode kekakuan.

1. PENDAHULUAN

Untuk menyalurkan beban yang besar dari struktur atas, pada kolom-kolom suatu bangunan gedung atau pilar suatu jembatan umumnya dipasang sejumlah fondasi tiang. Fondasi tiang tersebut jumlah dan susunannya ditentukan berdasarkan beban yang bekerja dan kekuatan tanah di mana struktur tersebut dibangun. Jumlah dan susunan tiang kemudian disatukan dengan pur atau kepala tiang (*pile cap*). Jika beban yang bekerja hanya beban aksial, maka gaya yang terjadi pada setiap tiang dapat dengan mudah diperoleh dengan membagi beban yang bekerja dengan jumlah tiang yang tersedia. Dalam hal ini gaya aksial yang didukung fondasi besarnya sama untuk semua tiang. Namun demikian, jika pada kolom atau pilar terdapat momen yang bekerja, maka tiang-tiang akan menerima gaya yang berbeda besarnya, tergantung letaknya dari kolom atau pilar di atasnya.

Untuk beban yang besar, fondasi tiang banyak digunakan untuk menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah dasar. Ahmed dkk. (2022) meneliti fondasi tiang dengan fondasi rakit yang berdiri di atas lempung lunak. Model numerik dilakukan dengan perangkat lunak Plaxis 3D. Evaluasi terhadap rasio jarak dan diameter tiang dilakukan dalam penelitian tersebut. Bralovic dkk. (2022) melakukan penelitian terhadap fondasi rakit-tiang pada tanah pasir lepas. Studi eksperimen dilakukan dengan mengamati rasio jarak tiang terhadap diameter dan rasio panjang tiang terhadap diameter tiang. Penelitian lain terkait fondasi tiang juga telah dilakukan oleh para peneliti seperti Xie dan Chi (2020), Ahmed dkk. (2021), Kannaujiya dan Srivastava (2022), Aruna dan Gowsa (2022), Yu dkk. (2019), dan Jamil dkk. (2022).

Dalam tulisan ini, distribusi gaya yang harus dipikul oleh masing-masing fondasi dari kelompok fondasi yang ada, dihitung berdasarkan prinsip-prinsip metode kekakuan. Prinsip-prinsip tersebut menyangkut hubungan antara perpindahan dan gaya yang bekerja pada sumbu lokal dan global. Kekakuan pada masing-masing fondasi tiang dapat dimodelkan sebagai pegas.

Salah satu prinsip pada metode matriks kekakuan adalah melakukan transformasi dari suatu koordinat (yang biasa disebut sebagai koordinat lokal) ke koordinat lain (yang biasa disebut sebagai koordinat global). Matriks transformasi dapat diperoleh dengan mengacu pada masalah yang akan diselesaikan. Selanjutnya persamaan-persamaan diselesaikan dengan mengacu pada koordinat global. Setelah perpindahan masing-masing tiang diperoleh, gaya yang bekerja pada tiang dapat dihitung dengan mengalikan kekakuan pegas dengan perpindahan tersebut.

.

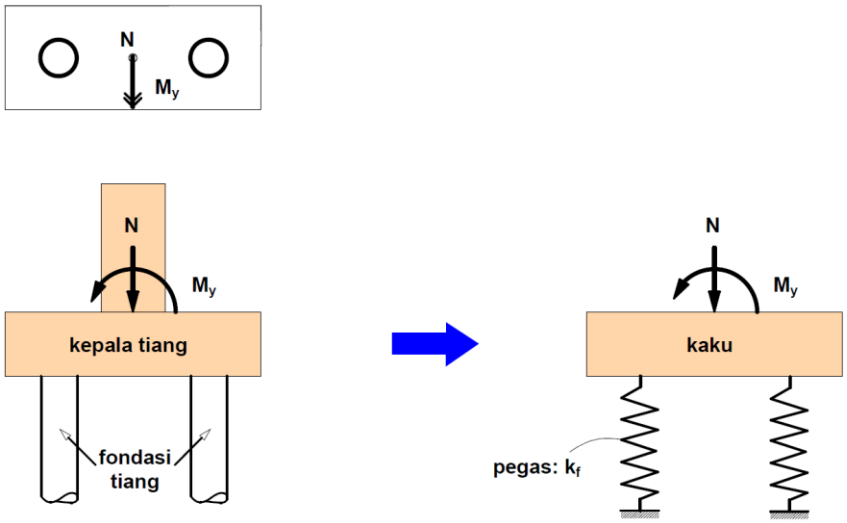
2. MODEL FONDASI DAN KEPALA TIANG

Pada suatu struktur, misal bangunan gedung atau jembatan, kolom gedung atau pilar jembatan umumnya mengalami gaya aksial dan momen. Jika gaya-gaya yang bekerja nilainya besar, maka diperlukan beberapa fondasi tiang yang disatukan dalam suatu kepala tiang (pur). Untuk menganalisis distribusi gaya pada masing-masing tiang, diambil anggapan sebagai berikut:

a) kepala tiang dianggap sebagai benda kaku, sehingga tidak terjadi deformasi lentur;

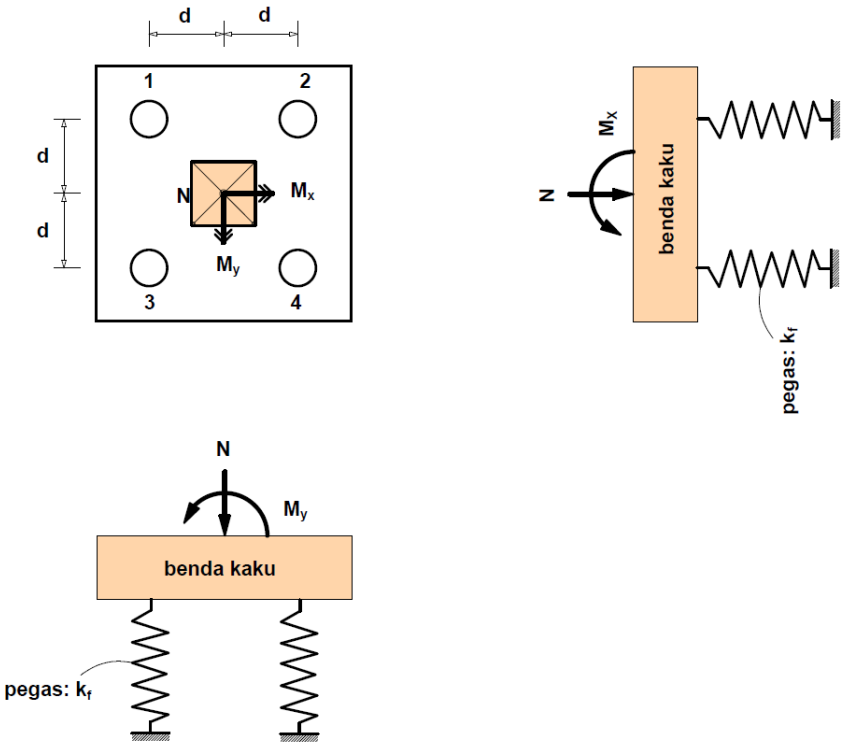
b) kekakuan masing-masing fondasi dinyatakan dengan suatu konstanta pegas.

Model fondasi dan kepala tiang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model analisis: kepala tiang kaku dan tiang sebagai pegas

Untuk model fondasi dengan momen pada kedua arah ditunjukkan pada Gambar 2. Dalam hal ini, kepala tiang mengalami momen pada arah-x dan arah-y seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



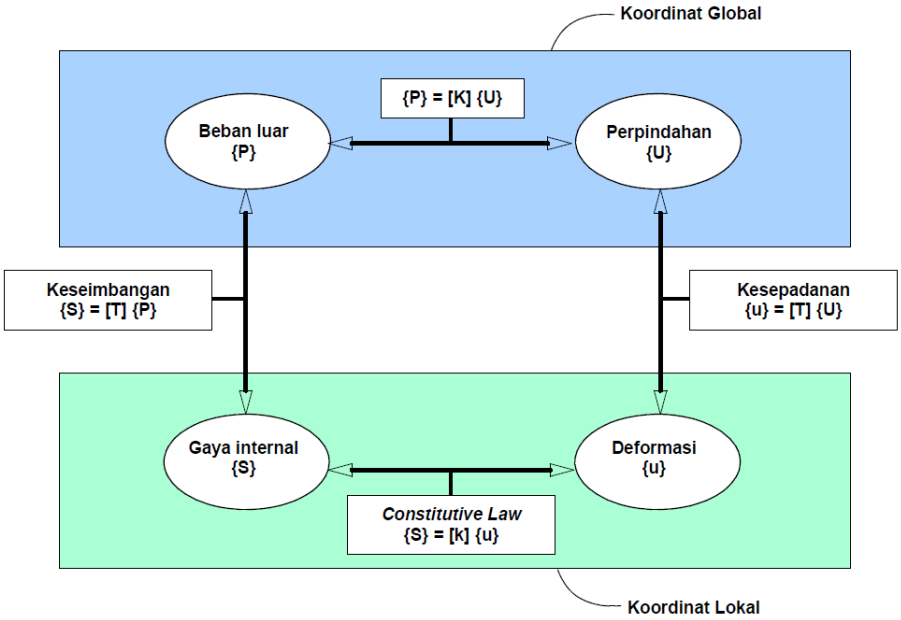
Gambar 2. Model analisis: kepala tiang kaku dan tiang sebagai pegas dengan momen 2 arah

Dengan anggapan ini, selanjutnya dapat diperoleh hubungan antara perpindahan pada pusat berat kepala tiang dengan

perpindahan pada masing-masing fondasi.

3. METODE KEKAKUAN DAN DERAJAT KEBEBASAN PADA KEPALA TIANG

Dalam tulisan ini metode kekakuan digunakan untuk menghitung distribusi gaya yang terjadi pada tiang fondasi dalam mendukung gaya aksial dan momen yang bekerja. Dalam metode kekakuan, hubungan variabel yang terlibat dapat ditunjukkan dengan Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan antar variabel dalam metode kekakuan

Hubungan antar variabel secara detail dapat dilihat dalam Arfiadi (2011) dan ditunjukkan sebagai berikut ini.

Hubungan antara gaya batang dan perpindahan dalam sumbu lokal ditunjukkan dengan:

$$\{S\} = [k]\{u\} \tag{1}$$

dengan $\{S\}$= vektor gaya internal, $[k]$ = matriks kekakuan dalam sumbu lokal, dan $\{u\}$ = perpindahan dalam sumbu lokal.

Hubungan antara perpindahan dalam sumbu lokal dan global dinyatakan dengan:

$$\{u\} = [T]\{U\} \tag{2}$$

dengan $\{U\}$ = perpindahan dalam sumbu global, dan $[T]$ = matriks transformasi.

Hubungan antara gaya pada sumbu lolak dan global, secara sama dapat dinyatakan dengan:

$$\{S\} = [T]\{P\} \tag{3a}$$

dengan $\{P\}$ = vektor beban luar. Mengingat matriks $[T]$ bersifat ortogonal, di mana transpose dari matriks $[T]$ sama dengan inversnya, maka persamaan (3a) dapat ditulis menjadi:

$$\{P\} = [T]^T\{S\} \tag{3b}$$

Selanjutnya dengan beberapa manipulasi seperti pada Arfiadi (2011), akan diperoleh hubungan antara matriks

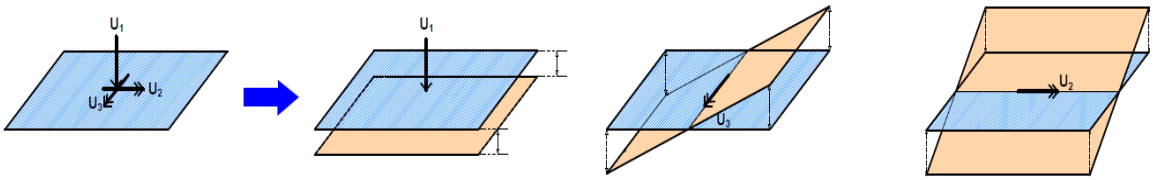
kekakuan pada sumbu global dengan perpindahan pada sumbu global melalui persamaan:

$$\{P\} = [K]\{U\} \tag{4}$$

dengan $[K]$ merupakan matriks kekakuan dalam sumbu global, menurut:

$$[K] = [T]^T[k][T] \tag{5}$$

Untuk menggunakan prinsip metode kekakuan, dengan anggapan pur (kepala tiang) sebagai elemen yang kaku dan gaya yang berasal dari kolom gedung atau pilar jembatan sebagai beban luar, maka derajat kebebasan pada kepala tiang dapat digambarkan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Derajat kebebasan pada kepala tiang yang dianggap kaku

Dengan derajat kebebasan pada kepala tiang yang dianggap kaku, hubungan antara perpindahan global (derajat kebebasan) dengan perpindahan lokal (pada masing-masing fondasi) dapat diperoleh. Dengan mengerjakan berturut-turut derajat kebebasan U_1, U_2 dan U_3, hubungan antara perpindahan tiang dengan $U_1 - U_3$, maka akan diperoleh matriks transformasi. Dengan diperolehnya matriks transformasi ini, maka hubungan antar variabel yang lain dapat ditentukan.

4. APLIKASI METODE KEKAKUAN PADA DISTRIBUSI GAYA FONDASI

Sebagai contoh ditinjau suatu kelompok tiang pancang yang disatukan dalam suatu pur (*pile cap*) seperti terlihat pada Gambar 5. Jumlah tiang ada 9 buah dengan jarak masing-masing tiang sama yaitu sebesar *d*. Gaya pada kolom terdiri dari gaya aksial N dan momen dalam dua sumbu M_x dan M_y. Dalam analisis, kepala tiang dianggap sebagai elemen yang kaku sehingga tidak berdeformasi. Kekakuan masing-masing fondasi ditunjukkan dengan suatu konstanta pegas k_f. Untuk sistem fondasi pada Gambar 5, matriks kekakuan dalam sumbu lokal dapat ditulis sebagai:

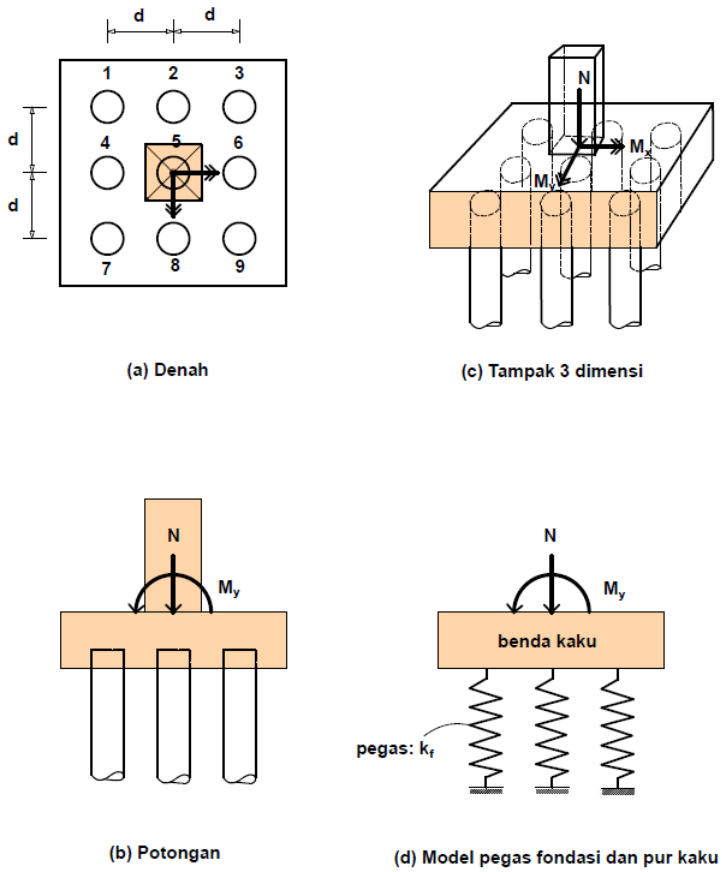
$$[k] = \begin{bmatrix} k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f \end{bmatrix} \tag{6}$$

Derajat kebebasan sistem fondasi ada 3 buah, yaitu U_1, U_2 dan U_3, yang bekerja dalam arah N, M_x dan M_y. Vektor perpindahan global (derajat kebebasan) dapat ditulis sebagai:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} \tag{7}$$

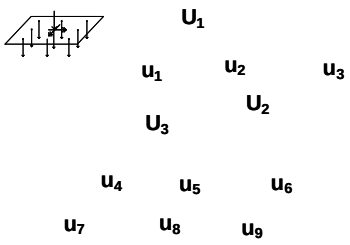
Sedangkan perpindahan lokal:

$$\{u\} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \quad u_6 \quad u_7 \quad u_8 \quad u_9]^T \tag{8}$$



Gambar 5. Model kepala tiang kaku

Untuk mendapatkan hubungan antara perpindahan global U_1 sampai dengan U_3 dan perpindahan lokal $u_1$sampai dengan u_9, dikerjakan masing-masing perpindahan global, lalu dicari hubungan antara perpindahan lokal dan global. Gambar 6 menunjukkan perpindahan global dan lokal.



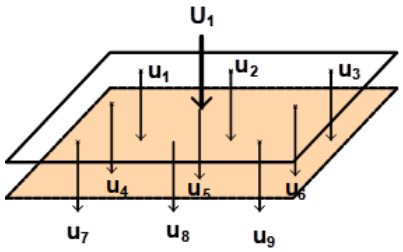
Gambar 6. Perpindahan global dan perpindahan lokal

Selanjutnya dikerjakan U_1 lalu dicari hubungan antara $u_1$sampai dengan u_9 dengan U_1, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

Oleh U_1pada Gambar 7:

$$u_1 = u_2 = \ldots = u_9 = U_1 \tag{9}$$

Hubungan ini menempati kolom pertama dari matriks transformasi.

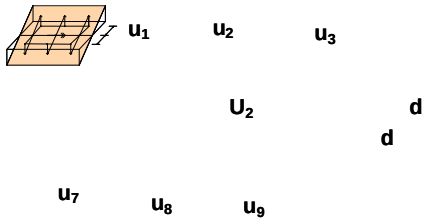


Gambar 7. Pengaruh U_1

Oleh pengaruh U_2 seperti ditunjukkan pada Gambar 8:

$$\begin{aligned} u_1 &= -U_2 d \\ u_2 &= -U_2 d \\ u_3 &= -U_2 d \\ u_4 &= 0 \\ u_5 &= 0 \\ u_6 &= 0 \\ u_7 &= U_2 d \\ u_8 &= U_2 d \\ u_9 &= U_2 d \end{aligned} \tag{10}$$

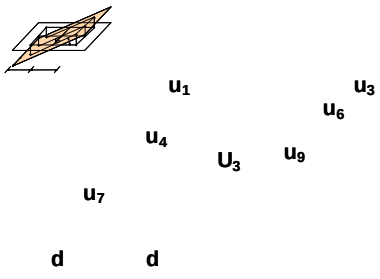
Hubungan ini menempati kolom ke-2 dari matriks transformasi.



Gambar 8. Pengaruh U_2

Oleh pengaruh U_3 seperti ditunjukkan pada Gambar 9:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_3 d \\ u_2 &= 0 \\ u_3 &= -U_3 d \\ u_4 &= U_3 d \\ u_5 &= 0 \\ u_6 &= -U_3 d \\ u_7 &= U_3 d \\ u_8 &= 0 \\ u_9 &= -U_3 d \end{aligned} \tag{11}$$



Gambar 9. Pengaruh U_3

Apabila pengaruh ini digabungkan, akan diperoleh hubungan antara perpindahan lokal dan global sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d & d \\ 1 & -d & 0 \\ 1 & -d & -d \\ 1 & 0 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -d \\ 1 & d & d \\ 1 & d & 0 \\ 1 & d & -d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} \tag{12}$$

Atau secara sederhana dapat ditulis sebagai:

$$\{u\} = [T]\{U\} \tag{13}$$

Dengan matriks transformasi $[T]$:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & -d & d \\ 1 & -d & 0 \\ 1 & -d & -d \\ 1 & 0 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -d \\ 1 & d & d \\ 1 & d & 0 \\ 1 & d & -d \end{bmatrix} \tag{14}$$

Dengan mengacu pada langkah-langkah dalam metode matriks kekakuan, matriks kekakuan dalam koordinat global dapat dihitung dengan

$$[K] = [T]^T[k][T]$$

sehingga diperoleh:

$$[K] = \begin{bmatrix} 9k_f & 0 & 0 \\ 0 & 6d^2k_f & 0 \\ 0 & 0 & 6d^2k_f \end{bmatrix} \tag{15}$$

Beban yang bekerja pada kepala tiang adalah:

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} \tag{16}$$

Perpindahan pada kepala tiang dapat dihitung dengan persamaan:

$$[K]\{U\} = \{P\}$$

$$\begin{bmatrix} 9k_f & 0 & 0 \\ 0 & 6d^2k_f & 0 \\ 0 & 0 & 6d^2k_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}$$

sehingga diperoleh:

$$\begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{N}{9k_f} \\ \dfrac{M_x}{6d^2k_f} \\ \dfrac{M_y}{6d^2k_f} \end{Bmatrix} \tag{17}$$

Perpindahan pada masing-masing tiang dapat dihitung dengan

$$\{u\} = [T]\{U\}$$

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d & d \\ 1 & -d & 0 \\ 1 & -d & -d \\ 1 & 0 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -d \\ 1 & d & d \\ 1 & d & 0 \\ 1 & d & -d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} + \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} - \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} + \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} - \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \end{Bmatrix} \tag{18}$$

Gaya-gaya yang terjadi pada masing-masing tiang dapat dihitung dengan:

$$\{S\} = [k]\{u\}$$

Dengan mensubstitusikan matriks kekakuan fodasi tiang dalam koordinat lokal dan perpindahan dalam sumbu lokal, diperoleh gaya pada masing0masing tiang sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{N}{9} - \frac{M_x}{6d} + \frac{M_y}{6d} \\ \frac{N}{9} - \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} - \frac{M_y}{6d} - \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_y}{6d} \\ \frac{N}{9} \\ \frac{N}{9} - \frac{M_y}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_y}{6d} + \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_x}{6d} - \frac{M_y}{6d} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

Persamaan dalam pustaka teknik fondasi, misal Bowles (1977), untuk gaya pada masing-masing tiang dari suatu kelompok tiang adalah:

$$S_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} \quad (20)$$

dengan n = jumlah tiang, x_i dan y_i adalah koordinat masing-masing fondasi, diukur dari pusat kepala tiang.

Apabila persamaan (19) dan persamaan (20) dibandingkan, terdapat kesesuaian hasil analisis.

5. KESIMPULAN

Dalam tulisan ini telah dibahas aplikasi metode kekakuan untuk menghitung gaya-gaya yang terjadi pada tiang dalam suatu kepala tiang. Kekakuan masing-masing tiang dimodelkan dengan suatu konstanta pegas. Untuk mendapatkan distribusi pada masing-masing tiang, kepala tiang dimodelkan sebagai elemen yang kaku. Hubungan antara derajat kebebasan pada pusat kepala tiang dengan perpindahan pada masing-masing tiang diperoleh dari geometri. Dari hubungan tersebut dapat ditentukan matriks kekakuan kelompok tiang dalam koordinat global. Selanjutnya dari hubungan antara gaya luar dan kekakuan dapat dihitung perpindahan pada pusat kepala tiang (pur), sehingga perpindahan dan gaya yang terjadi pada masing-masing tiang dapat dihitung. Persamaan yang diperoleh dibandingkan dengan persamaan yang ada dalam pustaka tentang fondasi tiang, dan mempunyai kesesuaian. Dari hasil analisis, dapat disimpulkan metode kekakuan dapat digunakan untuk menghitung distribusi gaya-gaya yang terjadi pada suatu tiang dalam kelompok.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, D., Taib, S.N.L., Ayadat, T, dan and Hasan, A. (2021). "A Review on the Behaviour of Combined Stone Columns and Pile Foundations in Soft Soils when Placed under Rigid Raft Foundation." ASM Science Journal 16 (July 15, 2021): 1–8. http://dx.doi.org/10.32802/asmscj.2021.709.

Ahmed, D., Taib, S.N.L., Ayadat, T, dan and Hasan, A. (2022). "Numerical Analysis of the Carrying Capacity of a Piled Raft Foundation in Soft Clayey Soils." Civil Engineering Journal 8, no. 4 , 622–36. http://dx.doi.org/10.28991/cej-2022-08-04-01

Arfiadi, Y. (2011). Analisis Struktur dengan Metode Matriks Kekakuan. Cahaya Atma Pustaka, Yogyakarta

Aruna, T., Raju, K. V. S. B. dan Gowda, S. (2022) "Experimental Investigation of piled raft foundation on Cohesionless Soil." International Journal of Research and Scientific Innovation 09, no. 02, 113–18. http://dx.doi.org/10.51244/ijrsi.2022.9207.

Bowles, J. E. (1977). Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.

Bralović, N., Despotović, I. dan Danijel Kukaras, D. (2022). "Experimental Analysis of the Behaviour of Piled Raft Foundations in Loose Sand." Applied Sciences 13, no. 1, 546. http://dx.doi.org/10.3390/app13010546.

Jamil, I., Ahmad, I.,Ullah, W.,Ahmad, W., Sabri, M.M.S. dan Majdi, A. (2022). "Experimental Study on Lateral and Vertical Capacity of Piled Raft and Pile Group System in Sandy Soil." Applied Sciences 12, no. 17 (September 2, 2022): 8853. http://dx.doi.org/10.3390/app12178853.

Kannaujiya, P. dan Srivastava, V.K. (2022). "Behavior of Different Configuration of Piled Raft Foundation for a High-Rise Building by using FEM." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1236, no. 1, 012006. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1236/1/012006.

Xie, Y, dan Chi, S. (2019), "Optimization Method for Irregular Piled Raft Foundation on Layered Soil Media." Advances in Civil Engineering 2019, 1–15. http://dx.doi.org/10.1155/2019/5713492

Xie, Y, dan Chi, S. (2020) "Optimization Method of Reducing the Differential Settlements of Piled Raft Foundations Based on Pile-to-Pile Interaction Theory." Advances in Civil Engineering 2020, 1–14. http://dx.doi.org/10.1155/2020/1521876.

Yu, E., Ren, S., Tang, H., Li, Y., dan Fang, C. (2019) "Improvement on Structural Forms of Pile Group Foundations of Deepwater Bridges." Shock and Vibration 2019, 1–15. http://dx.doi.org/10.1155/2019/7381852.

APLIKASI SELF HEALING MORTAR BERBASIS BAKTERI UREOLITIK MELALUI METODE PERENDAMAN

Stefani Rahmawati Fanesa Mangngi[1*], Remigildus Cornelis[2], Denik Sri Krisnayanti[3]

[1]Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto, Penfui, Kupang*
e-mail: faneshamangngi01@gmail.com

ABSTRAK

Mortar sering mengalami keretakan karena faktor alamiah maupun karena bahan yang digunakan tidak sesuai dengan standar yang ditetapkan. Terkait dengan hal tersebut, maka perlu dilakukan tindakan untuk mengatasi keretakan mortar. Salah satu cara yang dapat digunakan adalah memanfaatkan bakteri ureolitik untuk memulihkan keretakan mortar. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui *self healing* mortar dengan menggunakan mekanisme biomineralisasi *Bacillus subtilis*. Penelitian dilakukan dengan tahapan peremajaan bakteri, penyiapan suspensi bakteri dengan konsentrasi 3%, 6% dan 9%, pengujian bahan pembuat mortar, pembuatan mortar dengan ukuran 10x10x1 cm dan perendaman mortar dalam suspensi bakteri. Analisis *self healing* dilakukan secara deskriptif kualitatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi suspensi bakteri 9% dengan lama perendaman 28 hari efektif dalam memulihkan keretakan mortar.

Kata kunci: *self healing , Bacillus subtilis*, Biomineralisasi, kalsium karbonat

1. PENDAHULUAN

Teknologi pengembangan mortar dan beton saat ini telah mengalami kemajuan pesat. Pengembangan itu tidak hanya terbatas pada pemanfaatan bahan tambah (admixture) agar lebih cocok untuk pekerjaan tertentu atau untuk menghemat biaya (PT Additon Karya Sembada, 2020) tetapi sudah pada tahap biomineralisasi. Pada kondisi tertentu, campuran beton membutuhkan bahan tambah untuk mendukung performanya (Rahmat, dkk. 2016). Selanjutnya dijelaskan bahwa tujuan pemberian bahan tambah adalah untuk transformasi satu atau beberapa sifat beton ketika beton dalam keadaan segar atau sesudah mengeras. Transformasi sifat terkait mempercepat pengerasan, meningkatkan kuat tekan, mengurangi keretakan dan sebagainya. Ervianto, dkk. (2016) menegaskan bahwa penambahan zat *additive* untuk meningkatkan kuat tekan dan mengurangi pemakaian air. Disamping menggunakan bahan tambah kimia, pendekatan biomineralisasi dengan menggunakan bakteri sudah dikembangkan oleh sejumlah peneliti.

Biomineralisasi merupakan suatu pendekaatan *self healing* untuk memulihkan dan meningkatkan kekuatan mortar dan beton. Pada dasarnya peningkatan kekuatan dan pemulihan diri beton dapat terjadi karena adanya kristal $CaCO_3$ yang dihasilkan oleh bakteri ureolitik. Bakteri ureolitik adalah mikroba yang memiliki kemampuan untuk menguraikan senyawa urea dengan membebaskan $CaCO_3$. Peningkatan kekuatan berasal dari kemampuan bakteri dalam konversi nutrisi menjadi kalsium karbonat untuk memperbaiki keretakan pada mortar dan beton.

Penelitian tentang pemanfaatan bakteri dalam *self healing* sudah banyak dilakukan. De Muynck, dkk. (2008) menggunakan *Bacillus sphaericus* untuk mengkaji presipitasi karbonat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan mortar dengan sumber kalsium menghasilkan sejumlah lapisan tipis di permukaan mortar. Disamping terbentuk lapisan tipis kristal, juga terjadi peningkatan berat mortar karena adanya presipitat kalsit. Penelitian Jonkers, dkk. (2010) membuktikan bahwa penggunaan spora Bacillus yang dicampur langsung dengan material dapat menurunkan diameter pori beton. Penelitian tentang topik ini telah dilakukan, terutama berfokus pada efek penyembuhan diri dari keretakan (De Muynek, dkk, 2010 dan Wiktor, dkk., 2011), uji permeabilitas (Van Tittelboom, dkk. 2010 dan De Muynek, dkk., 2008), mekanisme mineralisasi Qian, dkk. 2009), dan optimalisasi nutrisi (Jonker, dkk., 2010). Hasil penelitian menunjukkan bahwa agen penyembuhan diri berbasis bakteri dapat meningkatkan kemampuan bahan semen untuk memperbaiki keretakan dan mengurangi kemungkinan pengikisan bahan melalui retakan ke dalam matriks, sehingga meningkatkan daya tahan mortar dan beton.

Pemulihan keretakan secara otonom menggunakan bakteri dan kapsul. Pada umumnya peneliti mencampur langsung spora bakteri dalam bentuk kapsul dengan material mortar atau beton dan juga melalui teknik injeksi. Pemulihan melalui perendaman lansung belum pernah dilakukan. Ada kekuatiran bahwa semen memiliki pH yang tinggi (alkalin) sehingga ketika dicampur langsung tanpa kapsul maupun melalui perendaman, bakteri ureolitik tidak akan mampu bertahan hidup. Pada penelitian ini digunakan *Bacillus subtilis*, namun demikian sebelum aplikasi bakteri ini terlebih dahulu dilakukan uji ketahanan bakteri terhadap pH basa (alkalin). Hasil uji memperlihatkan bahwa bakteri ini mengalami penurunan jumlah koloni pada pH 12, namun meningkat lagi jumlah sel pada pH 13. Hal ini yang menjadi pertimbangan bagi penulis untuk melakukan perendaman mortar dalam suspensi bakteri. Menurut peneliti, perendaman dalam suspensi bakteri lebih efektif karena kalsit yang dihasilkan oleh bakteri yang berada dalam suspensi bakteri maupun bakteri yang masuk dalam ke dalam pori mortar ataupun yang menempel di celah kerekaran akan

menutup pori mortar dan celah keretakan, sehingga tidak hanya memulihkan keretakan tetapi juga sekaligus meningkatkan kuat tekan mortar. Terkait dengan hal ini, maka yang perlu diperhatikan pada *self healing* adalah ketersediaan nutrien (urea dan senyawa yang mengandung kalsium lainnya) dan jenis bakteri yang tahan terhadap pH basa (bakteri alkalifil) dan kondisi lingkungan pertumbuhan bakteri. Disamping *Bacillus subtilis*, bakteri lain yang telah digunakan dalam self healing , seperti *Bacillus sphaericus, Bacillus megaterium* (Mohamed & Djamila, 2018). *Bacillus pasteurii, Bacillus sphaericus, Escherichia coli, Bacillus subtilis, Bacillus cohnii, Bacillus pseudofirmus, Bacillus halodurans, Bacillus cibi* (Orozco & Urbino, 2022).

Secara laboratoris pemanfaatan bakteri ini dapat meningkatkan kuat tekan dan memungkinkan pemulihan diri sendiri, namun demikian penelitian terkait *self healing* dan kuat tekan perlu dilakukan secara terus menerus untuk mendapatkan jenis bakteri yang secara genetis memiliki kemampuan ureolitik yang tinggi serta dari aspek biaya, pemanfaatan bakteri lebih murah dibandingkan dengan pemanfaatan bahan kimia sebagai *mixture additive*.

2. MATERI DAN METODE

2.1. Lokasi penelitian

Preparasi bakteri *Bacillus subtilis* dan uji sensitifitas terhadap pH alkalin dilakukan di Laboratorium Pendidikan Biologi. Peremajaan bakteri dengan menggunakan medium NA miring, Medium pertumbuhan bakteri (suspensi bakteri) terdiri dari 4 gram nutrient Broth, 20 gram Urea, dan 80 gram, pembuatan konsentrasi suspensi bakteri 3%, 6% dan 9%. Disamping itu dilakukan pengujian respon terhadap pH yang terdiri dari pH 10, 11, 12 dan 13 serta pengamatan *self healing* dan penentuan jumlah bakteri awal sebanyak 10^8 CFU berdasarkan standar MacFarland. Pengujian di Laboratorium Beton meliputi uji pendahuluan (Uji bahan dan nilai sebar mortar), pembuatan benda uji mortar dengan ukuran 10x10x1 cm, curing (perawatan), dan perendaman mortar.



Persiapan Konsentrasi Suspensi Bakteri



Konsentrasi Suspensi Bakteri 3%, 6%, dan 9%.

Gambar1. Konsentrasi suspensi bakteri bakteri 3%, 6% dan 9%

2.2. Pengujian bahan pembentuk mortar. Pengujian agregat halus dan semen berdasarkan standar acuan ASTM dan SNI (analisis saringan ASTM C 1336-06/SNI 03-1968-1990; berat jenis pasir dan penyerapan ASTM C 128-01/SNI 03-1970-1990; kadar lumpur agregat halus SNI 03-3976-1995; kadar air agregat halus SNI 03-1971-2011; spesifikasi standar untuk agregat halus ASTM C 33-03; kotoran organik dalam agregat halus SNI 03-2816-1992 dan berat jenis semen ASTM C 188-95. Pencampuran pasta semen berdasarkan ASTM C 305-6, Uji konsistensi normal pasta semen berdasakan ASTM 187-23, uji *setting time* pasta semen berdasarkan ASTM 191-08, pencampuran mortar berdasarkan ASTM C 305-06, uji flow mortar dengan flow table berdasarkan ASTM C 109/C 109M-99 dan uji kuat tekan berdasarkan ASTM C 579-01.

2.3. Desain penelitian. Desain penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap. Penelitian ini terdiri dari 2 faktor, yaitu konsentrasi supensi bakteri. Konsentrasi suspensi bakteri terdiri dari 3 level, yaitu. 3%, 6% dan 9% dan lama perendaman terdiri dari 7 hari, 14 hari dan 28 hari. Masing-masing unit kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali, sehingga total unit kombinasi perlakukan sebanyak 27 unit. Suspensi bakteri *Bacillus subtilis* dibuat dengan menyiapkan medium pertumbuhan bakteri yang terdiri dari 4 gram Nutrien Broth, 20 gram urea dan 80 gram kalsium laktat dalam 1 liter larutan. Ke dalam larutan ini ditambahkan 10 mL *Bacillus subtilis* dengan jumlah sel awal 10^8 CFU. Selanjutnya suspensi bakteri diencerkan menjadi 3%, 6% dan 9%. Suspensi bakteri ini digunakan untuk merendam mortar uji selama 7, 14 dan 28 hari.

2.4. Pembuatan mortar untuk analisis *self healing*. Bahan pembuatan mortar kotak 1 : 1 : 0,425 ukuran 10 x 10 x 1 cm dengan 3 variasi suspensi bakteri 3%, 6% dan 9% untuk pengamatan *self healing* pada mortar, disiapkan bahan pembuatan mortar kontrol yang terdiri dari 434 gram agregat halus, 434 gram semen dan 195,3 mL air.

Tabel 1. Mortar kotak 1 : 1 : 0,425 ukuran 10 x 10 x 1 cm
dan Variasi konsentrasi

Konsentrasi	Komposisi bahan		
	Semen (gr/cm^3)	Pasir (gr/cm^3)	Air (mL)
MK0%	347,2	347,2	156,40
MK3%	347,2	347,2	156,40
MK6%	347,2	347,2	156,40
MK9%	347,2	347,2	156,40
Total	1388,8	1388,8	625,60

Keterangan: MK 0% – 9% = variasi larutan bakteri

Pembuatan mortar kotak dilakukan dengan (1) mencampur bahan-bahan ini hingga homogen dengan menggunakan mesin moleng, (2) Setelah bercampur homogen dicetak dengan cetakan balok dengan ukuran 10 x 10 x 1,0 cm, (3) Selanjutnya dibiarkan hingga padat dan kering, kemudian direndam dalam wadah berisi suspensi bakteri selama 7 hari, 14 hari dan 28 hari.

2.5. Analisis data

Data hasil penelitian dianalisis secara deskriptif kualitatif. Data *self healing* dianalisis secara kualitatif dengan bantuan loup kaca pembesar (perbesaran 1000x). Pengamatan difokuskan pada penutupan keretakan. Keberhasilan *self healing* berdasarkan perbandingan lebar keretakan awal dan pemulihan keretakan atau terisinya keretakan mortar dengan kalsit.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

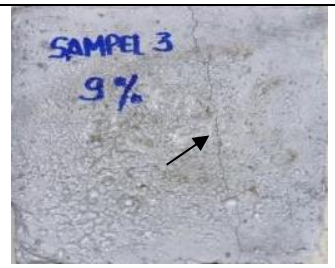
3.1. Hasil uji material pembentuk mortar

Hasil pengujian agregat halus menunjukkan bahwa agregat halus berada pada zona (agak kasar) sesuai dengan acuan syarat SNI-T-15-1990-03 dan memenuhi syarat untuk digunakan dalam pembuatan mortar. Agregat halus melewati saringan zona 2 dan berada diantara zona 1 – 4. Hasil pengujian modulus kehalusan agregat halus adalah 2,87 dan berada diantara 2,3-3,1, memenuhi syarat untuk digunakan dalam pembuatan mortar berdasarkan standar ASTM C 33-03. Sementara itu, berat jenis jenuh kering permukaan agregat halus sebessar 2,48 gram/cm^3 memenuhi standar untuk digunakan sesuai dengan SNI 03-1970-2008. Nilai pengukuran berada diantara 2,57-2,7. Pada pengukuran penyerapan agregat halus diperoleh nilai penyerapan sebesar 4,91% dan nilai ini memenuhi syarat acuan SNI 03-1970-2008. Kadar lumpur agregat halus juga memenuhi syarat sesuai dengan ASTM C 117-13 dan PBI 1971. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar lumpur agregat halus sebesar 4,67% lebih kecil dari yang dipersyaratkan yakni 5%. Pada pengukuran kadar air agregat halus dan berat jenis semen, kedua komponen ini memenuhi syarat untuk digunakan dalam pembuatan mortar. Kadar air agregat halus sebesar 1,87% sesuai dengan SNI 03-1971-2011 dan berat jenis semen sesuai dengan ASTM C 188-05. Berdasarkan hasil pengujian agregat halus dan jenis semen maka disimpulkan bahwa kedua komponen ini memenuhi syarat untuk digunakan dalam pembuatan mortar.

3.2. *Self healing* mortar

Hasil perendaman mortar kotak selama 7 hari, 14 hari dan 28 hari ditampilkan dalam gambar 2 di bawah ini. Pada gambar 2 terlihat bahwa sebelum dilakukan perendaman, celah retakan lebih lebar (ditunjukkan oleh anak panah) namun setelah direndam dalam suspensi bakteri celah retakan tertutup pada titik tertentu. Tertutupnya celah retakan ini karena adanya deposit kalsium karbonat yang hasilkan oleh *Bacillus subtilis*. Pengamatan celah mortar ini dilakukan dengan bantuan loup atau kaca pembesar dengan perbesaran 1000 kali. Konsentrasi suspensi bakteri 9% dengan lama perendaman 28 hari jauh lebih efektif dalam memulihkan keretakan mortar dibandingkan dengan konsentrasi 3% dan 6% dengan lama perendaman, masing-masing 7 hari dan 14 hari.

Self healing merupakan kemampuan mortar untuk memulihkan diri sendiri ketika mengalami keretakan. *Self healing* dapat terjadi secara alamiah dan melalui bantuan mikroorganisme. Pada penelitian ini *self healing* dilakukan dengan menggunakan bantuan *Bacillus subtilis*. *Self healing* mortar ini dapat terjadi karena di dalam suspensi bakteri terdapat senyawa urea dan kalsium laktat. Kedua senyawa ini merupakan sumber kalsium. *Bacillus subtilis* merupakan bakteri ureolitik alkalifilik. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk menguraikan urea dan kalsium laktat dengan membebaskan atau menghasilkan $CaCO_3$ (kalsit). Kristal-kristal $CaCO_3$ akan mengendap mengisi pori-pori mortar kotak dan terdeposit diantara celah mortar dan berikatan dengan material lain dalam mortar. Seiring dengan waktu perendaman, deposit kalsium karbonat semakin banyak dan mengisi celah tertentu hingga penuh oleh deposit kalsit.



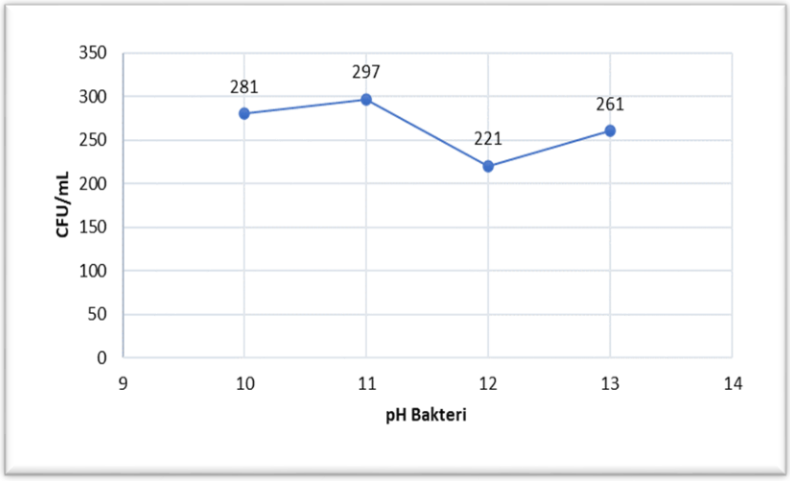
Sebelum direndam



Setelah direndam 28 hari

Gambar 2. *Self healing* mortar setelah direndam selama 28 hari

Disamping ureolitik, *Bacillus subtilis* juga merupakan bakteri yang mampu bertahan pada pH 13. Semakin banyak kalsit yang terbentuk, maka semakin tinggi nilai pH suspensi bakteri. Hasil uji respon *Bacillus subtilis* terhadap pH membuktikan bahwa pada pH 12 terjadi penurunan jumlah sel bakteri dari 297 CFU menjadi 221 CFU, namun demikian bakteri ini mampu beradaptasi pada pH tinggi sehingga jumlah sel meningkat menjadi 261 CFU pada pH 13. Hasil pengujian ini membuktikan bahwa *Bacillus subtilis* mampu hidup pada pH alkalin yang ekstrim.



Gambar 3. Grafik jumlah sel bakteri pada pH yang berbeda

Pada penelitian ini, substrat masuk ke dalam retakan mengalami biomineralisasi oleh bakteri melalui serangkaian reaksi biokimia menghasilkan endapan kapur untuk *self healing* mortar. Hasil penelitian ini membuktikan bahwa agen pemulihan berbasis *Bacillus subtilis* dapat meningkatkan kemampuan mortar untuk memperbaiki diri. Kemampuan *Bacillus subtilis* dalam menguraikan urea karena bakteri ini memiliki enzim urease. Enzim ini mengkatalis reaksi katabolime urea menjadi kalsium karbonat. Jonkers, dkk., (2010) menjelaskan bahwa pembentukan kalsium karbonat merupakan merupakan proses hidrolisis enzimatis urea yang dilakukan oleh bakteri menjadi amonia dan karbon dioksida. Pada gambar 2 jelas terlihat bahwa pada umur rendaman hari ke-28 jalur retakan sudah tertutup dengan endapan kalsit. Penelitian sejenis ini juga dilakukan Van Tittelboom, (2018), *self-healing* retak pada mortar menggunakan *Bacillus subtilis*, *Bacillus sphaericu*s, dan *Bacillus megaterium* (Stanaszek-Tomal. 2020), penggunaan *Bacillus pasteurii, Bacillus sphaericus, Escherichia coli, Bacillus subtilis, Bacillus cohnii, Bacillus pseudofirmus, Bacillus halodurans* untuk pemulihan diri sendiri semen (Kordas, 2023). Penelitian-penelitian yang dilakukan ini memperlihatkan bahwa keretakan beton maupun mortar dapat dipulihkan dengan menggunakan bakteri ureolitik. Al-Tabbaa, dkk., (2019) juga menjelaskan bahwa bakteri yang ditambahkan ke campuran mortar menguraikan kalsium laktat menjadi $CaCO_3$. Penguraian urea dan kalsium laktat yang dilakukan oleh *Bacillus subtilis* dengan menggunakan enzim urease adalah untuk memenuhi kebutuhan nitrogen dan energi.

Kordas, (2023) mengemukakan bahwa terdapat 5 tahap pembentukan kalsium karbonat. Tahap kelima dari reaksi pembentukan kalsium karbonat adalah reaksi antara ion kalsium dengan ion karbonat dengan menghasilkan kalsium karbonat. Kordas, (2023) dan Yamasamit, dkk., (2023) mengemukakan tahap kelima pembentukan kalsium karbonat sebagai berikut:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3 \quad (1)$$

Dalam suspensi bakteri, selain urea juga terdapat kalsium laktat. Biomineralisasi kalsium laktat menjadi kalsium karbonat difasilitasi oleh *Bacillus subtilis*. Keberadaan kalsium laktat merangsang bakteri untuk memproduksi enzim ekstraseluler untuk mengkatalis biomineralisasi kalsium laktat menjadi kalsium karbonat. Reaksi pembentukan

kalsium karbonat menurut Jankers, dkk., (2010) sebagai berikut:

$$CaC_6H_{10}O_6 + 6CO_2 \rightarrow CaCO_3 + 5H_2O + 5CO_2 \quad (2)$$

Bacillus subtilis dapat mempengaruhi pengendapan kalsium karbonat dengan bertindak sebagai pusat nukleasi atau memperkayanya dengan Ca^{2+} (De Belie, W. dkk., 2010). Permukaan sel *Bacillus subtilis* memiliki gugus bermuatan negatif seperti ion CO_3^{2-} sehingga dapat berikatan dengan ion bermuatan positif seperti Ca^{2+} pada pH netral.

Mekanisme pemulihan keretakan ini lebih disukai dibandingkan dengan metode pemulihan diri yang lain karena dianggap sebagai proses alamiah yang ramah lingkungan. Berdasarkan fungsinya, Orozco dan Urbino (2022) menjelaskan bahwa bakteri dalam beton/mortar tidak hanya berfungsi untuk memperbaiki retakan tetapi juga meningkatkan kinerja mekanik, seperti kuat tekan dan tarik beton/mortar. Fungsi lain dari keberadaan bakteri dalam mortar adalah untuk mengurangi CO_2. Keberadaan CO_2 dalam jumlah yang berlebih memberikan kontribusi terhadap peningkatan nilai pH. Peningkatan nilai pH yang berlebihan juga akan mempengaruhi aktivitas bakteri dalam produksi $CaCO_3$ dan pada akhirnya mempengaruhi *self healing* mortar.

3.3. Implikasi penelitian terhadap pengembangan mortar dan beton

Hasil penelitian membuktikan bahwa *self healing* keretakan pada mortar dapat dipulihkan dengan menggunakan *Bacillus subtilis* dengan menambahkan urea dan kalsium laktat ke dalam suspensi bakteri. Hasil penelitian ini juga memperlihatkan bahwa pendekatan perendaman mortar yang retak dalam suspensi *Bacillus subtilis* mampu memulihkan keretakan mortar uji. Kemampuan memulihkan keretakan ini karena deposit kalsium karbonat masuk ke dalam jalur retakan. Hal ini berarti kristal kalsit juga akan mampu mengisi pori mortar dan beton. Dengan demikian, *Bacillus subtilis* tidak hanya memfasilitasi pemulihan diri sendiri atau *self healing*, akan tetapi kehadiran bakteri ini juga dapat meningkatkan kuat tekan mortar dan beton. Oleh karena itu maka bakteri ureolitik ini dapat dimanfaatkan untuk memelihara dan memulihkan keretakan mortar dan beton serta dapat digunakan untuk meningkatkan kuat tekan mortar dan beton melalui perendaman dalam suspensi bakteri ureolitik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka disimpulkan bahwa semua material yang digunakan untuk membuat mortar balok telah diuji dan memenuhi syarat untuk digunakan dalam pembuatan mortar. Keretakan mortar dapat dipulihkan dengan menggunakan *Bacillus subtilis* dengan media yang mengandung urea dan kalsium laktat. Perendaman selama 28 hari lebih efektif dalam memulihkan keretakan mortar. Perendaman mortar dalam suspensi bakteri ureolitik merupakan pendekatan baru dalam *self healing* mortar.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM C 109/ C 109M-20 : 2007 – Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50-mm] Cube Specimens).
ASTM C 117-13 : 2013 – Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregate by Washing.
ASTM C 128-01 : 2001 – Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
ASTM C 136-06 : 2006 – Standard test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
ASTM C 187-23 : 2004 – Standard Test Method for Amount of water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste.
ASTM C 188-95 : 2003 – Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.
ASTM C 191-08 : 2008 – Standard test Methods for Time of Setting of Hydraulic cement by Vicat Needle.
ASTM C 33-03 : 2003 – Standard Specification for Concrete Aggregates.
ASTM C 305-06 : 2006 – Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.
ASTM C 579-01 : 2001 – Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic, Surfacings and Polymer Concretes.
SNI 03-1968-1990 – Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan.
SNI 03-1970-2008 – Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus.
SNI 03-1971-2011 – Metode Pengujian Kadar Air Total Agregat dengan Pengeringan.
SNI 03-2816-2014 – Metode Uji Bahan Organik dalam Agregat Halus Untuk Beton.
SNI 03-3976-1995 – Tata Cara Pengadukan dan Pengecoran Beton.
Al-Tabbaa, A., Chrysoula Litina, Petros Giannaros, Antonios Kanellopoulos, Livia Souza. 2019. First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. Construction and Building Materials 208: 669–685.
De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J. M., Jonkers, H. M. (2018). A Review of Self-Healing Concrete for Damage

Management of Structures. In Advanced Materials Interfaces (Vol. 5, Issue 17). Wiley-VCH Verlag. https://doi.org/10.1002/admi.201800074

De Muynck, Willem., Nele. De Belie, Willy. Verstraete. 2010. Microbial carbonate precipitation in construction materialsa review, Ecol. Eng. 36: 118–136.

De Muynck, W., D. Debrouwer, N. De Belie, et al.,2008. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials, Cem. Concr. Res. 38 (7): 1005–1014.

Ervianto, Moch., Fadillawaty Saleh, Hakas Prayuda Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Menggunakan Bahan Tambah Abut Terbang (Fly Ash) Dan Zat Adiktif (Bestmittel). Sinergi, 20 (3): 199-206

Jonkers, H. M., Mors, R. M., Sierra-Beltran, M. G., & Wiktor, V. (2016). Biotech solutions for concrete repair with enhanced durability. In Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials (pp. 253–271). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100214-8.00012-9

Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological Engineering, 36(2), 230–235. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036

Kordas, G. (2023). Self-Healing Cement: A Review. Nanomanufacturing, 3(3), 326–346. https://doi.org/10.3390/nanomanufacturing3030021

Mohamed, G., & Djamila, B. (2018). Physical and mechanical properties of cement mortar made with brick waste. MATEC Web of Conferences, 149, 01077. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901077

Orozco, C. R., & Urbino, I. J. A. (2022). Self-Healing of Cracks in Concrete using Bacillus cibi with Different Encapsulation Techniques. Journal of Engineering and Technological Sciences, 54(3). https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.3.5

PT Aditon Karya Sembada. 2020. Bahan Tambah Untuk Beton. https://additon.co.id/bahan-tambah-untuk-beton/

Qian, C.X., J.Y. Wang, R.X. Wang, L. Cheng, 2009. Corrosion protection of cement based building materials by surface deposition of CaCO3 by Bacillus pasteurii, Mater. Sci. Eng. C. 29:1273–1280.

Rahmat, Irna Hendriyani, Moh. Syaiful. 2016. Analisis Kuat Tekan Beton Dengan Bahan Tambah Reduced Water Dan Accelerated Admixture Anwarinfo. Info Teknik, 17 (2): 205-218.

Stanaszek-Tomal, El˙ zbieta. 2020. Bacterial Concrete as a Sustainable Building Material?. Sustainability, 12(2): 1-13, 696; https://doi.org/10.3390/su12020696

Van Tittelboom, K., Van den Heede, P., & De Belie, N. D. 2018. Self-healing concrete with encapsulated polyurethane. In Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures (pp. 429–466). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102181-1.00016-2

Van Tittelboom, Kim.., Nele. De Belie, Willem. De Muynck, et al., 2010. Use of bacterial to repair cracks in concrete, Cem. Concr. Res. 40:157–166

Wiktor, Virginie., Henk.M. Jonkers. 2011. Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete, Cem. Concr. Compos. 33 (7):763 - 770.

Yamasamit, N., Sangkeaw, P., Jitchaijaroen, W., Thongchom, C., Keawsawasvong, S., & Kamchoom, V. (2023). Effect of Bacillus subtilis on mechanical and self-healing properties in mortar with different crack widths and curing conditions. Scientific Reports, 13(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-34837-x

DETEKSI KERUSAKAN PADA STRUKTUR RANGKA BATANG RUANG DENGAN MENGGUNAKAN *BINARY BAT ALGORITHM* DAN *EUCLIDEAN DISTANCE* SEBAGAI FUNGSI OBYEKTIF

Richard Frans[1*] dan Yoyong Arfiadi[2]

[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang No. 23, Makassar*
***e-mail**: richardfrans.rf@gmail.com*
[2] Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta
e-mail: yoyong.ar@uajy.ac.id

ABSTRAK

Deteksi kerusakan merupakan salah satu tahapan penting dari suatu sistem monitoring kerusakan struktur (*structural health monitoring system*). Resiko kerusakan bahkan keruntuhan dapat dihindari dengan melakukan deteksi kerusakan secara berkala, selain itu, perawatan (*maintenance*) dan penanganan dapat dilakukan dengan efektif. Terdapat berbagai metode yang telah diusulkan untuk mendeteksi kerusakan dari metode statik hingga perilaku dinamik dari struktur. Penelitian ini membahas suatu metode untuk mendeteksi kerusakan elemen/batang pada struktur rangka batang ruang berdasarkan salah satu kriteria/perilaku dinamik dari struktur, yaitu frekuensi natural dari struktur. Metode ini menggabungkan antara algoritma optimasi, yaitu *binary bat algorithm* dan *euclidean distance* sebagai fungsi obyektif, dimana perhitungan *euclidean distance* berdasarkan pada selisih frekuensi natural struktur analisis dan frekuensi natural struktur aktual (kondisi mengalami kerusakan). Struktur rangka batang ruang yang ditinjau adalah struktur rangka batang ruang dengan 32 elemen/batang dengan berbagai skenario kerusakan, mulai dari scenario kerusakan tunggal, ganda hingga kerusakan pada berbagai elemen/batang. Selain itu, pada penelitian ini, nilai biner digunakan untuk merepresentasikan ada atau tidaknya kerusakan pada masing-masing elemen. Berdasarkan hasil yang didapatkan, metode yang diusulkan dapat dengan akurat memprediksi elemen/batang yang mengalami kerusakan untuk berbagai skenario kerusakan dengan iterasi yang kurang dari 100. Hal ini menunjukkan tingkat keefektifan dari algoritma BBA untuk mendapatkan solusi yang optimum secara konvergen.

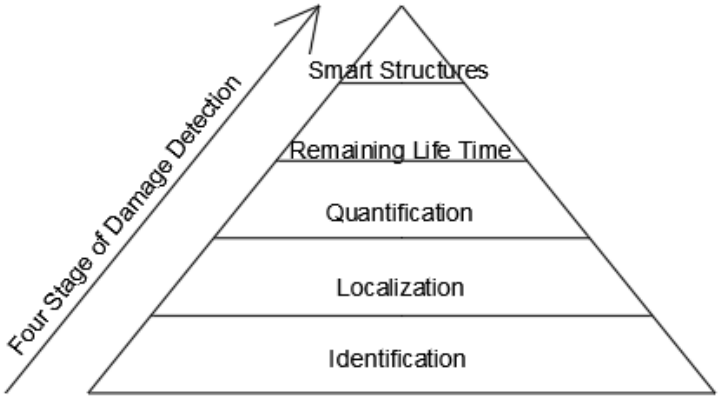
Kata kunci: deteksi kerusakan, struktur rangka batang ruang, *binary bat algorithm*, *euclidean distance*.

1. PENDAHULUAN

Sistem monitoring kesehatan struktur didefinisikan sebagai “proses untuk menerapkan identifikasi kerusakan pada bidang *aerospace*, sipil, serta mekanikal infrastruktur. Proses ini meliputi pengamatan struktur dari waktu ke waktu menggunakan pengukuran berkala. Hasil ekstraksi pada proses ini akan dianalisis untuk menentukan kondisi kesehatan pada struktur tersebut (Wilson et al, 2018). Penjaminan fungsi yang optimal dari semua komponen dalam suatu struktur adalah hal yang sangat penting bagi para perancang dan pengguna. Dalam banyak situasi, pemantauan yang berkelanjutan dapat mengidentifikasi kerusakan pada tahap awal serta menghindari kemungkinan kerusakan, kecelakaan, dan bencana yang disebabkan oleh pemeriksaan yang kurang memadai atau kerusakan dalam proses evaluasi (Burgos et al, 2020). Salah satu tahapan dalam suatu sistem monitoring kesehatan struktur adalah deteksi elemen yang mengalami kerusakan (*damage*). Menurut Sohn dan Farrar (2001), kerusakan didefinisikan sebagai perubahan properti elemen baik secara material maupun geometrik pada suatu sistem struktur termasuk perubahan *boundary condition* dan sistem sambungan, yang berdampak negatif pada kinerja dari sistem struktur. Secara umum, terdapat 4 (empat) tingkatan dalam mendeteksi kerusakan struktur menurut Rytter (1993), yaitu:

1. Tingkat pertama, mendeteksi apakah terjadi kerusakan pada struktur tersebut (*damage identification*). Hal ini biasanya ditandai dari perubahan perilaku struktur yang tidak teratur dimana dalam kondisi tertentu dapat diartikan sebagai kemungkinan kerusakan.
2. Tingkat kedua, menentukan lokasi kerusakan pada struktur tersebut secara lokal (*damage localization*). Elemen/bagian yang mengalami kerusakan ditentukan dengan menggunakan beberapa metode yang telah dikembangkan sesuai dengan informasi yang didapatkan.
3. Tingkat ketiga, menentukan tingkat kerusakan/klasifikasi kerusakan pada elemen tersebut (da*mage quantification*). Pada tingkat ini, kuantifikasi penurunan/perubahan material/geometrik pada elemen/bagian yang mengalami kerusakan akan dilakukan pada tingkatan ini. Luaran dari tingkat ketiga ini adalah penurunan kekakuan/kekuatan/performa pada elemen/bagian yang mengalami kerusakan.

4. Tingkat keempat, menentukan sisa layan dari elemen/bagian yang mengalami kerusakan (*remaining life time*).



Gambar 1. Tingkat deteksi kerusakan (Burgos et al, 2020)

Pada penelitian ini, suatu metode tingkat dua diusulkan untuk mendeteksi kerusakan elemen dari suatu struktur rangka batang ruang. Konsep dari metode ini adalah dengan mengombinasikan algoritma optimasi dan membandingkan vektor frekuensi natural struktur analisis dan frekuensi natural struktur aktual. Frekuensi natural struktur analisis didapatkan berdasarkan data kekakuan dari elemen yang dikalikan dengan faktor penurunan kekakuan sedangkan frekuensi natural struktur aktual adalah frekeunsi natural struktur dalam kondisi mengalami kerusakan. Untuk menentukan selisih kedua vektor frekuensi ini, digunakan nilai *euclidean distance* sebagai fungsi ojektif.

2. *BINARY BAT ALGORITHM* (BBA)

Bat algorithm pertama kali diperkenalkan oleh Yang (2010). Algoritma ini terinspirasi oleh cara kelelawar menggunakan "*echolocation*". Menurut Mirjalili, Mirjalili, dan Yang (2013), bat algorithm ini dianggap lebih efektif dibandingkan dengan algoritma lain, seperti algoritma genetika dan *particle swarm optimization*. Persamaan umum yang diterapkan dalam *bat algorithm* menurut Yang (2010) adalah sebagai berikut

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \tag{1}$$

$$\boldsymbol{v}_i^{t+1} = \boldsymbol{v}_i^t + (\boldsymbol{x}_i^t - \boldsymbol{x}_*)f_i \tag{2}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{t+1} = \boldsymbol{x}_i^t + \boldsymbol{v}_i^{t+1} \tag{3}$$

dimana f adalah frekuensi, β adalah angka acak dari 0 sampai 1, $\boldsymbol{v}$ adalah vektor kecepatan, $\boldsymbol{x}$ adalah vektor posisi serta $\boldsymbol{x}_*$ adalah lokasi global terbaik pada iterasi tersebut. Selain menggunakan persamaan (1), (2), dan (3), terdapat persamaan tambahan untuk memperbarui lokasi lokal dari kelelawar tersebut, yaitu

$$\boldsymbol{x}_{new} = \boldsymbol{x}_{old} + \varepsilon A^t \tag{4}$$

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \tag{5}$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0[1 - \exp(-\gamma t)] \tag{6}$$

dimana: A_i adalah *loudness*, r_i adalah *rate of pulse emission*, γ dan α adalah konstanta (biasanya diambil $\gamma = \alpha$)

Persamaan (1) hingga (6) diterapkan untuk mengatasi masalah yang bersifat kontinu dengan variabel riil,

sedangkan dalam kasus ini, variabel yang digunakan adalah variabel biner. Oleh karena itu, persamaan (1) hingga (6) dimodifikasi agar dapat diterapkan pada optimasi dengan variabel biner. Mirjalili, Mirjalili, dan Yang (2014) melakukan modifikasi pada *bat algorithm* yang awalnya dirancang untuk variabel riil, sehingga menjadi alat optimasi untuk variabel biner yang dikenal sebagai *binary bat algorithm* (BBA). Teori ini menggunakan fungsi transfer berbentuk v (*v-shaped transfer function*). Persamaan yang digunakan untuk memperbarui posisi dan kecepatan mengikuti persamaan (7) dan (8).

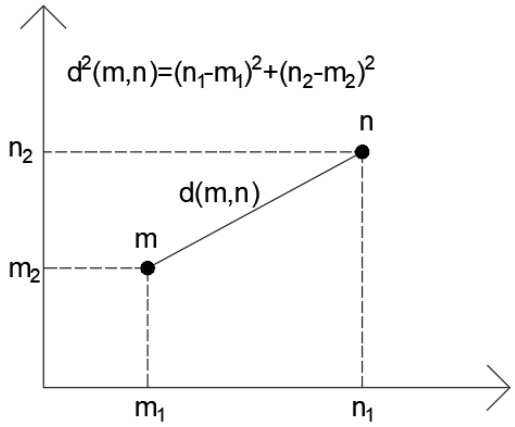
$$V\left(v_i^k(t)\right) = \left|\frac{2}{\pi} arctan\left(\frac{\pi}{2}\right) v_i^k(t)\right| \tag{7}$$

$$x_i^k(t) = \begin{cases} \left(x_i^k(t)\right)^{-1}, & if\ rand < V\left(v_i^k(t)\right) \\ x_i^k(t), & rand \geq V\left(v_i^k(t)\right) \end{cases} \tag{8}$$

dimana: $x_i^k(t)$ dan $v_i^k(t)$ masing-masing dalah posisi dan kecepatan kelelawar ke-*i* pada iterasi *t* pada dimensi ke-*k*, dan $\left(x_i^k(t)\right)^{-1}$ adalah komplemen dari $x_i^k(t)$.

3. *EUCLIDEAN DISTANCE*

Euclidean distance atau yang biasa disebut sebagai jarak Euclidean didefinisikan sebagai jarak antara dua buah titik. Jarak ini juga sering disebut sebagai jarak Phytagoras dikarenakan persamaan yang digunakan sama dengan rumus Pyhtagoras. Gambar 2 menunjukkan ilustrasi untuk menentukan jarak Euclidean. Penerapan konsep jarak Euclidean telah digunakan dalam berbagai bidang keilmuan seperti kesehatan, industri, sains, teknik, olah citra, dan lain sebagainya (Sekarrini, et al, 2020; Jannah dan Humaira, 2019; Nabilla, et al, 2023; Dokmanic, et al, 2015).



Gambar 2. Ilustrasi penentuan jarak Euclidean

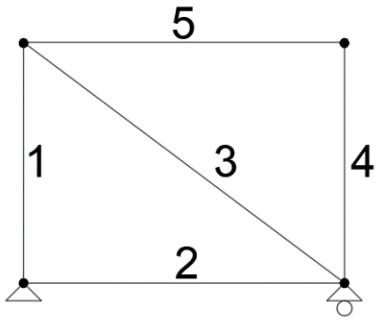
Pada penelitian ini jarak Euclidean ini digunakan untuk mendapatkan hubungan antara dua buah vektor. Secara umum, persamaan Euclidean Norm yang digunakan dapat dilihat pada persamaan (9).

$$||v|| = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} |V_k|^2} \tag{9}$$

dimana: $||v||$ merupakan nilai yang menggambarkan perbedaan antara dua buah vektor sedangkan V_k adalah selisih antara vektor pertama dan vektor kedua, dimana tiap vektor memiliki n-elemen.

4. ANGKA BINER

Penggunaan nilai biner pada penelitian ini dimaksudkan untuk merepresentasikan elemen yang mengalami kerusakan. Angka 0 merepresentasikan tidak terjadi kerusakan pada elemen tersebut sebaliknya angka 1 merepresentasikan terdapat kerusakan pada elemen tersebut. Sebagai contoh, jika terdapat struktur rangka batang bidang sederhana seperti yang terlihat pada Gambar 3, jika vektor dari nilai biner menunjukkan hasil = [1 0 1 1 0], hal ini berarti bahwa terdapat kerusakan pada elemen/batang 1, 3 dan 4 sedangkan elemen/batang 2 dan 5 tidak mengalami kerusakan.

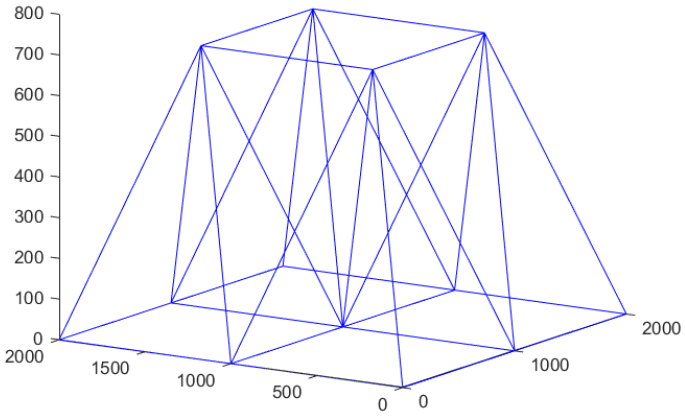


Gambar 3. Contoh struktur rangka batang bidang

5. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, struktur rangka batang ruang dengan 32-batang ditinjau sesuai yang dapat dilihat pada Gambar 4. Bentuk ini merupakan modul piramid dengan panjang, lebar dan tinggi masing-masing 2000 mm, 2000 mm, 700mm. Konfigurasi struktur rangka batang ruang ini diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Bezerra, et al (2009); Freitas, et al (2019); Frans dan Arfiadi (2024). Modulus elastisitas material dan ukuran penampang diambil seragam, yaitu sebesar 68,95 MPa dan 1354,8 mm2. Tabel 1 menunjukkan empat skenario kerusakan yang digunakan. Perlu diketahui sebelumnya, batasan masalah pada penelitian ini adalah penurunan kekakuan yang dialami oleh elemen yang mengalami kerusakan adalah sama, yaitu sebesar 20% sehingga kekakuan residual struktur yang mengalami kerusakan adalah 80% dari kekakuan mula-mula (kekakuan pada saat kondisi sehat).

Gambar 4. Struktur rangka batang ruang dengan 32-batang



Tabel 1. Skenario kerusakan dari struktur rangka batang ruang

No	Skenario	Elemen yang mengalami kerusakan
1	S1	6
2	S2	8,32
3	S3	3,8,10,15
4	S4	2,3,8,10,15,22,25,32

Fungsi obyektif pada penelitian ini adalah untuk meminimumkan nilai *Euclidean Norm* dari 2 (dua) buah vektor. Vektor pertama adalah vektor frekuensi natural analisis sedangkan vektor kedua adalah vektor yang berisi frekuensi natural dari struktur yang mengalami kerusakan (kondisi aktual). Kedua vektor ini dibandingkan dengan menggunakan persamaan (9) yang merupakan hasil penyesuaian persamaan (10)

$$fitness = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} |\omega_{analisis} - \omega_{aktual}|^2} \quad (10)$$

dimana: $fitness$ merupakan nilai yang menggambarkan perbedaan antara dua buah vektor frekuensi natural sedangkan $\omega_{analisis}$ adalah vektor frekuensi natural analisis dan ω_{aktual} adalah vektor frekuensi natural aktual (struktur yang mengalami kerusakan), n adalah jumlah ragam yang dipertimbangkan.

Seluruh perhitungan termasuk pembuatan algoritma, fungsi dan analisis struktur dikerjakan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB R2022b (Mathworks, 2021; 2023).

6. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 menunjukkan variabel optimasi yang digunakan. Jumlah iterasi maksimum yang digunakan dalah 500 iterasi dengan jumlah partikel dan jumlah variabel yang sama, yaitu 32. Nilai ini sesuai dengan jumlah elemen / batang yang ada dan digunakan sebagai representasi nilai biner. Nilai *loudness* dan *pulse rate* diambil sama, yaitu sebesar 0,1.

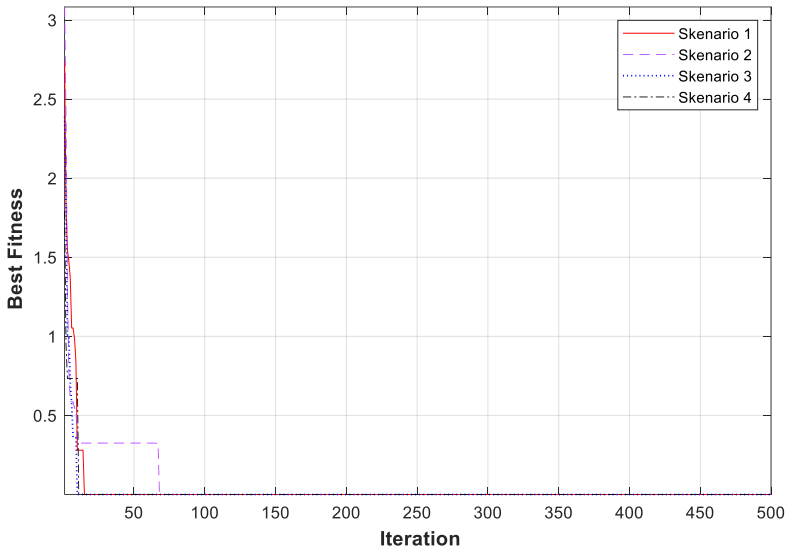
Tabel 2. Variabel optimasi dengan menggunakan BBA

Variabel optimasi	Nilai
Maksimum iterasi	500
Jumlah partikel	32
Jumlah variabel	32
Loudness	0,1
Pulse rate	0,1

Tabel 3. Hasil vektor angka biner untuk masing-masing elemen

Skenario	Hasil angka biner yang ditunjukkan
S1	[0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
S2	[0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]
S3	[0 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
S4	[0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1]

Tabel 3 menunjukkan hasil vektor angka biner untuk masing-masing skenario. Untuk skenario pertama, vektor angka biner menunjukkan nilai [0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]. Pada kolom-6, angka biner menunjukkan nilai 1, yang berarti bahwa terjadi penurunan kekakuan/kerusakan pada elemen ke-6. Sama halnya pada skenario kedua, vektor angka biner menunjukkan [0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1], angka biner 1 ditunjukkan pada kolom 8 dan 32, yang menunjukkan bahwa elemen 8 dan 32 mengalami penurunan kekakuan/kerusakan. Pada skenario ketiga dan keempat, vektor angka biner menunjukkan [0 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0] dan [0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1], yang berarti bahwa terjadi kerusakan pada elemen 3,8,10 dan 15 untuk skenario ketiga dan elemen 2,3,8,10,15,22,25,32 pada skenario keempat.



Gambar 5. Penurunan nilai fitness untuk tiap iterasi

Gambar 5 menunjukkan penurunan nilai fitness untuk tiap iterasi, dapat terlihat bahwa solusi yang didapatkan konvergen untuk seluruh skenario kerusakan dan solusi yang didapatkan dapat mencapai kekonvergenan dengan kurang dari 100 iterasi. Hal ini menunjukkan bahwa BBA memiliki kemampuan yang baik untuk mendapatkan solusi yang optimum dengan jumlah iterasi yang sedikit (<100 dari 500 iterasi maksimum yang ditetapkan).

7. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas teknik deteksi kerusakan pada struktur rangka batang ruang dengan 32-elemen/batang. Teknik deteksi kerusakan yang digunakan adalah gabungan dari BBA dan konsep *euclidean distance* dimana *euclidean distance* digunakan untuk membandingkan dua vektor yang merupakan vektor frekuensi natural analisis dan frekuensi natural struktur aktual (yang mengalami kerusakan) sedangkan BBA digunakan untuk mencari lokasi kerusakan dari struktur rangka batang ruang tersebut dengan memanfaatkan nilai biner yang memrepresentasikan ada atau tidaknya kerusakan pada suatu elemen. Terdapat berbagai skenario kerusakan yang ditinjau, mulai dari kerusakan tunggal, kerusakan ganda, hingga kerusakan pada beberapa elemen/batang. Berdasarkan hasil yang didapatkan, gabungan antara BBA dan konsep *Euclidean Distance* dapat dengan akurat menentukan lokasi elemen yang mengalami kerusakan pada struktur rangka batang ruang tersebut. Solusi konvergen yang didapatkan kurang dari 100 iterasi, hal ini juga menggambarkan keefektifan dari BBA sebagai salah satu algoritma optimasi untuk variabel biner.

DAFTAR PUSTAKA

Bezerra, L.M.; Freitas, C.A.S.; Matias, W.T. dan Nagato, Y. (2009). “Increasing load capacity of steel space trusses with end-flattened connections”. *Journal of Constructional Steel* Research, Vol. 65, 2197-2206.

Burgos, D.A.T., Vargas, R.C.G., Pedraza, C., Agis, D. dan Pozo, F. (2020). “ Damage identification in structural health monitoring: a brief review from its implementation to the use of data-driven applications”. *Sensors*, Vol. 20, 733.

Dokmanic, R. Parhizkar, J. Ranieri dan M. Vetterli. (2015). "Euclidean Distance Matrices: Essential theory, algorithms, and applications”. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 32, No. 6, pp. 12-30.

Frans, R. dan Arfiadi, Y. (2024). “Damage detection in space truss structures using a third-level approach”. Discover Civil Engineering, 1:13.

Freitas, C.A.S., Silva, V.W., Bezzerra, L.M., Junior, F.F.S.M., Neto, V.C.P. dan Ribeiro, B.A.T. (2019). “Experimental analysis of space trusses with typical connections reinforced with steel and sisal resin spacers”. *Advanced Steel Construction*, Vol. 15, No. 4, 398–405.

Junnah, M. dan Humaira, N. (2019). “Implementasi metode euclidean distance untuk ekstraksi fitur jarak pada citra skeleton”. *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer Volume*, Vol. 24, No. 2, 134-139.

MathWorks. (2023). MATLAB: Primer, Version 9.14. The Mathworks, Inc.

MathWorks. (2021). MATLAB: Programming Fundamental, Version 9.10. The Mathworks, Inc.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. dan Yang, X.S. (2014). “Binary bat algorithm”. *Neural Computing and Applications*, Vol. 25, 663-681.

Nabilla, V.H., Fitria, D., Permana, D., dan Fitri, F. (2023). “Comparison of haversine and euclidean distance formulas for calculating distance between regencies in west sumatra”. UNP *Journal Of Statistics And Data Science*, Vol

1, No.3, 120-125.
Rytter, A, Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. Ph.D. Thesis, University of Aalborg, Aalborg, Denmark, 1993.
Sekkarini, C.E., Sumarmi, Bachri, S., Taryana, D., dan Giofandi, E.A. (2022). "Euclidean Distance Modeling of Musi River in Controlling the Dengue Epidemic Transmission in Palembang City". Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences, Vol. 10(G), 422-429.
Sohn, H. dan Farrar, C.R. (2001). "Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals". *Smart Mater. Struct.* Vol. 10, 446–451.
Wilson, C.L., Lankar, K., Roy, S., Kopsaftopoulos, F., dan Chang F-K. (2018). Structural Health Monitoring of Composites. Comprehensive Composite Materials II, Vol 7, pp 382-407.
Yang, X.S. (2010). Natured-inspired optimization algorithms. Elsevier, London.

EFEKTIFITAS SABUT KELAPA SEBAGAI *STABILIZING AGENT* DALAM CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT* AGREGAT SLAG NIKEL

Abdias Tandy Arrang[1], Rita Irmawaty[2], Rudy Djamaluddin[3], dan Herman Parung[4]

[1)]Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp 0811422111, E mail: dias_tandy@gmail.com
[2),] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 08114619672, E mai ; Rita_irmaway@yahoo.co.id
[3),] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 0811466610, E mai ; rudy0011@gmail.com
[4)]Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp. 087840023116, E mail: parungherman@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sabut kelapa sebagai stabilizing agent dalam mengurangi nilai *draindown* pada campuran *Stone Mastic Asphalt* (SMA) yang menggunakan agregat kasar slag nikel. Sabut kelapa dengan panjang serat ± 6 mm digunakan dalam campuran aspal dengan komposisi 0,3% terhadap berat campuran. Pengujian draindown dilakukan sesuai dengan metode AASHTO T 305-97 pada berbagai kadar aspal (6,0%, 6,25%, 6,5%, 6,75%, dan 7,0%) serta variasi kandungan slag nikel (0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%). Hasil uji menunjukkan bahwa penggunaan sabut kelapa secara umum mampu mengurangi nilai draindown pada campuran SMA. Namun, pada kadar aspal tertinggi (7,0%) dengan kandungan slag nikel 100%, sabut kelapa dengan konsentrasi 0,3% belum mampu menahan laju draindown hingga memenuhi syarat maksimal yang ditetapkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga, yaitu 0,3%. Sebaliknya, pada kandungan slag nikel yang lebih rendah (0% hingga 75%), *draindown* berada dalam batas yang diizinkan. Berdasarkan hasil ini, meskipun sabut kelapa menunjukkan potensi sebagai *stabilizing agent*, penyesuaian lebih lanjut terhadap komposisi sabut kelapa atau modifikasi campuran diperlukan untuk meningkatkan efektivitasnya pada kondisi dengan kadar aspal dan kandungan slag nikel yang lebih tinggi. Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai peran sabut kelapa dalam meningkatkan stabilitas campuran aspal dan membuka peluang untuk eksplorasi lebih lanjut dalam pengembangan material konstruksi yang berkelanjutan.

Kata Kunci: Sabut Kelapa, *Draindown*, *Stone Mastic Asphalt*, Slag Nikel, *Stabilizing Agent*.

1. PENDAHULUAN

Konstruksi perkerasan jalan yang berkualitas tinggi dan tahan lama merupakan salah satu aspek penting dalam pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. *Stone Matrix Asphalt* (SMA) dikenal sebagai salah satu jenis campuran aspal yang memiliki ketahanan yang baik terhadap deformasi permanen serta memberikan umur layanan yang lebih panjang dibandingkan campuran aspal konvensional. Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaan SMA adalah masalah *draindown* aspal, yaitu migrasi aspal dari agregat selama proses pencampuran, pengangkutan, dan pemadatan, yang dapat mengurangi kualitas dan performa perkerasan.

SMA adalah jenis campuran aspal yang dirancang khusus untuk aplikasi perkerasan jalan dengan beban lalu lintas tinggi. Menurut (Lavasani et al., 2015)(AASHT0, 2012), SMA terdiri dari kerangka agregat kasar dengan kontak batu-ke-batu dan mortar pengikat aspal yang kaya akan aspal. SMA pertama kali dikembangkan di Eropa pada 1960-an dan sejak itu telah diadopsi secara luas karena keunggulannya dalam ketahanan terhadap deformasi permanen dan umur layanan yang panjang (Devulapalli et al., 2022). Struktur agregat kasar yang membentuk rangka dalam campuran SMA berfungsi untuk menahan beban, sementara mortar yang mengisi rongga antar agregat terdiri dari campuran aspal, *filler*, agregat halus, dan *stabilizer*. SMA dikenal sebagai campuran aspal dengan gradasi agregat senjang, yang memungkinkan kontak batu-ke-batu yang kuat, sehingga memberikan stabilitas dan durabilitas yang tinggi (Mallick & El-Korchi, 2011). Penggunaan SMA di Amerika Serikat dimulai pada awal 1990-an setelah penelitian yang dilakukan di Eropa menunjukkan bahwa SMA memiliki kinerja yang sangat baik untuk perkerasan jalan yang melayani lalu lintas tinggi. Keunggulan SMA dibandingkan dengan campuran aspal konvensional termasuk umur layanan yang lebih panjang, ketahanan terhadap *rutting*, peningkatan ketahanan friksi, dan kemampuan untuk mereduksi kebisingan dan cipratan air, yang memberikan manfaat keselamatan tambahan bagi pengguna jalan (NAPA, 2002). Namun, SMA juga memiliki tantangan, terutama dalam hal potensi terjadinya *draindown* aspal, di mana aspal terpisah dari agregat selama proses pencampuran atau pengangkutan (Brown et al., 1997).

Draindown aspal merupakan salah satu masalah utama dalam campuran SMA, di mana aspal yang berlebihan cenderung mengalir keluar atau terdrainase dari campuran, terutama saat transportasi material campuran atau saat penghamparan di lapangan. Untuk mengatasi masalah ini, penggunaan *stabilizing agent* telah menjadi pendekatan yang umum digunakan. *Stabilizing agent* berfungsi untuk meningkatkan viskositas aspal atau menyerap aspal, sehingga mencegahnya mengalir keluar dari campuran. Berbagai jenis *stabilizing agents* telah dimanfaatkan, termasuk

serat selulosa, serat mineral, dan bahan berbasis polimer (Blazejowski, 2016). Untuk mengatasi masalah ini, penggunaan *stabilizing agent* dalam campuran SMA menjadi fokus penelitian. Sabut kelapa, sebagai salah satu sumber daya alam yang melimpah di Indonesia, menawarkan potensi sebagai agen penstabil yang ramah lingkungan. Sabut kelapa memiliki serat yang kuat dan tahan lama, sehingga dapat membantu mengikat aspal dalam campuran untuk mengurangi risiko *draindown*. Penggunaan sabut kelapa sebagai agen penstabil tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan performa teknis campuran aspal, tetapi juga untuk memanfaatkan limbah alam yang berlimpah dan kurang dimanfaatkan.Selain itu, penggunaan agregat alternatif seperti slag nikel, yang merupakan limbah industri dari proses peleburan nikel, menjadi solusi potensial dalam mengurangi penggunaan agregat alam yang semakin terbatas. Slag nikel memiliki karakteristik fisik yang mendukung penggunaannya sebagai agregat kasar dalam campuran aspal, termasuk daya tahan yang tinggi dan stabilitas yang baik.

Sabut kelapa, yang merupakan salah satu jenis serat alami yang melimpah di Indonesia, telah diteliti sebagai *stabilizing agent* yang potensial untuk campuran SMA. Sabut kelapa memiliki sifat mekanis yang baik, termasuk kekuatan tarik yang tinggi dan kemampuan untuk menyerap aspal, yang dapat membantu mengurangi drain down aspal dalam campuran. Penelitian penggunaan serat selulosa seperti: serat sisal, serat sabut kelapa, serat batang pisang, serat jute terbukti dapat mengurangi terjadinya *draindown* hingga 50%. Berbagai dosis penggunaan serat selulosa dalam penelitian berkisar dari 0,1% - 0,5% namun berdasarkan hasil penelitian disarankan 0,3% (Kumar et al., 2004); (Sharma & Goyal, 2006); (Oda et al., 2012); (Panda et al., 2013); (Awanti, 2013); (Lavasani et al., 2015); (AlSaadi et al., 2023); (Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020).

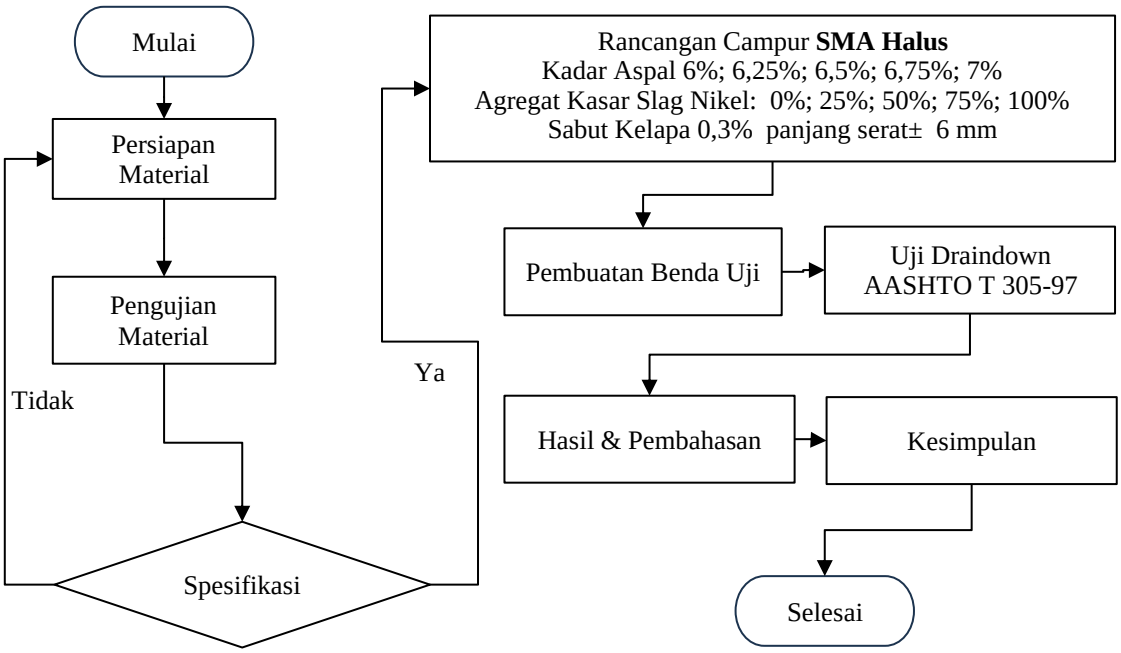
Agregat merupakan komponen terbesar dalam campuran aspal, mencakup sekitar 90% dari sisi berat campuran atau 75%-85% dari volumenya, dan sisanya terdiri dari *filler* dan bitumen. Oleh karena itu, diperlukan banyak penelitian untuk menemukan sumber agregat baru. Indonesia, sebagai penghasil nikel terbesar di dunia dengan produksi 1,6 juta metrik ton pada tahun 2022, memiliki cadangan nikel dunia sebesar 139,419 juta metrik ton, di mana lebih dari setengahnya atau sekitar 52% berada di Indonesia. Sebagian besar cadangan nikel Indonesia terletak di Morowali, Sorowako, Kolaka, Konawe, dan Tanjung Buli. Proses produksi nikel menghasilkan limbah berupa slag nikel yang mencapai 13 juta metrik ton per tahun. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan melalui Peraturan Pemerintah Nomor 22/2021 telah mengeluarkan sembilan jenis limbah dari daftar bahan berbahaya dan beracun (B3), termasuk slag nikel (Kemenperin, 2020); (Pristiandaru, 2023). Oleh karena itu, pemanfaatan slag nikel sebagai agregat dalam campuran perkerasan aspal menjadi semakin menarik untuk diteliti. Proses pengolahan nikel tidak hanya memproduksi logam nikel, tetapi juga menghasilkan limbah berupa slag nikel selama tahap peleburan. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini berpotensi menjadi sumber polusi lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang berkelanjutan untuk pengelolaan slag nikel guna menjaga keseimbangan antara perkembangan industri dan kelestarian lingkungan. Komposisi kimia slag nikel yang mengandung silika, magnesium, kalsium, dan besi menunjukkan bahwa material ini memiliki kekerasan yang cukup untuk dimanfaatkan sebagai material konstruksi.

Berikut adalah beberapa penelitian terkait penggunaan slag nikel dalam campuran aspal. Penelitian (Bethary & Intari, 2022) mendalami penggunaan slag nikel dari smelter PT Growth Java Industri, Banten, sebagai agregat kasar dalam campuran AC-BC. Penelitian pemanfaatan slag nikel dari PT Vale, Sorowako, sebagai agregat halus dalam campuran AC-BC (Jusmidah et al., 2021). Selain itu, (Kamba & Rachman, 2018) juga menggunakan slag nikel dari PT Vale sebagai agregat halus dalam campuran aspal semi senjang HRS-Base. Kajian lain dilakukan dengan memfokuskan pada penggunaan slag nikel dari PT Aneka Tambang, Kolaka, sebagai pengganti agregat halus dalam campuran AC-Base (Angka & Kushari, 2017). Hasil penelitian-penelitian di atas menunjukkan bahwa penggunaan material slag nikel memenuhi persyaratan kinerja sesuai dengan Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan 2018 Revisi 2, baik dari segi stabilitas, kelelehan (flow), maupun sifat volumetrik Marshall seperti VIM, VMA, dan VFA.

Penelitian ini berfokus pada evaluasi sabut kelapa sebagai *stabilizing agent* dalam campuran aspal SMA dengan variasi slag nikel agregat kasar yang dikombinasikan dengan agregat lokal. Penelitian ini juga mempertimbangkan variasi kadar aspal untuk menentukan pengaruhnya terhadap *draindown* dalam campuran SMA. Dengan melakukan penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan formulasi campuran SMA yang lebih optimal, tahan lama, dan berkelanjutan, yang juga mendukung penggunaan bahan-bahan ramah lingkungan dan limbah industri.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas sabut kelapa sebagai agen penstabil dalam campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) gradasi halus dengan variasi kadar aspal dan agregat slag nikel. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Aspal dan Jalan Fakultas Teknik Univeristas Kristen Indonesia Palulus, Makassar, Sulawesi Selatan. Pada Gambar 1 menunjukkan bagan alir penelitian yang dilakukan untuk memperoleh hasil dari tujuan penelitian ini.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Jumlah benda uji dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji

Kadar Aspal	Variasi Slag Nikel (SN) dalam Agregat Kasar					Jumlah Benda Uji
	SN 0%	SN 25%	SN 50%	SN 75%	SN 100%	
6 %	3	3	3	3	3	15
6,25 %	3	3	3	3	3	15
6,5 %	3	3	3	3	3	15
6,75 %	3	3	3	3	3	15
7 %	3	3	3	3	3	15
Total Benda Uji						75

Pengujian *draindown* aspal mengacu pada (AASHTO, 1997). Material penyusun dicampur pada suhu sesuai persyaratan spesifikasi, dalam penelitian ini berkisar 155 ^{0}C. Material campuran dalam keranjang uji dilektakkan di atas talam atau wadah kemudian dimasukkan kedalam oven dengan suhu 155 ^{0}C. Durasi benda uji di dalam oven adalah 60 menit, kemudian dikeluarkan dan nilai *draindown* dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$Draindown\ (\%) = \left(\frac{(W_c + W_{d)} - W_c}{W_s}\right) \text{ x } 100\ \% \quad (1)$$

Dimana: W_c = Berat wadah kosong (gr), W_d = Berat material yang terkumpul dalam wadah setelah pengujian (berat akhir wadah termasuk material *draindown*), W_s = Berat total sampel campuran aspal awal sebelum pengujian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Uji Material Penyusun

Pengujian terhadap material penyusun merupakan bagian penting dalam penentuan kualitas campuran aspal. Material agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini merupakan agregat lokal hasil produksi *crusher* yang berasal dari Sungai Bili Bili, Kecamatan Parangloe, Kabupaten Gowa yang divariasikan dengan slag nikel asal PT Vale Indonesia, Sorowako, Kabupaten Luwu Timur, keduanya di Provinsi Sulawesi Selatan. Gambar lokasi pengambilan material dapat dilihat pada Gambar 2. Jenis slag nikel yang digunakan dalam merupakan slag nikel yang diperoleh dengan metode pendinginan udara (*air cooled slag nickel*). Agregat halus yang digunakan merupakan juga merupakan hasil *crusher* agregat lokal dari Sungai Bili Bili. Sabut kelapa yang digunakan sebagai *stabilizing agent* dalam penelitian ini diperoleh dari pengrajin sabut kelapa yang ada di Kota Makassar. Panjang serat sabut kelapa ± 6 mm. Gambar 3 dan 4 memperlihatkan agregat kasar dan sabut kelapa yang digunakan dalam penelitian ini. Sementara untuk hasil uji karakteristik agregat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dalam Tabel 2 dan Tabel 3.



Gambar 2. Lokasi Pengambilan Material Agregat Kasar



Gambar 3. Agregat Lokal Bili Bili dan Slag Nikel Sorowako



Gambar 4. *Stabilizing Agent* Sabut Kelapa

Tabel 2. Hasil Uji Karakteristik Agregat Kasar

Pengujian	Spesifikasi	Hasil Uji Agregat Kasar	
		Lokal	Slag Nikel
Abrasi	Maks 30%	16,34%	11,42 %
Berat Jenis Kasar			
Bulk	≥ 2,5	2,59	2,89
SSD	≥ 2,5	2,64	2,92
Apparent	≥ 2,5	2,73	2,99
Penyerapan	< 3	2,03	0,86
Pipih & Lonjong (1:5)	<5%	2,63% & 2,35%	1,13% & 1,06%
Angularitas	100/90	100/90	100/97

Hasil uji terhadap agregat kasar yang digunakan, baik agregat lokal Bili Bili maupun slag nikel asal PT Vale keduanya memenuhi persyaratan spesifikasi sebagai agregat kasar. Slag nikel memiliki karakteristik yang lebih solid dan tahan aus dibandingkan agregat lokal. Nilai ketahanan aus slag nikel dalam penelitian ini memiliki nilai abrasi hanya sebesar 11,42% jika dibandingkan dengan slag nikel dalam penelitian (Bethary & Intari, 2022) yaitu sebesar 23,62%, nampak bahwa slag nikel asal PT Vale lebih tahan abrasi dibandingkan slag nikel PT Growth Java Industry.

Tabel 3. Hasil Uji Karakteristik Agregat Halus

Pengujian	Spesifikasi	Hasil Uji
Nilai Setara Pasir	Min. 12 %	95,51 %
Material Lolos Ayakan No. 200	Maks. 1 %	0,38 %

Aspal yang digunakan adalah aspal minyak penetrasi 60/70 produksi PT. Pertamina. Hasil pengujian karakteristik aspal yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4. Terhadap hasil pengujian karakteristik pada tabel tersebut, dapat diyakini bahwa aspal yang digunakan memenuhi persyaratan spesifikasi.

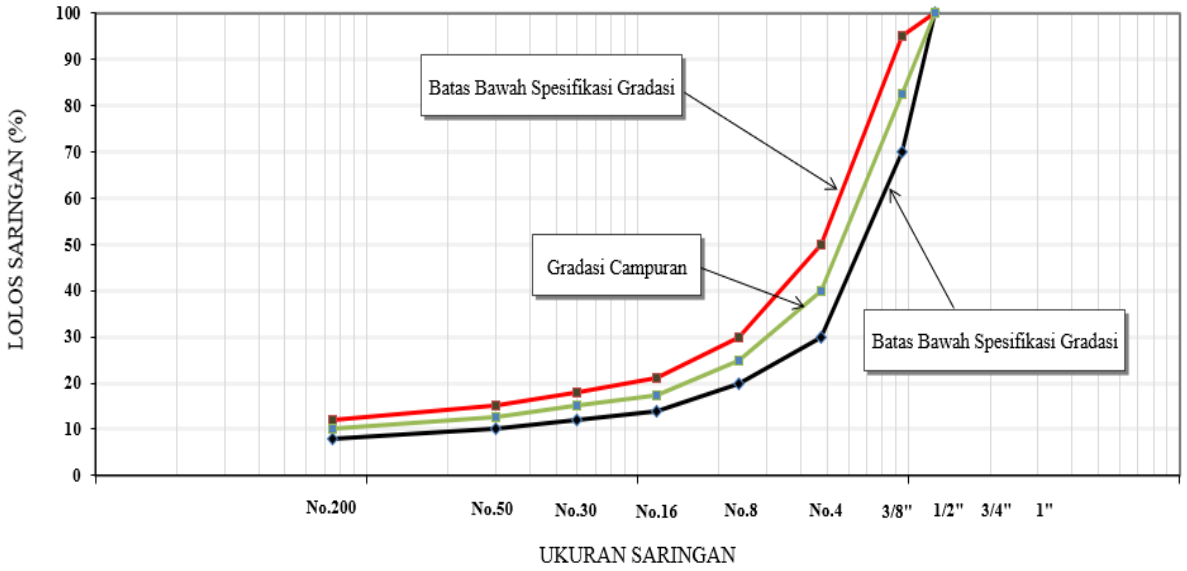
Tabel 4. Hasil Uji Karakteristik Aspal

Pengujian	Spesifikasi	Hasil Uji
Berat Jenis Aspal	≥ 1,0	1,058
Penetrasi 25 ^{0}C (0,1 mm)	60 - 70	67,9
Titik Lembek (^{0}C)	≥ 48	54,2
Daktilitas 25 ^{0}C (cm)	≥ 100	137,67
Titik Nyala (^{0}C)	≥ 232	270

Bahan pengisi (*filler*) yang digunakan adalah Semen Tonasa tipe PCC dengan berat jenis 2,71. Karakteristik material di atas memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai material penyusun campuran *stone matrix asphalt*.

3.2 Gradasi Campuran

Gradasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah gradasi tengah dari campuran SMA halus yang mengacu pada SNI 8129:2015 Spesifikasi *Stone Matrix Asphalt* dan Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2 seperti pada Gambar 5. Pemilihan gradasi tengah ini didasarkan pada pertimbangan bahwa gradasi tersebut merupakan rata-rata dari batas atas dan batas bawah yang diizinkan sesuai dengan standar. Gradasi tengah ini dipilih untuk memastikan bahwa campuran aspal berada dalam kisaran optimal yang seimbang, sehingga diharapkan dapat memenuhi kriteria stabilitas dan fleksibilitas yang diperlukan untuk kinerja perkerasan yang baik. Dengan memilih gradasi tengah, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan representasi yang akurat dari performa campuran SMA yang sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Dokumentasi proses penelitian di laboratorium dapat dilihat pada Gambar 6.



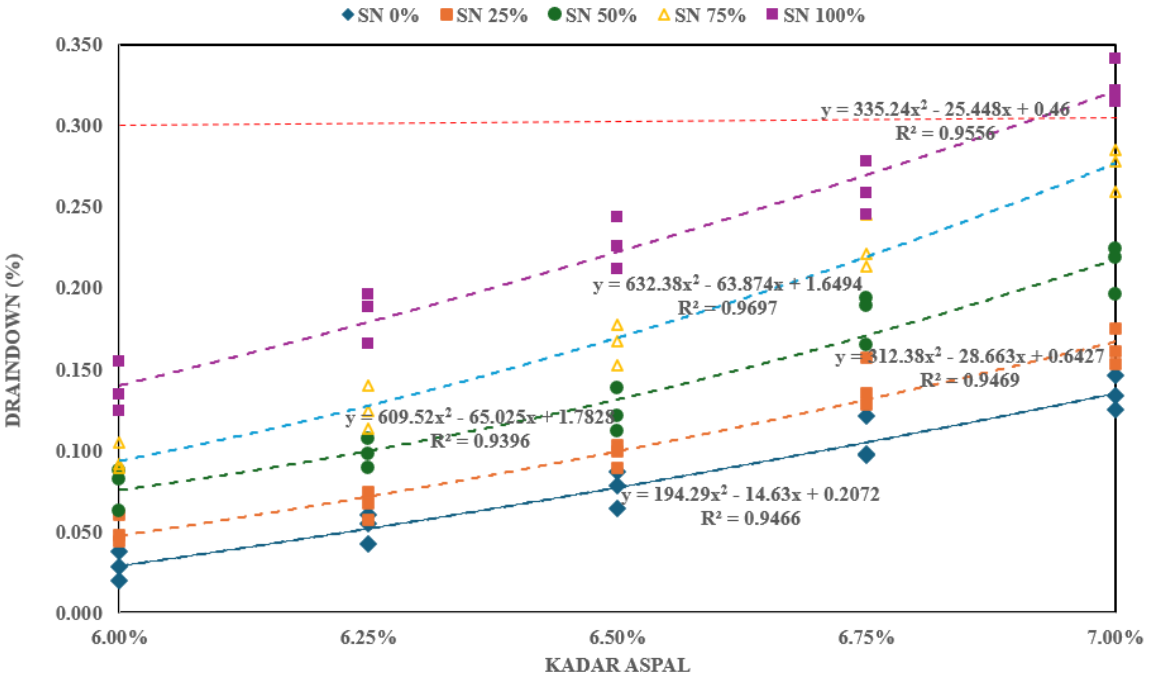
Gambar 5. Gradasi Campuran SMA Halus yang digunakan



Gambar 6. Dokumentasi Penelitian

3.3 Hasil Uji *Draindown*

Setelah melakukan rangkaian penelitian untuk memperoleh nilai *draindown* campuran SMA halus yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar dengan berbagai variasi kadar aspal. Hasil pengujian tersebut dipaparkan dalam grafik pada Gambar 7.



Gambar 7. Dokumentasi Penelitian

Grafik hasil uji menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan persentase *draindown* pada berbagai komposisi slag nikel (0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%). Pada SN 0% (tanpa slag nikel) menunjukkan *draindown* terendah dan jauh di bawah batas yang diizinkan (0,3%), ini menunjukkan bahwa agregat lokal memberikan kohesi yang baik dengan aspal. Sedangkan pada kondisi SN 100% (100% slag nikel) menunjukkan *draindown* tertinggi, mendekati atau bahkan melebihi batas 0,3% yang ditetapkan oleh Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2, mengindikasikan bahwa agregat slag nikel, meskipun memiliki keunggulan fisik tertentu, memerlukan modifikasi dalam campuran untuk memenuhi persyaratan ini.

Dari data karakteristik material, beberapa faktor berat jenis agregat mempengaruhi *draindown* campuran aspal. Berat jenis slag nikel yang lebih tinggi (bulk: 2,89, SSD: 2,92, apparent: 2,99) dibandingkan agregat lokal (bulk: 2,59, SSD: 2,64, apparent: 2,73) menunjukkan bahwa slag nikel adalah material yang padat. Namun, penyerapan air yang sangat rendah (0,86) pada slag nikel berkontribusi terhadap kurangnya kohesi antara aspal dan agregat, yang memicu peningkatan *draindown*.

Sabut kelapa sebagai *stabilizing agent* terbukti efektif dalam mengurangi *draindown* pada campuran *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Namun, pada kadar aspal sebesar 7% dengan komposisi slag nikel (SN) mencapai 100%, sabut kelapa dengan konsentrasi 0,3% masih belum mampu sepenuhnya menahan laju *draindown* hingga berada di atas batas maksimum yang ditetapkan oleh Spesifikasi Umum 2018 Revisi 2 (< 0,3%). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun sabut kelapa memiliki potensi untuk meningkatkan kohesi campuran, perlu dilakukan penyesuaian terhadap komposisi sabut kelapa atau pendekatan tambahan lainnya untuk memastikan bahwa *draindown* tetap dalam batas yang diizinkan, terutama pada campuran dengan kadar aspal dan slag nikel yang tinggi. Efektifitas sabut kelapa dalam mengurangi drainase aspal dalam campuran sejalan dengan penelitian yang lain juga menggunakan serat alami sebagai *stabilizing agent*. Penelitian (Ferreira da Costa et al., 2020) yang menggunakan serat batang pisang sebesar 0,5% diperoleh nilai *draindown* pada kisaran 0,05 % - 0,23 %. Serat kelapa dengan kadar 0,5% dapat menahan laju drainase aspal dari campuran, diperoleh nilai hanya sebesar 0,05% pada suhu 165 ^{0}C dan 0,23% pada suhu 180 ^{0}C (Vale et al., 2014).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa sabut kelapa terbukti efektif sebagai *stabilizing agent* dalam campuran SMA yang menggunakan slag nikel sebagai agregat kasar. Kemampuan penyerapan air yang tinggi dari sabut kelapa dapat meningkatkan kohesi dalam campuran sehingga mengurangi risiko *draindown* yang lebih tinggi terkait dengan penggunaan slag nikel sebagai agregat kasar. Namun pada kadar aspal 7% dan kandungan slag nikel 100% sebagai agregat kasar, nilai *draindown* sedikit di atas 0,3% sebagai persyaratan maksimal. Slag nikel memiliki karakteristik fisik yang baik sebagai agregat kasar, seperti berat jenis yang tinggi dan keausan rendah. Namun, penyerapan air yang rendah membuatnya kurang optimal dalam menjaga aspal tetap melekat pada agregat, sehingga sedikit meningkatkan risiko *draindown*.

Saran

1. Komposisi sabut kelapa yang digunakan perlu dioptimalkan untuk memastikan bahwa penambahan *stabilizing agent* ini memberikan efek maksimal dalam mengurangi *draindown* tanpa mengurangi aspek mekanis campuran lainnya.
2. Disarankan melakukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan komposisi optimal antara slag nikel, sabut kelapa, dan aspal dalam campuran SMA. Penelitian ini juga harus mempertimbangkan variasi kondisi lingkungan seperti suhu tinggi dan beban lalu lintas yang berat untuk memastikan performa yang konsisten.
3. Pada implementasi di lapangan harus disertai dengan kontrol kualitas yang ketat, terutama dalam hal kadar air dan distribusi sabut kelapa dalam campuran, untuk menghindari inkonsistensi dalam performa material.

DAFTAR PUSTAKA

AASHT0. (2012). R 46-08, Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphlat. In *AASHTO*. AASHTO. http://www.fda.gov/downloads/AdvisoryCommittees/CommitteesMeetingMaterials/TobaccoProductsScientificAdvisoryCommittee/UCM247549.pdf

AASHTO. (1997). *AASHTO T 305-97, Standard Method of Test for Determination of Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures*.

AlSaadi, I., Tayh, S. A., Jasim, A. F., & Yousif, R. (2023). The use of natural fibers in stone mastic asphalt mixtures: a review of the literature. *Archives Of Civil Engineering*, *LXIX*(3), 347–370. https://doi.org/10.24425/ace.2023.146085

Angka, A. B., & Kushari, K. (2017). Slag nikel sebagai bahan subtitusi pada karakteristik campuran AC-Base. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*, *2017*, 89–94.

Awanti, S. S. (2013). Laboratory Evaluation of SMA Mixes Prepared with SBS Modified and Neat Bitumen. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *104*, 59–68. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.098

Bethary, R. T., & Intari, D. E. (2022). Penggunaan Limbah Slag Nikel Untuk Material Jalan Ramah Lingkungan. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, *11*(1), 34–43.

Blazejowski, K. (2016). Stone Matrix Asphalt, Theory and Practice. In *Stone Matrix Asphalt*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10285

Brown, E. R., Mallick, R. B., Haddock, J. E., & Bukowski, J. (1997). *Performance of Stone Matrix Asphalt (SMA) Mixtures in the United States*. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/13985

Devulapalli, L., Sarang, G., & Kothandaraman, S. (2022). Characteristics of aggregate gradation, drain down and stabilizing agents in stone matrix asphalt mixtures: A state of art review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, *9*(2), 167–179. https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.10.007

Ferreira da Costa, L., Lucena, L. C. de F. L., Lucena, A. E. de F. L., & Grangeiro de Barros, A. (2020). Use of banana fibers in SMA mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *32*(1), 4019341.

Jusmidah, Antariksa, Wisnumurti, & Basri Said, L. (2021). *Value Of Indirect Tensile Strength And Deformation On Ac-Bc Asphalt Mixture Using Nickel Slag As A Fine Aggregate* (Vol. 10, Issue 4, pp. 149–155). www.ijstr.org

Kamba, C., & Rachman, R. (2018). Marshall Characteristics Test On Hot Rolled Sheet Base Combine Using Nickel Slag For Half Gap Graded. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, *5*(3), 14–19.

Kemenperin. (2020). *Kemenperin Angkat Potensi Slag Nikel Jadi Bahan Baku Industri*. https://kemenperin.go.id/artikel/21806/Kemenperin-Angkat-Potensi-Slag-Nikel-Jadi-Bahan-Baku-Industri

Kumar, P., Sikdar, P. K., Bose, S., & Chandra, S. (2004). Use of jute fibre in stone matrix asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, *5*(2), 239–249.

Lavasani, M., Latifi Namin, M., & Fartash, H. (2015). Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels. *Construction and Building Materials*, *95*, 232–242. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.146

Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2011). Pavement engineering: Principles and practice. In *Pavement Engineering: Principles and Practice*.

NAPA, N. A. P. A. (2002). *SMA Guideline QIS122- Designing and constructing SMA Mixtures* (p. 99).

Oda, S., Leomar Fernandes, J., & Ildefonso, J. S. (2012). Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, *26*(1), 13–20. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.030

Panda, M., Suchismita, A., & Giri, J. (2013). Utilization of Ripe Coconut Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixes. *International Journal of Transportation Science and Technology*, *2*(4), 289–302. https://doi.org/https://doi.org/10.1260/2046-0430.2.4.289

Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, K. (2020). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Jalan dan Jembatan Revisi 2*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. https://simk.bpjt.pu.go.id/file_uploads/ketentuan/spesifikasi-umum-bina-marga-2018-untuk-pekerjaan-konstruksi-jalan-dan-jembatan-revisi-2-no-161sedb2020_pdf_22-02-2022_06-46-35.pdf

Pristiandaru, D. L. (2023). *Ini Deretan Negara Penghasil Nikel di Dunia, Indonesia Nomor Satu Artikel ini telah tayang di Kompas.com dengan judul "Ini Deretan Negara Penghasil Nikel di Dunia, Indonesia Nomor Satu", Klik untuk baca: https://lestari.kompas.com/read/2023/05/21/*. Lestari.Kompas.Com. https://lestari.kompas.com/read/2024/08/21/180000186/ini-deretan-negara-penghasil-nikel-di-dunia-indonesia-nomor-satu?page=all#:~:text=Tujuan Terkait-,Ini Deretan Negara Penghasil Nikel di Dunia%2C Indonesia Nomor Satu,-Kompas.com - 21

Sharma, V., & Goyal, S. (2006). Comparative study of performance of natural fibres and crumb rubber modified stone matrix asphalt mixtures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *33*(2), 134–139.

Vale, A. C. do, Casagrande, M. D. T., & Soares, J. B. (2014). Behavior of natural fiber in stone matrix asphalt mixtures using two design methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *26*(3), 457–465.

DAFTAR ISI BIDANG MANAJEMEN KONSTRUKSI

ANALISIS BIAYA OPERASIONAL KENDARAAN DARI GUDANG PUSAT ALFAMAR KE CABANG MINIMARKET ALFAMART Danny Garcia Nofri.....1

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN DAN SOSIAL DARIERUPSI GUNUNG MERAPI DI SUMATERA BARAT Leli Honesti[1*], Nur Rizka Badriana[2], Helga Nuri Honesty[3].....9

ANALISIS KOEFISIEN PRODUKTIVITAS TENAGA KERJA PADA PROYEK REKONSTRUKSI JEMBATAN DI KOTA PALU Fahirah F[*1], Andi Asnudin[1], dan Ahmad Jaelani[2].....17

ANALISIS LIFE CYCLE COST PADA GEDUNG SMP-IT ROBBANI – BANJARBARU Yustika Aprilia Putri[1], Hendra Cahyadi[2*], Abdurrahman[3], Robiatul Adawiyah[4] 24

ANALISIS PENAWARAN KONTRAKTOR GEDUNG SEKOLAH DI PROVINSI BALI Putu Ira Pramesti Wiraningsih[1*], I Made Aryatirta Predana[2].....30

ANALISIS PENYEBAB PERSELISIHAN DALAM PELAKSANAAN KONTRAK LUMSUM PADA PROYEK-PROYEK BANGUNAN TINGGI MILIK PEMERINTAH Jack Widjajakusuma[1*], Aazokhi Waruwu[2] dan Ritman Miko Hartanto[3].....37

ANALISIS PERBANDINGAN BIAYA DAN WAKTU PEKERJAAN PILE CAP DAN TIE BEAM DENGAN METODE PRACETAK DAN KONVENSIONAL I Nyoman Yudha Astana[1*], GAP Candra Dharmayanti[2], dan Pande Bagus Tri Warsana[3].....45

ANALISIS PERBANDINGAN WAKTU PELAKSANAAN PEKERJAAN PENGECORAN MENGGUNAKAN TOWER CRANE DENGAN CONCRETE PUMP Anak Agung Gde Agung Yana[1], I Putu Ari Sanjaya[2], I Putu Agus Arie Gunawan[3], I Gusti Ngurah Oka Suputra[4], dan Made Yani Anggreni[5].....52

ANALISIS RISIKO DAN BIAYA K3 PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG KANTOR TERPADU KABUPATEN GIANYAR BALI Dewa Ketut Sudarsana[1*,] A. A. Diah Parami Dewi[2], I Putu Yuda Sutrisna Mudri[3].....62

ANALISIS WAKTU DAN BIAYA DENGAN PENDEKATAN TIME COST TRADE OFF PADA PROYEK REPAIR STRUKTUR WHEAT SILO DAN PELLET SILO TAHAP III DI SURABAYA Maria Junita Klau[1], Hanie Teki Tjendani[2*], Sajiyo[3].....76

KAJIAN BIAYA K3 PADA RUAS JALAN TOL X STA 26+950 – STA 50+677 Katarina Rini Ratnayanti[1], dan Laela Nuryanti[2].....86

KAJIAN RISIKO BENCANA DALAM PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR TURYAPADA TOWER , KABUPATEN BULELENG, BALI Alvin Yesaya[1]*, I Putu Gustave Suryantara Pariartha[1],I Nyoman Sutarja[1], I Made Aryatirta Predana[1], MadeWidya Jayantari,Anak Agung Diah Parami Dewi[1], Ni Putu Delima Yogeswari Saraswati[1], Made DodiekWirya Ardana[1], Anak Agung Gde Agung Yana[1].....94

MANAJEMEN WASTE KONSTRUKSI: PENGGUNAAN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT DALAM PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN Elizar.....101

MANFAAT PENERAPAN LEAN CONSTRUCTION PADA PROYEK KONSTRUKSI: SYSTEMATIC REVIEW Maria Putri Lolomsait [1*] dan Harijanto Setiawan[1].....108

MAPPING PERMASALAHAN HASIL AUDIT INVESTIGASI BANGUNAN PUBLIK DI INDONESIA Ferry Hermawan[1], Bagus Abrar Ahimsa[2] dan Rayhan Muhammad[3] 118

OPTIMALISASI SISTEM SEA WATER REVERSE OSMOSIS (SWRO) DI PULAU ENDE: EVALUASI EFISIENSI DAN STRATEGI PENGELOLAAN Putu Gede Suranata[1], Putu Ika Wahyuni[2], Kadek Windy Candrayana[3], I Wayan Gde Erick Triswandana[4],Gde Wikan Pradnya Dana[5] 128

OPTIMASI OVERDRAFT PADA PERENCANAAN WAKTU PELAKSANAAN PROYEK KONSTRUKSI DENGAN SISTEM PEMBAYARAN TERMIN Ariany Frederika[1*], Anak Agung Gde Agung Yana[1], dan Ana Amatullah Khoiriyah[1].....139

PEMETAAN PENERAPAN MULTI-CRITERIA DECISION MAKING (MCDM) DALAM STRATEGI PEMELIHARAAN DI SEKTOR INDUSTRI DAN INFRASTRUKTUR: ANALISIS VISUAL DENGAN VOSVIEWER Nectaria Putri Pramesti[1*], Harijanto Setiawan[2].....146

PENENTUAN EARNED VALUE SEBAGAI INDIKATOR PROGRESS FISIK KONSTRUKSI: STUDI KASUS PROYEK KERETA CEPAT JAKARTA-BANDUNG Muhammad Sapto Nugroho[1*], Muhammad Zaki[1], Abdhy Gazali[2].....157

PENERAPAN EARNED VALUE CONCEPT PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG KULIAH FAKULTAS KEDOKTERAN UNIVERSITAS PENDIDIKAN GANESHA Gusti Ayu Putu Candra Dharmayanti[1*], Dewa Ketut Sudarsana[2], dan Ida Ayu Savitri Manohari[3]....167

PENERAPAN MODEL PENGENDALIAN KEGAGALAN KONSTRUKSI PADA PROYEK KONSTRUKSI BERBASIS SISTEM REKAYASA SOSIAL Saeman[1*], Rusdi Usman Latief[2], Rosmariani Arifuddin[3] dan M Asad Abdurrahman[4].....174

PENGARUH BESARNYA BUNGA PINJAMAN TERHADAP MALL X DI GARUT Hazairin[1] Muhammad Taufikqurrohman[2].....182

PENGARUH PENGAWASAN TERHADAP TINDAKAN PERILAKU TIDAK AMAN

PARA PEKERJA KONSTRUKSI PADA TAHAP PELAKSANAAN PEMBANGUNAN PROYEK GEDUNG BERTINGKAT Pingkan Scarlet[1], Nicholas Heda Ofridhio Asmara[1], Hermawan[2] , Budi Setiadi[2].....191

PENGARUH RISIKO TERHADAP PIHAK TERKAIT PADA PROYEK JALAN TOL X Katarina Rini Ratnayanti[1*], dan Falya Alya Rohmah[2].....200

PERENCANAAN DAN ESTIMASI BIAYA K3 PADA PEMBANGUNAN JALAN DAN JEMBATAN SINGARAJA-MENGWITANI TITIK 7D DAN 7E I Putu Ari Sanjaya[1], I Gusti Ngurah Oka Suputra[2], I Made Denick Wira Prayogi[3].....206

TINJAUAN POTENSI PEREKAT PATI SORGUM DAN KITOSAN DALAM PRODUKSI PAPAN PARTIKEL RAMAH LINGKUNGAN Rosalia Sira Sarungallo[1*], Muh. Wihardi Tjaronge[1], Ahyar Ahmad[2] dan Muralia Hustim[3].....214

ANALISA DAMPAK PERUBAHAN PRODUKSI MINIMUM TENAGA KERJA DAN PERALATAN TERHADAP WAKTU PENYELESAIAN ITEM PEKERJAAN, BIAYA DAN KEUNTUNGAN. (STUDI KASUS: DATA RENCANA ANGGARAN BIAYA PROYEK

PENINGKATAN JALAN TETAF - SP. NIKI-NIKI TAHUN 2023) Yuventus Krisanto Korbaffo, Ir Laurensius Lulu, MM, Stephanus Ola Demon, ST., MT, Paulus Sianto, ST., MT, Gregotius P. Usboko, ST., MT.....224

Analisis Biaya Operasional Kendaraan dari Gudang Pusat Alfamart ke Cabang Minimarket Alfamart

Danny Garcia Nofri

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudi No.229, Bandung 40154
***e-mail**:* danny25250@upi.edu

ABSTRAK

Biaya operasi kendaraan adalah total biaya yang dikeluarkan oleh pengguna jalan saat menggunakan moda transportasi tertentu dari zona asal ke zona tujuan. Biaya ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu biaya tetap (fixed cost) dan biaya tidak tetap (variable cost). Biaya tetap adalah biaya yang tidak berubah meskipun terjadi perubahan pada volume produksi jasa hingga tingkat tertentu, sedangkan biaya tidak tetap adalah biaya yang berubah seiring dengan perubahan volume produksi jasa. Menurut Buton (1993), dalam penetapan nilai operasi kendaraan, penentuan harga layanan transportasi harus memaksimalkan kepentingan penyedia jasa transportasi sambil tetap mempertimbangkan kesejahteraan masyarakat. Kondisi ini akan stabil dalam jangka panjang, yang disebut dengan Long Run Marginal Cost (LRMC), di mana komponen biaya tersebut mempengaruhi penetapan harga dengan memperhatikan biaya modal atau biaya tetap lainnya yang berdampak pada kelangsungan kendaraan di masa depan.

Kata kunci: biaya operasi kendaraan, biaya tetap, biaya tidak tetap, harga layanan transportasi, Long Run Marginal Cost (LRMC), penetapan harga, kesejahteraan masyarakat.

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

penelitian ini berfokus pada pentingnya transportasi sebagai elemen kunci dalam pemindahan barang dan manusia, yang semakin relevan seiring dengan pertumbuhan populasi dan peningkatan kebutuhan hidup masyarakat di Indonesia. Di era globalisasi, tingginya mobilitas masyarakat menuntut sistem transportasi yang efisien dan efektif, terutama di daerah perkotaan yang padat. Untuk mengatasi permasalahan yang timbul dari peningkatan populasi dan kepadatan lalu lintas, konsep city logistics dikembangkan sebagai solusi integratif yang mengoptimalkan sumber daya dalam mengelola logistik kota. Kabupaten Bandung, dengan pertumbuhan penduduk yang pesat dan aktivitas ekonomi yang meningkat, menghadapi tantangan dalam mempertahankan kinerja transportasi yang optimal. Tingginya kepadatan lalu lintas di ruas jalan tertentu, terutama pada jam-jam sibuk, berpotensi menurunkan efisiensi transportasi dan meningkatkan biaya operasional kendaraan. Dalam konteks ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan city logistics di Kabupaten Bandung, khususnya dalam upaya meminimalkan biaya operasional distribusi bahan pokok di jaringan Alfamart, yang mengalami pertumbuhan pesat dalam beberapa tahun terakhir. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada kebutuhan mendesak untuk meningkatkan efisiensi transportasi di tengah pertumbuhan ekonomi dan sosial yang signifikan.

1.2. Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengkaji secara mendalam kinerja distribusi angkutan logistik Alfamart yang beroperasi di kota Bandung, dengan fokus khusus pada efektivitas dan efisiensi distribusi barang ke berbagai cabang di daerah tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mencapai beberapa hal, di antaranya adalah:

1. ***Menganalisis Biaya Operasional Kendaraan**: Penelitian ini akan mengevaluasi secara rinci biaya operasional kendaraan yang digunakan dalam proses distribusi, termasuk faktor-faktor seperti bahan bakar, perawatan, dan beban biaya lainnya.*

2. ***Menganalisis Perbandingan Biaya Operasional**: Selain itu, penelitian ini akan membandingkan biaya operasional antara berbagai jenis armada yang digunakan oleh Alfamart, guna mengidentifikasi armada yang paling efisien*

dari segi biaya dan kinerja. Analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi untuk optimalisasi penggunaan armada dalam operasional logistik Alfamart di kota Bandung.

2. Landasan Teori

2.1. Biaya Operasional Kendaraan

Biaya operasi kendaraan didefinisikan sebagai keseluruhan biaya yang terkait dengan pengoperasian sebuah kendaraan dalam kondisi normal untuk tujuan tertentu. Ini mencakup semua faktor yang mempengaruhi biaya operasional dari satu moda transportasi yang digunakan untuk mengangkut barang atau penumpang dari satu zona asal ke zona tujuan lainnya. Biaya operasi kendaraan terdiri dari dua komponen utama, yaitu biaya tetap dan biaya tidak tetap.

Biaya tetap (fixed cost) adalah biaya yang tidak mengalami perubahan meskipun ada variasi dalam volume produksi jasa hingga tingkat tertentu. Contoh biaya tetap meliputi biaya penyusutan kendaraan, asuransi, dan pajak kendaraan. Sebaliknya, biaya tidak tetap (variable cost) adalah biaya yang berfluktuasi sesuai dengan perubahan volume produksi jasa. Contoh biaya tidak tetap termasuk bahan bakar, biaya perawatan rutin, dan biaya tenaga kerja langsung yang terkait dengan penggunaan kendaraan.

Menurut Buton (1993), dalam menetapkan nilai operasi kendaraan, penetapan harga layanan transportasi (pricing) harus memperhitungkan kepentingan penyedia jasa transportasi sambil tetap mempertimbangkan kesejahteraan masyarakat. Tujuan dari penetapan harga ini adalah untuk mencapai keseimbangan antara keuntungan penyedia jasa dan kepuasan masyarakat, yang dikenal sebagai memaksimalkan kesejahteraan (maximizing welfare). Kondisi ini akan menciptakan stabilitas jangka panjang, yang dikenal dengan istilah Long Run Marginal Cost (LRMC). LRMC mencakup komponen biaya yang mempengaruhi penetapan harga, termasuk biaya modal atau biaya tetap lainnya yang berpengaruh pada kelangsungan operasional kendaraan di masa depan. Dengan demikian, LRMC berfungsi sebagai panduan penting dalam menentukan harga yang optimal dan berkelanjutan dalam operasional kendaraan.

3. Metode Penelitian

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di Gudang Alfamart di Kecamatan Lagadar, Kabupaten Bandung, Jawa Barat dan pengerjaan laporan ini dilakukan di tempat tinggal penulis, yaitu di Kabupaten Bandung. Pengerjaan laporan ini dimulai dari hari minggu pertama di bulan November 2022 hingga selesai di minggu terakhir di bulan Maret 2023.

3.2. Populasi dan Teknik Pengambilan Sampel

Teknik pengambilan sampel dan instrument pengumpulan data merupakan faktor penting demi keberhasilan penelitian. Hal ini berkaitan dengan bagaimana cara mengumpulkan data, siapa sumbernya dan apa alat yang digunakan. Metode pengambilan sampel merupakan teknik atau cara yang dilakukan untuk megumpulkan data. Metode menunjuk suatu cara sehingga dapat diperlihatkan penggunaannya melalui angket, wawancara, pengamatan, tes, dokumentasi, dan sebagainya. Sedangkan instrumen pengambilan sampel merupakan alat yang digunakan untuk mengumpulkan data. Karena berupa alat, maka instrumen dapat berupa lembar cek list, kuisioner (angket terbuka/tertutup), pedoman wawancara dan lainnya. Teknik Pengambilan Sampel yang digunakan pada penelitian ini yaitu Teknik purposive-sampling dengan sampel nya adalah truk angkutan barang Alfamart yang akan menyalurkan barang menuju Minimarket tujuan.

3.3. Data Primer dan Sekunder

Untuk pengambilan data primer ini, langsung melakukan survei ke lapangan sebagai penunjang kegiatan penelitian. Dengan menempatkan surveyor pada titik pengamatan yang berada dipinggir jalan dan mendata angkutan barang tersebut dari rute asal sampai rute akhir tujuan. pengumpulan data sekunder seperti:

1. Peta rute distribusi barang dari Gudang alfamart di Kecamatan Lagadar Kabupaten Bandung
2. Data-data angkutan barang retail, diperoleh dari Gudang Alfamart Lagadar Kabupaten Bandung.
3. Jenis Kendaraan yang digunakan beserta tipe kendaraan, diperoleh dari Gudang Alfamart Lagadar Kabupaten Bandung.
4. Berat muatan yang dibawa, diperoleh dari Gudang Alfamart Lagadar Kabupaten Bandung.

3.4. Teknik Analisis

Tugas Akhir ini ditulis dengan menggunakan teknik analisis data kualitatif, yaitu dengan mengumpulkan, memilah, dan mengembangkan data yang didapatkan dari hasil survey lapangan dan informasi-informasi dari beberapa referensi ke dalam tulisan-tulisan pada laporan.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Perhitungan Biaya Tetap

Biaya tetap terdiri dari biaya-biaya yang tetap harus dikeluarkan oleh perusahaan walaupun armada tidak beroperasional. Asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Umur ekonomis kendaraan yang diambil adalah 7 tahun.
2. Pemilik membeli kendaraan jenis Mitsubishi Colt Diesel FE 74 125 PS dengan cara membayar tunai seharga RP. 423.500.000,-
3. Perhitungan penyusutan (depresiasi) dengan menggunakan methode garis lurus (Straight Line Method).
4. Round trip / hari 1 kali putaran dengan jarak lintasan rute 1 Gudang Alfamart Lagadar – Alfamart Margaasih 1 – Alfamart Margaasih 2 PP adalah 6,4 km asumsi yang dipakai hari kerja 350 hari/tahun.

a. Biaya Modal Kendaraan

Data perhitungan :

1. Harga kendaraan baru = Rp. 423.500.000,-
2. Umur ekonomis kendaraan = 7 tahun
3. Round trip / hari = 1 putaran
4. Jarak lintasan = 6,4 km
5. Hari kerja = 350 hari

1) Total panjang lintasan/tahun = 1 x 6,4 km x 350 hari kerja

= 2.240 km/tahun

2) Besarnya biaya modal kendaraan tiap tahun dengan umur ekonomis kendaraan selama 7 tahun.

= Harga kendaraan baru : Umur ekonomis kendaraan
= Rp. 423.500.000,- : 7 tahun
= Rp 60.500.000,-/tahun

3) Besarnya biaya modal kendaraan per km dengan total panjang lintasan 2.240 km/tahun

= Rp 60.500.000,-/tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 27.008,93,-/km

b. Biaya Penyusutan

Data perhitungan :

1. Harga kendaraan baru (F) = Rp. 423.500.000,-
2. Umur ekonomis kendaraan (n) = 7 tahun

1) Total panjang lintasan = 1 x jarak 6,4 km x 350 hari kerja

= 2.240 km/tahun

2) Nilai sisa kendaraan bekas umur ekonomi habis (L) 20% dari pembelian harga awal.

= 20% x Rp 423.500.000,-
= Rp 84.700.000,-

3) Dengan demikian beban penyusutan dihitung dengan menggunakan rumus penyusutan sebagai berikut :

BP = (F – L) / n = (Rp. 423.500.000,- – Rp. 84.700.000,) / 7
= Rp. 48.400.000,-/tahun

4) Sehingga nilai biaya penyusutan per km dengan total panjang lintasan 2.240 km/tahun.

= Rp. 48.400.000,-/tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 21.607,14,-/ km

c. Biaya Perijinan dan Administrasi

1) Biaya Perizinan Perusahaan dan Administrasi
- Izin Trayek = Rp.1.700.000,-/tahun
- Izin Usaha = Rp. 1.500.000,-/tahun
- Biaya KIR = Rp. 75.000,-/tahun
- Biaya STNK = Rp.70.000,-/tahun
- Pajak Kendaraan (BPKB) = Rp.1.400.000,-/tahun

Total Biaya = Rp.4.745.000,-/tahun

2) Biaya perijinan dan administrasi per km dengan total panjang lintasan 2.240 km/tahun.
= Rp.4.745.000,-/tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 2.118,-/km

Tabel Rekap Biaya Tetap

Rute	Biaya per tahun	Biaya / km
Rute 1	Rp 113,645,000.00	Rp 50,734.38
Rute 2	Rp 113,645,000.00	Rp 54,116.67
Rute 3	Rp 113,645,000.00	Rp 62,442.31
Rute 4	Rp 113,645,000.00	Rp 42,723.68
Rute 5	Rp 113,645,000.00	Rp 67,645.83
Rute 6	Rp 113,645,000.00	Rp 70,586.96
Rute 7	Rp 113,645,000.00	Rp 49,196.97

4.2. Perhitungan Biaya Tidak Tetap (BTT)

a. Biaya Bahan Bakar Minyak (BBM)

Data perhitungan

1. Round Trip/hari = 1 trip/hari
2. Jarak Tempuh/hari = 6,4 x 1 = 6,4 km/hari
3. Daya pakai BBM = 8 liter/km
4. Pemakaian BBM/hari = 6,4 km/hari : 8 liter/km = 0,8 liter/hari
5. Harga BBM = Rp 6.800,-/liter

1) Biaya Pemakaian BBM per tahun

= 350 hari/tahun x 0,8 liter/hari x Rp 6.800,-/liter
= Rp 1.904.000,-/ tahun

2) Biaya Pemakaian BBM per km

= Rp. 1.904.000,-/ tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 850,-/km

b. Biaya Ban (BB)

Data perhitungan

1. Jumlah Pemakaian Ban = 6 buah
2. Harga ban
   1. Ban baru = Rp 1.600.000,-/Bh
   2. Ban vulkanisir = ½ x Rp 1.600.000,-/Bh

      = Rp 800.000,-/ Bh
   3. Daya Tahan Ban = Rp 25.000,-/Km
   4. Jarak tempuh truk / tahun = 2.240 km/tahun

      1) Jumlah ban yang diperlukan per tahun

         Ban baru = (2.240 km/tahun : Rp 25.000,00/km) x 2
         = 0,1792 ban /tahun
         Ban vulkanisir = (2.240 km/tahun : Rp 25.000,00/km) x 4
         = 0,3584 ban/tahun

      2) Biaya ban yang diperlukan per tahun

         = (0,1792 x Rp 1.600.000,-) + (0,3584 x Rp 800.000,)
         = Rp. 573.440,-/ tahun

      3) Biaya ban per km adalah

         = Rp. 573.440,-/ tahun : 2.240 km/tahun
         = Rp. 256,- / km

c. Biaya Pemeliharaan/Reparasi Kendaraan (BP)

Biaya perawatan/Reparasi Kendaraan (BP) kendaraan Pemeliharaan rutin harian ini merupakan kegiatan yang sifatnya sederhana dan mendasar dari perawatan kendaraan tapi penting untuk dilakukan secara rutin agar kondisi kendaraan tetap terjaga stabil tidak mudah mengalami kerusakan mesin saat melakukan perjalan dan tidak merepotkan operator dan pengguna angkutan umum .

1) Service Kecil

Service kecil dilakukan sebulan 1 kali sebulan sebanyak 8 kali dalam setahun mengingat kendaraan juga membutuhkan perawatan kecil agar kendaraan selalu dalam keadaan normal dan stabil, Biaya service terdiri sesuai tabel dibawah ini yang sudah direkap dengan jumlah biaya untuk setiap service kecil sebagai berikut.

Tabel Perhitungan Komponen servis kecil perbulan

Item	Harga Satuan	Kebutuhan	Biaya
Oli Mesin	40000	8 liter	320000
Oli Gardan	35000	5 liter	175000
Oli Transmisi	30000	5 liter	150000
Gemuk	100000	2 kg	200000
Minyak Rem	60000	1 liter	60000
Total			**Rp 905,000**

a. Biaya service kecil per tahun = 8 bulan x Rp. 905.000,-/bulan

= Rp. 7.240.000,-/ tahun

b. Biaya service kecil per km = Rp. 7.240.000,- : 2.240

= Rp. 3.232,14 / km

2) Service Besar

Service besar dilakukan setiap 3 bulan sekali sebanyak 4 kali dalam setahun karena servis besar dilakukan apabila mesin sudah mulai tidak normal. Rincian Biaya service besar sesuai pada Tabel berikut.

Tabel Perhitungan Biaya setiap servis besar

Item	Harga Satuan	Kebutuhan	Biaya
Oli Mesin	40000	8 liter	320000
Oli Gardan	35000	5 liter	175000
Oli Transmisi	30000	5 liter	150000
Gemuk	100000	2 kg	200000
Minyak Rem	60000	1 liter	60000
Filter Oli	140000	1 buah	140000
Filter Udara	200000	1 buah	200000
Air Aki	10000	2 botol	20000
Lampu Truk	50000	2 buah	100000
Total			**Rp 1,365,000**

a. Jumlah biaya per service besar = Rp. 1.365.000,-/bulan

b. Biaya Service besar per tahun
= 4 bulan x Rp. 1.365.000,-/bulan
= Rp. 5.460.000,-/tahun

c. Biaya servis besar per km

= Rp. 5.460.000,-/tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 2.437,50/km

3) Overhoul Mesin

Biaya overhaul mesin sebesar 5% dari harga truk dan overhoul mesin dilakukan setiap 250.000 km.

a. Frekuensi overhaul per tahun
= 2.240 km/tahun : 250.000 = 0,00896 kali overhaul

b. Nilai Chasis
= 70 % x Rp. 423.500.000,- = Rp. 296.450.000,-

c. Ovehaul mesin
= 5% x Rp. Rp. 296.450.000,- = Rp. 14.822.500,-

d. Biaya overhaul mesin per tahun

= 0,00896 x Rp. 14.822.500,- = Rp 132.809,60-/ tahun

e. Biaya overhaul mesin per km

= 132.809,60-/ tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 59,29/km

4) Penambahan Oli Mesin

Penambahan oli mesin secara umum adalah 1 liter dan dilakukan setiap dua hari.

a. Biaya tambahan oli mesin per tahun
= Rp 40.000,00 x 350/2 = Rp 7.000.000,-/tahun

b. Biaya tambahan oli mesin per km
= Rp 7.000.000,-/tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 3.125,-/km

5) Penggantian Suku Cadang (2% x harga kendaraan)

a. Biaya pergantian suku cadang / tahun
= 2 % x Rp. 423.500.000,-
= Rp. 8.470.000,-/tahun

b. Biaya pergantian suku cadang / km
= Rp. 8.470.000,-/tahun : 2.240 km/tahun
= Rp. 3.781.25/ km

d. Biaya Supir Truk

Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah bahwa bayaran atau upah untuk supir truk yang didasarkan pada hasil survey upah supir truk memakai system gaji. Pendapatan bersih sopir adalah Rp. 85.000 dari penghasilan yang diperolehnya. Data Perhitungan asumsi :

1. Biaya supir truk per hari

   Pendapatan supir/hari = Rp.85.000,-
2. Biaya supir truk per tahun

   = 350 hari x Rp. 85.000,-
   = Rp. 29.750.000,- /tahun
3. Biaya supir truk per km

   = Rp 29.750.000,- /tahun : 2.240 km/tahun
   = Rp. 13.281,-/ km

Sehingga diperoleh Biaya Tidak Tetap (BTT) sesuai tabel berikut ini :

Tabel Perhitungan Biaya Tidak Tetap

Rute	Biaya (Rp) / Tahun	Biaya (Rp) km / tahun
Rute 1	Rp 60,530,249.60	Rp 27,022.43
Rute 2	Rp 60,367,109.00	Rp 28,746.24
Rute 3	Rp 60,040,827.80	Rp 32,989.47
Rute 4	Rp 61,019,671.40	Rp 22,939.73
Rute 5	Rp 59,877,687.20	Rp 35,641.48
Rute 6	Rp 59,796,116.90	Rp 37,140.45
Rute 7	Rp 60,611,819.90	Rp 26,238.88

4.3. Perhitungan Biaya Overhead

Berdasarkan dari hasil survey biaya overhead tidak terlalu diperhatikan atau diperhitungkan tapi terkadang juga ada pengeluaran untuk biaya lainnya seperti biaya perbaikan kantor dan administrasi, biaya pengelolaan dan lain-lain. Pada umumnya biaya overhead ditentukan sebesar 20-25% dari jumlah biaya tetap dan biaya tidak tetap. Dalam hal ini biaya overhead ditentukan sebanyak 20% dari jumlah biaya tetap dan biaya tidak tetap.

1. Biaya Overhead pertahun

   = (BT + BTT) x 20 %

Tabel Perhitungan Biaya Overhead

Rute	Biaya Overhead / Tahun		Biaya Overhead / Km	
Rute 1	Rp	34,835,049.92	Rp	15,551.36
Rute 2	Rp	34,802,421.80	Rp	16,572.58
Rute 3	Rp	34,737,165.56	Rp	19,086.35
Rute 4	Rp	34,932,934.28	Rp	13,132.68
Rute 5	Rp	34,704,537.44	Rp	20,657.46
Rute 6	Rp	34,688,223.38	Rp	21,545.48
Rute 7	Rp	34,851,363.98	Rp	15,087.17

4.4. Perhitungan Biaya Operasional Kendaraan

Dari analisis biaya-biaya tersebut maka diperoleh total Biaya Operasional Kendaraan (BOK) untuk truk adalah :

1. BOK pertahun truk

   = BT + BTT + BOV

   Berdasarkan hasil perhitungan BOK sebelumnya maka diperoleh hasil sesuai tabel berikut.

Tabel Perhitungan Tarif BOK

Rute	biaya / tahun		biaya / km	
Rute 1	Rp	209,010,299.52	Rp	93,308.17
Rute 2	Rp	208,814,530.80	Rp	99,435.49
Rute 3	Rp	208,422,993.36	Rp	114,518.13
Rute 4	Rp	209,597,605.68	Rp	78,796.09
Rute 5	Rp	208,227,224.64	Rp	123,944.78
Rute 6	Rp	208,129,340.28	Rp	129,272.88
Rute 7	Rp	209,108,183.88	Rp	90,523.02
Total	Rp	1,461,310,178.16	Rp	729,798.56
Rata-rata	**Rp**	**208,758,596.88**	**Rp**	**104,256.94**

5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan terhadap Analisis Distribusi Angkutan Barang Retail Di Kabupaten Bandung dengan Studi Kasus Gudang Alfamart Lagadar, dapat ditarik kesimpulan Dimana hasil perhitungan biaya operasional kendaraan truk alfamart untuk semua rute yaitu, 1) Rute 1 dengan BOK per tahun sebesar Rp. 209.010.299,52 dan BOK per km sebesar Rp. 93.308,17; 2) Rute 2 dengan BOK per tahun sebesar Rp. 208.814.530,80 dan BOK per km sebesar Rp. 99.435,49; 3) Rute 3 dengan BOK per tahun sebesar Rp. 208.422.993,36 dan BOK per km sebesar Rp. 114.518,13; 4) Rute 4 dengan BOK per tahun sebesar Rp. 209.597.605,68 dan BOK per km sebesar Rp. 78.796,09; 5) Rute 5 dengan BOK per tahun sebesar Rp. 208.227.224,64 dan BOK per k sebesar Rp. 123.944,78; 6) Rute 6 dengan BOK per tahun sebesar Rp. 208.129.340,28 dan BOK per km sebesar Rp. 129.272,88; Rute 7 dengan BOK per tahun sebesar Rp. 209.108.183,88 dan BOK per km sebesar Rp. 90.523,02.

5.2. Saran

Berdasarkan dari apa yang sudah dibahas pada Kesimpulan, maka rekomendasi dari penelitian ini adalah mengintegrasikan hasil analisis Biaya Operasional Kendaraan bisa menjadi acuan dalam menentukan frekuensi perjalanan dan pemilihan armada yang lebih efisien sehingga Perusahaan bisa mengurangi Biaya Operasional dan meningkatkan Profit Perusahaan tanpa menurunkan kualitas pelayanan.

References

[1] Anonim, (1999) Rekayasa Lalu Lintas Pedoman Perancanaan Dan Pengoperasian Lalu Lintas Di Wilayah Perkotaan, Drektorat Bina Sistem Lalu Lintas Dan Angkutan Kota Direktorat Jendral Perhubungan, Jakarta.

[2] Brannen, Julia. (2005) Memandu Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

[3] Bungin, Burhan. M. (2005) Metodologi Penelitian Kuantitatif: Komunikasi, Ekonomi, dan Kebijakan Publik serta Ilmu-Ilmu Sosial lainnya. Jakarta: Kencana Prenada Media Group

[4] Danial, Endang dan Nanan Wasriah. (2009) Metode Penulisan Karya Ilmiah. Babndung: Laboratorium Pendidikan

Kewarganegaraan.

[5] Morlok, E.K. (1993) Pengantar Teknik Dan Perancanaan Transportasi. Jakarta: Erlangga.

[6] Saleh, K.W (1992) Undang-Undang Lalu Lintas Dan Angkutan Jalan Serta Peraturan Dan Pelaksanaannya, Indonesia: Peerbit Ghalia .

[7] Setijowarno, D. & R.B. Frazila. 2001. *Pengantar Sistem Transportasi*. Semarang: Universitas Katolik Soegijapranata

[8] Setijowarno, D. 2003. Dinamika Transportasi. Semarang: Penerbitan Universitas Katolik Soegijapranata

[9] Sormin, T. (2011) Analisa Kinerja Angkutan Umum Pedesaan-Perkotaan (Studi Kasus: Kec Sunggal Kab. Deli Serdang- Kota Medan), Tugas Akhir, Universitas Sumatera Utara, Medan

[10] Sudjana, B., & Hergesell, A. (2008). Biaya Transportasi Barang Angkutan, Regulasi, dan Pungutan Jalan di Indonesia (ISBN 978-979-16123-5-7 ed.). Jakarta: The Asia Foundation.

[11] Warpani, S. (2008) Pengolahan Lalu Lintas Dan Angkutan Jalan, Bandung: Penerbit ITB.

[12] Warpani, S. (1990) Merencanakan Sistem Pengangkutan , Bandung: Penerbit ITB.

ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN DAN SOSIAL DARI ERUPSI GUNUNG MERAPI DI SUMATERA BARAT

Leli Honesti[1*], Nur Rizka Badriana[2], Helga Nuri Honesty[3]

[1,2]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Padang, Jl. GajahMada Kandis Nanggalo, Kota Padang*
***e-mail**: leli.honesti@itp.ac.id , bnurrizka@gmail.com*
[3]Program Studi Akuntansi, Universitas Negeri Padang, Jl. Prof. Dr. Hamka, Kota Padang
e-mail: helga.honesti@fe.unp.ac.id

ABSTRAK

Erupsi Gunung Merapi di Sumatera Barat memiliki dampak yang signifikan terhadap lingkungan dan sosial di sekitarnya. Erupsi Gunung Merapi menyebabkan kerusakan ekosistem hutan, pencemaran udara oleh abu vulkanik, serta gangguan terhadap kualitas air sungai. Selain itu, dampak sosial yang signifikan meliputi evakuasi massal, kerugian ekonomi, dan perubahan pola kehidupan masyarakat. Tulisan ini menganalisis bahwa respon dan mitigasi bencana yang dilakukan oleh pemerintah setempat masih memerlukan perbaikan, terutama dalam hal koordinasi dan kesiapsiagaan masyarakat. Meskipun telah ada upaya mitigasi, koordinasi dan kesiapsiagaan masyarakat dan pemerintah masih perlu ditingkatkan. Peningkatan edukasi masyarakat tentang kesiapsiagaan bencana, penguatan sistem peringatan dini, dan pengembangan kebijakan rehabilitasi lingkungan pasca-erupsi. Dengan memahami dampak-dampak ini, diharapkan langkah-langkah mitigasi dan adaptasi dapat lebih efektif diterapkan untuk meminimalisir dampak negatif di masa mendatang.

Kata kunci: Dampak, Lingkungan, Sosial, Erupsi, Gunung Merapi.

1. PENDAHULUAN

Secara geologis, sebagian besar wilayah Indonesia sangat rawan terhadap bencana alam. Hal ini karena Indonesia merupakan tempat bertemunya dua kelompok pegunungan muda dunia: Cincin Pasifik (pegunungan terlipat yang mengelilingi Samudera Pasifik) dan Cincin Mediterania (pegunungan terlipat yang membentang dari Pegunungan Atlas di Afrika Utara hingga Nicobar Kepulauan) dan masuk ke Indonesia. Itulah sebabnya Indonesia mempunyai bentukan alam yang begitu indah. Kepulauan Indonesia meliputi pegunungan luas di sisi barat dan selatan, serta lembah, tebing terjal, ngarai, dan pulau-pulau. Selain itu, Indonesia memiliki cadangan mineral yang kaya karena letak geologisnya (Yusutria, Nefilinda and Febriana, 2018, p. 1).

Karena pertemuan tiga lempeng besar: lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik, Indonesia termasuk dalam Cincin Api Pasifik dunia, wilayah yang sering dilanda gempa bumi dan letusan gunung berapi. Menurut Direktur Pusat Data Informasi dan Humas BNPB Sutopo Purwo Nugroho, tren bencana alam di seluruh dunia meningkat 350 kali dalam 30 tahun terakhir. Peningkatan ini terutama terlihat pada bencana hidrometeorologi, yaitu bencana yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca seperti banjir, tanah longsor, angin puting beliung, dan kekeringan. Sebanyak 80 bencana serupa telah terjadi di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh perubahan lingkungan, termasuk perubahan iklim global, dan faktor lokal. (Yusutria, Nefilinda and Febriana, 2018, pp. 1–2).

Hasil dari kegiatan tersebut adalah :

Pertama, gempa bumi. Gempa bumi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gempa vulkanik dan gempa tektonik. Gempa bumi vulkanik disebabkan oleh aktivitas gunung berapi, sedangkan gempa tektonik disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik. Misalnya gempa Yogyakarta yang berkekuatan 5,9 skala richter. Pergerakan relatif ketiga lempeng tersebut dan dua lempeng lainnya yaitu Laut Filipina dan Laut Carolina menyebabkan terjadinya gempa bumi di daerah batas lempeng sehingga menyebabkan terbentuknya sesar regional yang menjadi episentrum gempa bumi. (Imarotul Mufriha, 2014, 91).

Kedua, tsunami ditimbulkan oleh aktivitas lempeng di dasar laut yang menyebabkan terjadinya gelombang pasang di lautan. Karena Indonesia merupakan negara kepulauan, maka terdapat risiko tsunami jika terjadi gempa tektonik. Contoh: Tsunami di Aceh disebabkan oleh gempa tektonik berkekuatan 9,3 SR yang terjadi di bawah laut. Dampaknya adalah tsunami setinggi 30 meter.

Ketiga, gunung berapi akan meletus. Hal ini disebabkan oleh aktivitas magma di dalam bumi. Indonesia memiliki 129 gunung berapi, yang merupakan 13 dari seluruh gunung berapi di dunia. Indonesia memiliki banyak gunung berapi karena negara ini terletak di Cincin Api Pasifik, zona tumbukan lempeng tektonik. (Yusutria, Nefilinda and Febriana, 2018, p. 2).

Gunung Merapi di Sumatera Barat merupakan salah satu gunung berapi teraktif di Indonesia, dengan sejarah letusan panjang yang memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar. Indonesia merupakan wilayah rawan bencana (Yanuarto, Utomo and Pinuji, 2019). Letusan gunung berapi ini tidak hanya mengancam keselamatan jiwa, namun juga menimbulkan kerusakan ekologi, rusaknya kualitas udara dan air, serta dampak sosial ekonomi yang meluas. Kondisi geografis dan geologi Sumatera Barat yang rawan terhadap aktivitas gunung berapi, menyebabkan wilayah tersebut sering menghadapi tantangan besar dalam mitigasi dan penanggulangan bencana. Meski berbagai upaya telah dilakukan untuk meminimalisir dampak negatif epidemi

tersebut, namun kenyataan di lapangan menunjukkan masih banyak masyarakat yang belum sepenuhnya siap menghadapi ancaman tersebut.

Tujuan artikel ini adalah untuk memberikan analisis komprehensif mengenai dampak lingkungan dan sosial akibat letusan Gunung Merapi di Sumatera Barat. Melalui pendekatan multidisiplin yang menggabungkan aspek geologi, lingkungan dan sosial-ekonomi, studi ini memberikan gambaran dampak yang komprehensif, serta rekomendasi untuk meningkatkan pengurangan risiko bencana dan strategi tanggap bencana. Studi ini berfokus pada beberapa aspek kunci, termasuk kerusakan ekosistem hutan, pencemaran udara oleh abu vulkanik, gangguan terhadap kualitas air, evakuasi massal, kerugian ekonomi, dan perubahan pola kehidupan masyarakat. Selain itu, penelitian ini juga akan mengevaluasi respon dan kesiapsiagaan pemerintah serta masyarakat setempat dalam menghadapi erupsi, dengan tujuan untuk mengidentifikasi kelemahan dan peluang perbaikan di masa mendatang.

Dengan memahami dampak lingkungan dan sosial dari erupsi Gunung Merapi secara mendalam, diharapkan hasil penelitian ini dapat berkontribusi pada pengembangan kebijakan dan strategi yang lebih efektif dalam mengurangi risiko dan dampak negatif dari bencana vulkanik di Sumatera Barat.

2. METODOLOGI

Metode penelitian adalah “cara peneliti merancang, melakukan, mengolah data, dan menarik kesimpulan sehubungan dengan pertanyaan penelitian tertentu”. Penelitian deskriptif merupakan suatu metode yang bertujuan untuk menggambarkan fenomena-fenomena yang ada, baik fenomena yang terjadi saat ini maupun fenomena yang pernah terjadi di masa lalu. Menurut Furchan, penelitian deskriptif mempunyai ciri-ciri sebagai berikut: Pertama, penelitian ini cenderung mendeskripsikan fenomena secara sistematis dan teliti, dengan objektivitas sebagai prioritas utama, dan dilakukan dengan hati-hati. Kedua, tidak ada perlakuan atau pengendalian yang diterapkan dan tidak ada pengujian hipotesis yang dilakukan. Menurut Ronny Kountur, penelitian deskriptif saat ini mempunyai ciri-ciri sebagai berikut: Pertama, terkait dengan situasi saat ini. Selanjutnya, tulis satu atau lebih variabel satu per satu. Ketiga, variabel yang diteliti tidak dimanipulasi atau perlakuan diterapkan (Kountur, 2003, p. 76).

Metodologi penelitian adalah bidang keilmuan yang mempelajari metode yang tepat untuk melakukan penelitian ilmiah. Penelitian ilmiah merupakan suatu kegiatan yang dilakukan menurut kaidah-kaidah yang ketat dan bertujuan untuk menghasilkan pengetahuan baru yang pada akhirnya merupakan ilmu pengetahuan. Sains sendiri merupakan upaya multidimensi dan dapat didefinisikan dengan banyak cara, namun setiap definisi memiliki keterbatasan. Ada pula yang menekankan pentingnya pola pikir, atau sikap ilmiah, sebagai ciri utama ilmu pengetahuan. . (Almasdi Syahza, 2021, p. 21).

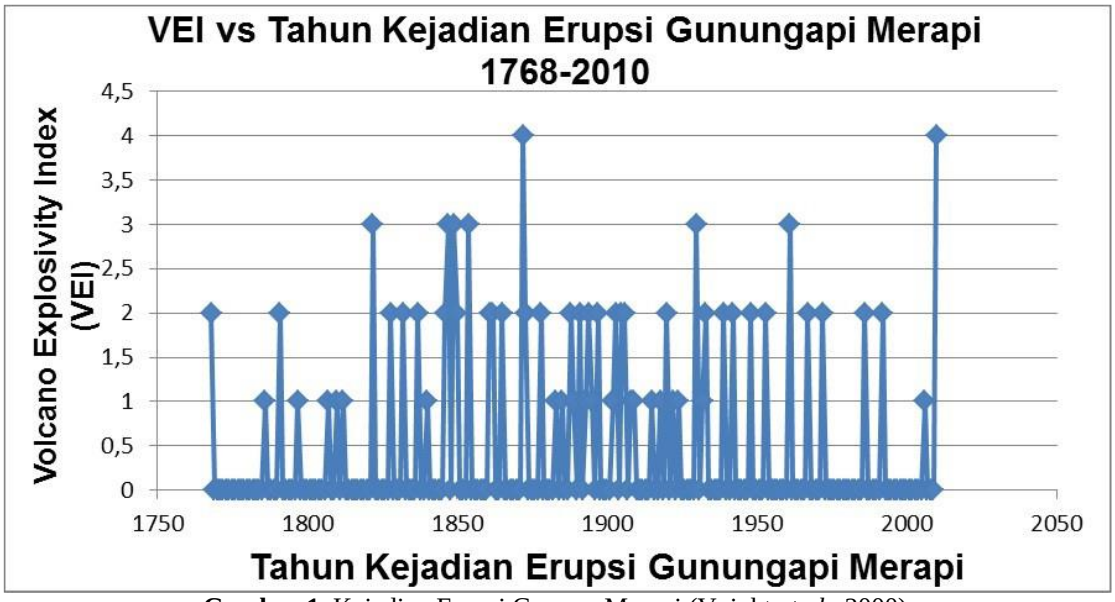
Metode penulisan artikel ini adalah kualitatif deskriptif, yaitu data yang dikumpulkan berbentuk kata-kata, gambar, bukan angka-angka (Danim, 2002, p. 51). Menurut Bogdan dan Taylor, sebagaimana yang dikutip oleh Lexy J. Moleong, penelitian kualitatif adalah prosedur penelitian yang menghasilkan data deskriptif berupa kata-kata tertulis atau lisan dari orang-orang dan perilaku yang diamati (Moleong, 2000, p. 3). Sedangkan penelitian deskriptif adalah suatu bentuk penelitian yang bertujuan untuk mendeskripsikan atau menjelaskan fenomena-fenomena yang ada, baik yang bersifat alami maupun ergonomis (Moleong, 2000, p. 17).

3. HASIL ANALISIS

A. Bencana Gunung Merapi

Bencana Gunung Merapi pada tahun 2000 saja, jumlah orang di seluruh dunia yang tinggal dalam jarak 100 km dari gunung berapi diperkirakan mencapai 500 juta dan diperkirakan akan terus bertambah setiap tahunnya (Smolenaars *et al.*, 2000). Keadaan serupa juga terjadi di Indonesia yang memiliki 129 gunung berapi dan wilayah subur di sekitar gunung tersebut dimanfaatkan sebagai lahan pertanian. Namun, wilayah sekitar gunung berapi berada dalam kondisi yang sangat rentan dan masyarakat tidak siap, sehingga meningkatkan risiko dampak letusan gunung berapi (Marfai *et al.*, 2012).

Gunung Merapi memiliki keunikan pada jenis letusannya yang menghasilkan awan panas, wedus gember dalam bahasa Jawa dan nue al dente dalam terminologi ilmiah (Voight *et al.*, 2000). Selain itu, Voight dkk (2000) menyatakan bahwa Nue Al Dente merupakan bahaya utama yang disebabkan oleh letusan Gunung Merapi, yang terdiri dari unsur gas, batuan, dan abu vulkanik, dan biasanya didahului oleh aliran lava dan aliran lava kubahnya akan runtuh. Namun catatan sejarah menunjukkan bahwa letusan Gunung Merapi seringkali terjadi dengan mekanisme yang berbeda, seperti letusan tahun 1872 dan 2010 (Marfai *et al.*, 2012).



Gambar 1. Kejadian Erupsi Gunung Merapi (Voight *et al.*, 2000).

Gambar di atas menunjukkan letusan Gunung Merapi pada tahun 1768 hingga 2010 dan *Volcanic Explosivity Index* (VEI) setiap letusannya.Rephrase Dari nilai VEI yang ditunjukkan pada gambar di atas, kita mengetahui bahwa letusan eksplosif telah terjadi beberapa kali di masa lalu. Artinya letusan eksplosif mungkin terjadi di masa depan. Selain itu, letusan Merapi juga sering menimbulkan bencana susulan adalah banjir lahar. Catatan yang dikumpulkan dari pertengahan abad ke-15 hingga tahun 2000 menunjukkan bahwa setidaknya 32 dari 61 letusan mengakibatkan banjir lahar (Lavigne *et al.*, 2000).

Gunung Marapi di Sumatera Barat telah mengalami beberapa kali erupsi sepanjang tahun 2024, yang mengakibatkan kerusakan signifikan dan menimbulkan ancaman bagi penduduk setempat. Erupsi terbaru terjadi pada tanggal 14 Januari 2024, dengan dua letusan yang memuntahkan abu vulkanik hingga 1.300 meter ke udara. Selain erupsi, bencana banjir lahar dingin juga melanda wilayah tersebut pada bulan Mei 2024. Banjir ini terjadi akibat campuran hujan deras dan material vulkanik dari lereng Gunung Marapi, yang menyebabkan aliran lahar dingin bergerak cepat dan merusak infrastruktur serta pemukiman di sepanjang jalurnya. Banjir lahar dingin tersebut mengakibatkan kerusakan besar dan menelan banyak korban jiwa serta menyebabkan ratusan orang kehilangan tempat tinggal. Korban jiwa akibat banjir lahar dingin pada Mei 2024 mencapai 58 orang, dengan 35 orang masih dinyatakan hilang. Selain itu, lebih dari seribu keluarga terdampak dan banyak infrastruktur rusak, termasuk pemutusan jalur transportasi di beberapa daerah.

B. Mitigasi Bencana Gunung Merapi

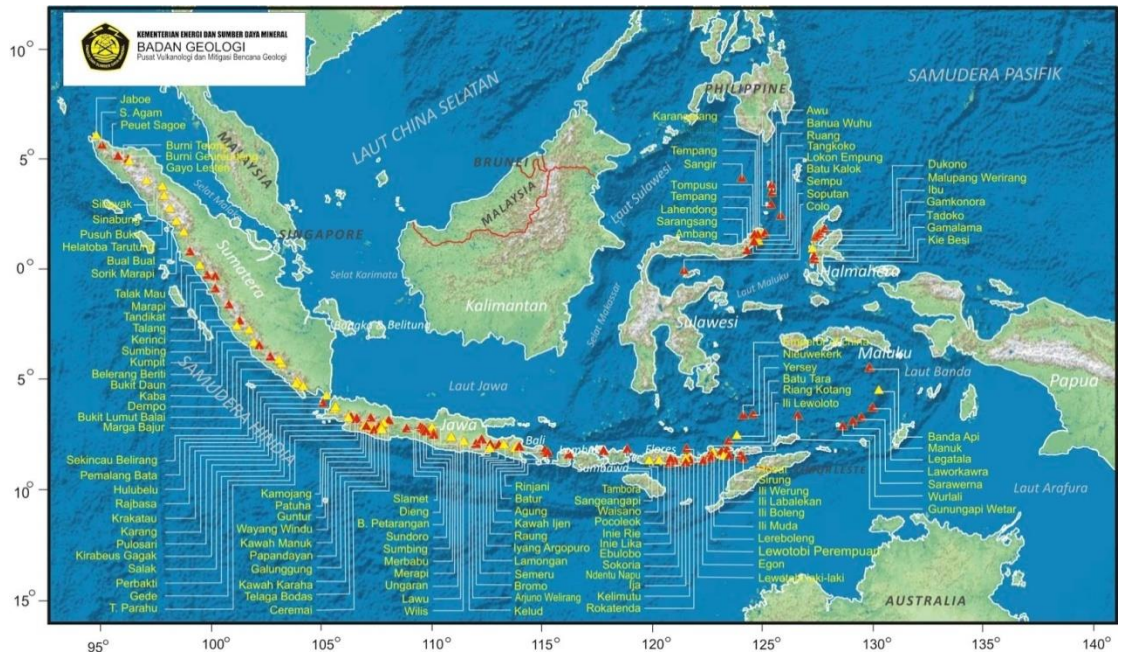
Salah satu bencana yang sering terjadi di Indonesia adalah letusan gunung berapi. Letusan gunung berapi merupakan bagian dari aktivitas gunung berapi yang disebut letusan. Bahaya letusan gunung berapi dapat diwujudkan dalam bentuk awan panas, semburan api, abu dalam jumlah besar, lahar, gas beracun, tsunami, dan banjir lahar. Ciri-ciri letusan gunung berapi antara lain peningkatan suhu di sekitar gunung, menipisnya mata air, bunyi gedebuk yang sering disertai getaran (gempa bumi), layunya tumbuhan di sekitar gunung, dan pergerakan hewan di sekitar gunung(Nakoe and Lalu, 2022, p. 45).

Berdasarkan ciri-ciri di atas, sebagian besar wilayah kepulauan Indonesia mempunyai gunung berapi aktif, yang dapat diidentifikasi pada peta sebagai berikut:



Gambar 2. Wilayah NKRI yang Memiliki Gunung Merapi (Pratama, 2023).

Penanggulangan dan pencegahan jatuhnya korban pasca wabah memerlukan tindakan dan upaya perbaikan dari berbagai sektor, termasuk sektor kesehatan. Tujuan dari inisiatif ini adalah untuk mengurangi risiko bencana dengan mengambil tindakan untuk meminimalkan korban jiwa dan kerusakan harta benda pada saat terjadi bencana. Inisiatif kesehatan sedang dilaksanakan oleh pemerintah dan organisasi non-pemerintah. Namun upaya pemberian layanan dapat terhambat jika masyarakat terdampak bencana tidak bekerja sama secara terkoordinasi. Oleh karena itu, seluruh upaya harus terkoordinasi agar dapat berjalan secara sinergis dan memberikan dampak maksimal terhadap masyarakat terdampak. Letusan gunung berapi telah menimbulkan korban jiwa, pengungsi, dan kerusakan fasilitas umum. Dampak-dampak ini memerlukan upaya terkoordinasi dari semua sektor, termasuk kesehatan. (Nakoe and Lalu, 2022, p. 47).



Gambar 3. Peta Persebaran Gunung Merapi di Indonesia (Pratama, 2023).

Hal terpenting dalam kesiapsiagaan bencana adalah meminimalkan kerusakan. Upaya mitigasi dilakukan untuk mengurangi dampak dan kerusakan akibat bencana terhadap manusia, infrastruktur, dan lingkungan. Mitigasi bencana adalah upaya pencegahan bencana. Pencegahan bencana adalah serangkaian tindakan yang dilakukan oleh pihak-pihak yang rentan terhadap bencana untuk mengurangi atau menghilangkan risiko bencana. Kesiapsiagaan bencana merupakan serangkaian upaya untuk mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik dan penyadaran, maupun melalui peningkatan kemampuan mengatasi ancaman bencana. Kesiapsiagaan bencana adalah tindakan yang dilakukan untuk mengurangi dampak suatu bencana atau hilangnya nyawa dan harta benda pada saat terjadi bencana. Penanggulangan bencana yang dilaksanakan oleh pemerintah berfokus pada aspek ekonomi dan politik dalam tanggap darurat, dengan mengabaikan faktor budaya. Kebijakan pemerintah ini menjadi pemicu masyarakat tidak siap menghadapi bencana. Dalam siklus penanggulangan bencana, pengurangan risiko bencana (mitigasi) merupakan aspek penting yang merupakan bagian integral dari penanggulangan bencana (tanggap darurat, pemulihan, dan rekonstruksi) (Salawane, Rusilowati and Indriyanti, 2008).

Letusan gunung berapi merupakan bagian dari aktivitas gunung berapi yang disebut “letusan”. Hampir semua aktivitas vulkanik berhubungan dengan zona seismik aktif. Karena berkaitan dengan batas lempeng. Perubahan tekanan dan suhu yang sangat tinggi terjadi pada batas lempeng ini, melelehkan material di sekitarnya menjadi cairan pijar yang disebut magma. Magma ini kemudian meresap melalui celah-celah tersebut ke batuan dan tanah di sekitarnya hingga mendekati permukaan bumi (Juhadi and Herlina, 2020, p. 35).

1. Sebelum bencana (Pra Bencana)
    a. Untuk keperluan pemantauan, aktivitas gunung api dipantau 24 jam sehari dengan menggunakan alat perekam seismik (*seismograf*). Data pemantauan harian dikirimkan ke kantor Pusat Mitigasi Bencana Gunung Api dan Geologi (PVMBG) melalui komunikasi radio SSB. Staf observatorium gunung berapi menyerahkan laporan bulanan kepada pemerintah daerah.



Gambar 4. Seismograf (Juhadi and Herlina, 2020).

b. Upaya yang dilakukan ketika aktivitas gunung api meningkat antara lain melakukan evaluasi laporan dan data (PVMBG), membentuk tim tanggap darurat, menurunkan tim ke lokasi kejadian, dan melakukan inspeksi terpadu.
c. Peta wilayah risiko bencana gunung berapi menjelaskan jenis dan karakteristik gunung berapi, wilayah risiko bencana, petunjuk penyelamatan sukarela, tempat evakuasi, pangkalan pencegahan bencana, dan lain-lain.
d. Berbagai metode geosains digunakan untuk mempelajari gunung berapi.
e. Sosialisasi kepada pemerintah daerah dan masyarakat, khususnya masyarakat yang tinggal di sekitar gunung berapi.Bentuk sosialisasinya antara lain memberikan informasi kepada pemerintah daerah dan memberikan penyuluhan langsung kepada masyarakat (Juhadi and Herlina, 2020, p. 36).

2. Saat terjadi bencana
   a. Hindari daerah rawan bencana seperti lereng gunung, lembah, dan cekungan lahar.
   b. Di area terbuka, lindungi diri dari jatuhnya abu letusan gunung berapi.
   c. Jangan memakai lensa kontak.
   d. Menutup mulut dan hidung dengan masker atau kain.
   e. Memakai pakaian pelindung seperti baju lengan panjang, celana panjang, dan topi (Juhadi and Herlina, 2020, p. 36).

Mitigasi bencana di Gunung Marapi, Sumatera Barat, melibatkan beberapa langkah penting untuk mengurangi risiko dan dampak dari aktivitas vulkanik serta bencana terkait seperti banjir lahar dingin. Berikut adalah beberapa upaya mitigasi yang dilakukan:

1. Pemantauan dan Peringatan Dini:
   Pusat Vulkanologi dan Pengurangan Risiko Bencana Geologi (PVMBG) terus memantau aktivitas Gunung Marapi menggunakan seismometer, video surveilans, dan alat pemantauan lainnya. Data hasil pemantauan ini akan digunakan untuk memberikan peringatan dini kepada masyarakat setempat jika terjadi peningkatan aktivitas gunung berapi.
2. Zona Bahaya:
   Penetapan zona bahaya di sekitar kawah Gunung Marapi, biasanya dalam radius 3-4,5 km dari puncak. Masyarakat, pendaki, dan wisatawan dilarang memasuki zona ini untuk menghindari risiko terkena letusan mendadak atau material vulkanik lainnya.
3. Evakuasi:
   Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) dan Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) memiliki rencana evakuasi yang jelas dan terkoordinasi untuk memindahkan warga dari daerah berisiko tinggi ke lokasi yang lebih aman. Tempat evakuasi darurat juga telah disiapkan untuk menampung pengungsi (tirto.id).
4. Infrastruktur Tahan Bencana:
   Pembangunan dan perbaikan infrastruktur seperti jembatan, jalan, dan bangunan di daerah rawan bencana dengan mempertimbangkan ketahanan terhadap bencana alam, termasuk banjir lahar dingin dan gempa bumi (tirto.id).
5. Pendidikan dan Sosialisasi:
   Melibatkan dan mengedukasi masyarakat tentang tindakan yang harus dilakukan jika terjadi letusan atau banjir lahar dingin. Di antaranya penggunaan masker untuk melindungi diri dari abu vulkanik, prosedur evakuasi, memastikan air bersih, dan membersihkan atap rumah yang tertutup abu vulkanik tebal.
6. Penggunaan Teknologi:
   Penggunaan teknologi terbaru dalam pemantauan gunung api dan analisis data untuk meningkatkan akurasi prediksi erupsi dan efektivitas respon bencana. Ini juga termasuk sistem peringatan dini yang dapat menyebarkan informasi secara cepat kepada masyarakat (Kompas Regional).

Dengan langkah-langkah ini, diharapkan risiko dan dampak dari bencana Gunung Marapi dapat diminimalisir, sehingga keselamatan dan kesejahteraan masyarakat sekitar tetap terjaga.

C. Dampak Lingkungan & Sosial dari Erupsi Gunung Merapi di Sumatera Barat

Berbicara mengenai bencana alam di Indonesia, ada beberapa daerah di Indonesia yang sering mengalami bencana gempa, banjir, dan tanah longsor. Daerah-daerah tersebut mempunyai ciri khas yaitu rawan terhadap bencana alam. Menurut ahli geologi Lono Satrio dari Ikatan Ahli Geologi Indonesia (IAGI), daerah yang sering terjadi bencana gempa di Indonesia adalah: Aceh, Sumatera Utara, Sumatera Barat, Bengkulu, Lampung, Jawa Barat, Jawa Timur, Bali,; Nusa Tenggara, Sulawesi, Kepulauan Maluku, dan Papua (Pramono *et al.*, 2019, p. 17).

Sumatera Barat merupakan salah satu provinsi yang rawan terhadap gempa bumi. Selain gempa bumi, masih banyak bencana alam lain yang terjadi di Sumatera Barat dan tercatat dalam ingatan kolektif masyarakat setempat, seperti banjir Tal yang tercatat dalam naskah-naskah yang dibahas pada periode sebelumnya. Mengenai bencana alam berupa gempa bumi di Sumatera Barat, menurut catatan tertua, gempa tertua terjadi di Padang pada tahun 1822, dengan gempa kuat yang pusat gempanya berada di antara Gunung Talang dan Gunung Merapi yang disusul dengan suara gemuruh bahwa hal ini telah terjadi, namun belum ada laporan rinci. Hal ini menyebabkan kerusakan besar dan banyak korban jiwa. Kemudian pada tanggal 28 Juni 1926 terjadi gempa Padang Panjang berkekuatan 7,8 SR. Dampak gempa ini merenggut lebih dari 354 korban jiwa. Gempa bumi juga menyebabkan kerusakan parah pada Danau Singkarak di Bukittinggi dan di Danau Maninjau, Kabupaten Solo, Danau Sawa Lund, dan Danau Longarahan. Selanjutnya terjadi gempa bumi pada bulan Februari 2004 dan gempa dahsyat terjadi pada tahun 2009 yang memakan banyak korban jiwa dan menghancurkan bangunan (Pramono *et al.*, 2019, pp. 90–91).

Gunung Merapi di Sumatera Barat merupakan salah satu gunung berapi teraktif di Indonesia. Aktivitas vulkanik yang sering dan intens telah menimbulkan ancaman serius terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar, dengan dampak yang luas tidak hanya terhadap ekosistem dan keanekaragaman hayati, namun juga terhadap kehidupan sosial-ekonomi penduduk setempat.

Dari perspektif lingkungan, erupsi Gunung Merapi menyebabkan kerusakan besar pada ekosistem hutan di sekitarnya. Abu vulkanik yang menyebar ke area luas dapat merusak vegetasi, mencemari air sungai, dan mengganggu kualitas udara. Selain itu, aliran lava dan lahar dingin dapat menghancurkan habitat flora dan fauna, menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati. Dampak-dampak ini tidak hanya bersifat sementara, tetapi juga dapat memiliki konsekuensi jangka panjang yang mempengaruhi keseimbangan ekosistem.

Dampak sosial dari letusan Gunung Merapi juga tidak kalah signifikannya. Masyarakat yang tinggal di sekitar gunung berapi menghadapi evakuasi massal, kehilangan tempat berlindung, dan kerugian ekonomi yang besar. Kehidupan sehari-hari mereka terganggu dan mereka harus beradaptasi dengan situasi baru yang seringkali tidak menentu. Selain itu, epidemi ini menyebabkan tekanan psikologis dan trauma bagi mereka yang terkena dampaknya, terutama mereka yang kehilangan keluarga dan harta benda.

4. KESIMPULAN

Erupsi Gunung Merapi di Sumatera Barat memiliki dampak yang luas dan signifikan terhadap lingkungan dan sosial masyarakat di sekitarnya. Dari analisis yang dilakukan, beberapa kesimpulan utama dapat ditarik:

1. Dampak Lingkungan:
   a. Kerusakan Ekosistem: Erupsi menyebabkan kerusakan parah pada ekosistem hutan di sekitar Gunung Merapi, dengan banyaknya vegetasi yang hancur akibat aliran lava dan abu vulkanik.
   b. Pencemaran Udara dan Air: Abu vulkanik yang menyebar menyebabkan penurunan kualitas udara dan pencemaran air sungai, yang berdampak negatif pada kesehatan manusia dan kelangsungan hidup flora dan fauna.
   c. Gangguan Keanekaragaman Hayati: Habitat bagi berbagai spesies terganggu, menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati di wilayah terdampak.

2. Dampak Sosial:
   a. Evakuasi dan Dislokasi: Erupsi memaksa ribuan penduduk untuk mengungsi, meninggalkan rumah dan mata pencaharian mereka, yang mengakibatkan dislokasi sosial dan ekonomi.
   b. Kerugian Ekonomi: Banyak masyarakat yang kehilangan sumber penghasilan utama mereka, seperti lahan pertanian dan peternakan, yang hancur oleh aliran lava dan abu.
   c. Tekanan Psikologis: Pengalaman traumatis akibat erupsi menimbulkan tekanan psikologis yang signifikan bagi penduduk, terutama bagi mereka yang kehilangan anggota keluarga atau harta benda.

3. Respon dan Mitigasi:
   a. Kesiapsiagaan dan Koordinasi: Meskipun ada upaya mitigasi dari pemerintah dan lembaga terkait, masih terdapat kekurangan dalam koordinasi dan kesiapsiagaan masyarakat.
   b. Peningkatan Edukasi dan Sistem Peringatan Dini: Diperlukan peningkatan edukasi tentang kesiapsiagaan bencana dan penguatan sistem peringatan dini untuk mengurangi risiko dan dampak dari erupsi di masa mendatang.

Hasil analisis ini memungkinkan kita untuk menyimpulkan bahwa letusan Gunung Merapi tidak hanya memberikan dampak langsung berupa kerusakan fisik, namun juga dapat memberikan dampak jangka panjang terhadap kesejahteraan masyarakat lokal dan kelestarian lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih terintegrasi dan berkesinambungan dalam pengurangan risiko bencana dan pemulihan pandemi. Kajian ini

memberikan dasar untuk mengembangkan kebijakan yang lebih efektif dalam mengatasi ancaman bahaya gunung berapi di Sumatera Barat dan wilayah lain yang memiliki risiko serupa.

DAFTAR PUSTAKA

Almasdi Syahza (2021) *Metodologi Penelitian*. Pekanbaru: UR Press.

Danim, S. (2002) *Menjadi Peneliti Kualitatif Rancangan Metodologi, Presentasi, dan Publikasi Hasil Penelitian untuk Mahasiswa dan Penelitian Pemula Bidang Ilmu Sosial, Pendidikan, dan Humaniora*. Bandung: Remaja Rosdakarya.

Juhadi and Herlina, M. (2020) *Pendidikan Literasi Mitigasi Bencana di Sekolah*. Kudus: PARIST.

Kountur, R. (2003) *Metode Penelitian untuk Penulisan Skripsi dan Tesis*. Jakarta: PPM.

Lavigne, F. *et al.* (2000) 'Lahars at Merapi Volcano, Central Java: An Overview', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, pp. 423–456. Available at: https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00150-5.

Marfai, M.A. *et al.* (2012) 'Sejarah Letusan Gunung Merapi Berdasarkan Fasies Gunungapi Di Daerah Aliran Sungai Bedog, Daerah Istimewa Yogyakarta', *Jurnal RISET Geologi dan Pertambangan*, 22(2), p. 73. Available at: https://doi.org/10.14203/risetgeotam2012.v22.59.

Moleong, L.J. (2000) *Metodologi Penelitian Kualitatif*. Bandung: PT. Remaja Rosdakarya.

Nakoe, M.R. and Lalu, N.A.S. (2022) *Manajemen Bencana*. Tulungagung: UD DUTA SABLON.

Pramono *et al.* (2019) *Peran Kementerian Agama dalam Mitigasi Bencana Alam di Sumatera Barat*. Jakarta: Puslitbang Lektur, Khazanah Keagamaan dan Manajemen Organisasi.

Pratama, D.S. (2023) *Peta Persebaran Gunung Api di Indonesia*. Available at: https://homecare24.id/peta-persebaran-gunung-api-di-indonesia/.

Salawane, C., Rusilowati, A. and Indriyanti, D.R. (2008) 'Prosiding Kolaborasi Sains Asli Masyarakat Dan Sains Ilmiah Untuk Mitigasi Bencana Gunung Merapi Prosiding', pp. 83–88.

Smolenaars, J. *et al.* (2000) 'Human Response to Etna Volcano during the Classical Period', *Geological Society, London, Special Publications*, 171, pp. 179–189. Available at: https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.171.01.14.

Voight, B. *et al.* (2000) 'Historical eruptions of Merapi Volcano, Central Java, Indonesia, 1768–1998', *Journal of Volcanology and Geothermal Research - J VOLCANOL GEOTHERM RES*, 100, pp. 69–138. Available at: https://doi.org/10.1016/S0377-0273(00)00134-7.

Yanuarto, T., Utomo, A.C. and Pinuji, S.E. (2019) *Buku Saku: Tanggap Tangkas Tangguh Menghadapi Bencana*. Edited by T. Yanuarto. Jakarta: Pusat Data, Informasi dan Komunikasi Kebencanaan BNPB.

Yusutria, Nefilinda and Febriana, R. (2018) *Modul Geografi Kebencanaan Berbasis Keimanan*. Padang: CV. Rumahkayu Pustaka Utama.

ANALISIS KOEFISIEN PRODUKTIVITAS TENAGA KERJA PADA PROYEK REKONSTRUKSI JEMBATAN DI KOTA PALU

Fahirah F[*1], Andi Asnudin[1], dan Ahmad Jaelani[2]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia*
***e-mail**: fahirah_fz@yahoo.com*
[1]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Indonesia
[2] Alumni Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,Universitas Tadulako, Palu, Indonesia

ABSTRAK

Proyek rekonstruksi jembatan sebagai upaya untuk memulihkan aksesibilitas dan mobilitas suatu kota atau wilayah yang pernah mengalami bencana. Dalam proses pelaksanaan rekonstruksi jembatan, produktivitas tenaga kerja merupakan salah satu variabel penentu dalam keberhasilan pekerjaan rekonstruksi. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan besar nilai koefisien tenaga kerja dan mengetahui faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja pada pekerjaan pengecoran *pilecap pier* 1 pada proyek rekonstruksi jembatan Palu IV. Penelitian dilakukan melalui pengumpulan data primer dan data sekunder. Data primer melalui survey langsung ke lapangan dan interview (wawancara) dengan pihak yang terkait dengan proyek rekonstruksi. Survey dilakukan selama 6 hari dengan jangka waktu 8 jam s/d 10 jam perhari. Pengolahan data dengan menghitung koefisien produktivitas tenaga kerja dan analisis deskriptif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien produktivitas tenaga kerja pengecoran *pilecap pier* 1 mandor adalah 0.0509 dan pekerja 0.2546 dengan jumlah mandor 1 orang dan pekerja 5 orang, yang jumlah keseluruhan tenaga kerja adalah 6 orang. Faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja yaitu jauhnya *batching plant* ke tempat proyek dengan jarak 16 km sehingga *truck mixer* datang paling banyak sampai 4 *truck* perjam, pengecoran terhambat karena air laut sedang pasang sehingga terjadi genangan air di titik pengecoran.

Kata kunci: koefisien, produktivitas, tenaga kerja, rekonstruksi, jembatan

1. PENDAHULUAN

Tenaga kerja konstruksi merupakan bagian dari pelaksanaan konstruksi, maka tenaga konstruksi harus memiliki kemampuan atau kompetensi atau keahlian dalam melaksanakan pekerjaannya. Para pelaksana konstruksi bangunan saat ini diwajibkan untuk memiliki sertifikat keterampilan dan keahlian kerja. Tujuan adanya sertifikat keterampilan dan keahlian kerja yang diharapkan kepada para tenaga kerja konstruksi tidak hanya sekedar mengikuti perintah dalam melakukan tugasnya namun juga dapat melakukan beberapa hal sebagai berikut (1) Dapat mengatasi masalah ataupun memberikan inovasi, (2) Dapat membuat keputusan disaat keadaan genting, (3) Dapat memperbaiki rancangan perencana yang tidak dapat dikerjakan menjadi dapat dikerjakan.

Pada proses pelaksanaan konstruksi yang menjadi tolak ukur terkait tenaga kerja adalah produktivitas. Produktivitas tenaga kerja sangat mempengaruhi progres suatu pekerjaan atau proyek yang sedang dikerjakan, dan salah satu faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja adalah jumlah tenaga kerja. Ada tiga jenis tenaga kerja dalam pekerjaan pengecoran, yaitu mandor, tukang dan pekerja. Produktivitas tenaga kerja dinyatakan dalam Orang-Jam (OJ) atau Orang-Hari (OH) untuk menghasilkan satu satuan pengukuran pekerjaan tertentu. Pengukuran produktivitas kerja tersebut didasarkan atas waktu siklus yang diukur menggunakan metode *Time and motion study* dengan mengamati gerakan alat berat yang beroperasi, dan/atau gerak para pekerja dan produknya pada setiap menitnya.

Menurut Permen PUPR, koefisien tenaga kerja adalah jumlah atau kuantitas jam kerja per satu satuan pengukuran. Koefisien ini adalah faktor yang menunjukkan lamanya pelaksanaan dari tenaga kerja yang diperlukan untuk menyelesaikan satu satuan volume pekerjaan tertentu. Faktor yang mempengaruhi koefisien Tenaga Kerja antara lain jumlah tenaga kerja dan tingkat keahlian tenaga kerja. Pengukuran produktivitas dalam gugus kerja tertentu terdiri atas pekerja, tukang, kepala tukang dan mandor. Menurut Hernandi (2020) faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas antara lain 1) Keterampilan dari pekerja 2) Peralatan yang digunakan untuk melakukan pekerjaan, 3) Metode kerja yang digunakan 4) Mutu bahan yang digunakan 5) Lingkungan kerja 6) Fasilitas 7) Umur 8) Pengalaman kerja 9) Pendidikan 10) Kemampuan untuk menulis, membaca, dan memprediksikan dalam perhitungan matematika 11) Status keluarga. Penelitian sebelumnya yang terkait dengan koefisien produktivitas tenaga kerja antara lain Pawellangi (2022), Natalia (2020) dan Setiawan (2020).

Adapun yang menjadi tujuan dari penelitian ini adalah 1) untuk menentukan besar nilai koefisien tenaga kerja

pengecoran *pilecap pier* 1 yang dapat mempengaruhi jumlah tenaga kerja pengecoran *pilecap* sebagai analisa produktivitas pada proyek pekerjaanrekonstruksi jembatan. 2). Mengetahui faktor yang mempengaruhi tenaga kerja pada pekerjaan *pengecoran pilecap pier* 1 di lapangan.

2. PRODUKTIVITAS TENAGA KERJA

Tenaga kerja konstruksi merupakan orang yang bekerja untuk pembangunan pada bidang konstruksi yang memiliki keahlian dan keterampilan.Tenaga Kerja Konstruksi memiliki klasifikasi dan kualifikasi tertentu. Tenaga kerja konstruksi diklasifikasikan berdasarkan bidang keahlian yang terkait Jasa Konstruksi, yaitu (1) Arsitektur, (2) Sipil, (3) Mekanikal, (4) Tata lingkungan, dan (5) Manajemen pelaksanaan.Tenaga kerja konstruksi terbawah yang biasa disebut dengan tukang (*construction craff*) merupakan tenaga kerja yang terlibat dan berhadapan langsung dengan pelaksanaan suatu pekerjaan konstruksi. Sebagai tenaga kerja yang paling terdepan tentu saja tukang sebaiknya memiliki keahlian dan kompetensi pada bidang tertentu dan bersertifikat.

Produktivitas tenaga kerja adalah rasio antara input dan output dimana input diekspresikan sebagai orang-jam (OJ) atau orang-hari (OH), sedangkan output adalah kuantitas hasil kerja yang satuannya bervariasi tergantung jenis pekerjaan yang diukur. Produktifitas biasa di gambarkan dengan angka atau biasa disebut dengan koefisien produktifitas tenaga kerja, yang di dapatkan dengan cara (Basari dkk, 2014) :

$$\text{Koefisien produktifitas pekerja} = \frac{\text{Jumlah Pekerja}}{\text{Produktivitas}} \quad (1)$$

Jumlah pekerja yang terlibat merupakan jumlah dari tenaga kerja yang terlibat dalam pekerjaan pengecoran. Penggolongan tenaga kerja pada pekerjaan pengecoran terdiri atas Mandor, Tukang dan Pekerja. Jumlah Produktivitas yang didapatkan merupakan hasil pembagian volume pekerjaan pengecoran yang didapat dengan berapa lama pengamatan kerja yang dilakukan hari tersebut.

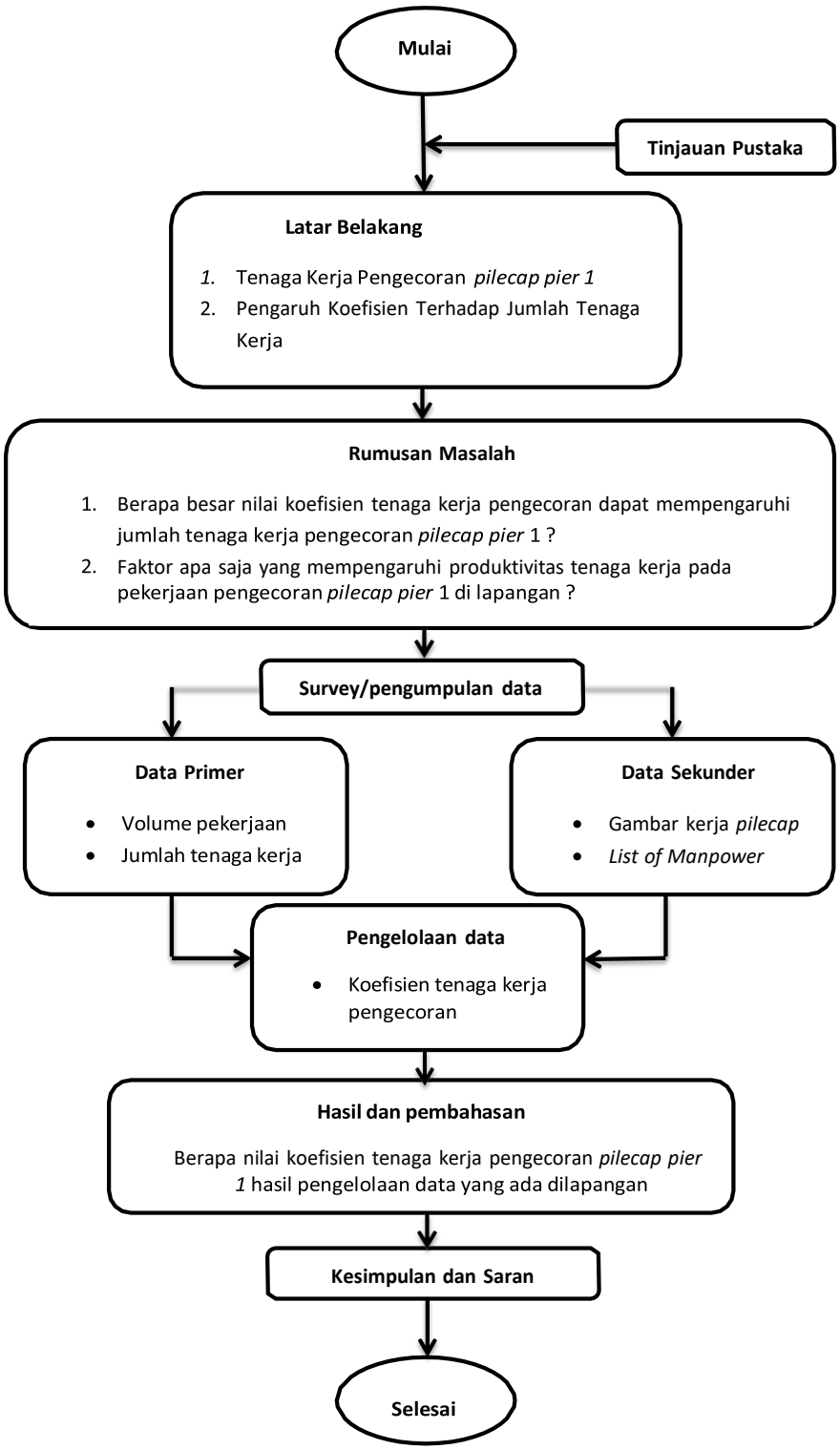
Rekonstruksi Jembatan

Rekonstruksi jembatan merupakan tahap untuk membangun kembali sarana dan prasarana jembatan yang rusak akibat bencana secara lebih baik dan sempurna, sehingga pembangunannya harus dilakukan dengan perencanaan yang baik melalui kajian dari berbagai ahli dan sektor terkait. Kegiatan dalam tahap rekonstruksi jembatan dapat berupa melakukan kajian dan inventarisasi berbagai kerusakan, menyusun rencana pembangunan kembali secara konseptual, terintegrasi, dan berkesinambungan agar hasilnya lebih baik dari keadaan semula (Kurniasari, 2017). Dalam perencanaan teknis jembatan perlu dilakukan identifikasi yang menyangkut beberapa hal antara lain: kondisi tata guna lahan, baik yang ada pada jalan pendukung maupun lokasi jembatan berkaitan dengan ketersediaan lahan yang ada, kelas jembatan yang disesuaikan dengan kelas jalan dan volume lalu lintas, struktur tanah, geologi dan topografi serta kondisi sungai dan perilakunya (Sari, 2016).

Jembatan beton adalah jembatan yang terbuat dari konstruksi beton bertulang atau beton prategang. Salah satu keunggulan jembatan dari konstruksi beton prategang adalah tahan terhadap korosif sehingga tidak perlu pemeliharaan rutin, tetapi di samping memiliki keunggulan, jembatan beton prategang juga memiliki kelemahan diantaranya: sulit melakukan pemeliharaan jika terjadi kerusakan pada bagian struktur dan kurang tahan terhadap gempa (Rangan, 2019). Pekerjaan rekonstruksi jembatan mempunyai lingkup pekerjaan sebagai berikut 1)*Bored Pile* 2) *Pilecap* 3) *Abutment* 4) *Pier* 5) *Box Girder* 6) *Retaining Wall*.

3. METODE PENELITIAN

Pengumpulan data terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer dilakukan melalui survey dan pengamatan untuk mengetahui volume pekerjaan pengecoran serta wawancara (*interview*) dengan pihak yang terkait dengan pelaksanaan pengecoran. Pengamatan dilakukan kepada tenaga kerja pengecoran yang terbagi menjadi tiga jenis, yaitu mandor, tukang, dan pekerja.Data sekunder berupa gambar kerja *pilecap* dan *list of manpower*. Dari data yang telah diperoleh dilanjutkan dengan pengolahan data menggunakan rumus (1), kemudian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan nilai koefisien berdasarkan standar Analisa Harga Satuan Pekerjaa (AHSP) Bina Marga. Proses dari penelitian disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data primer melalui suvey ke lapangan dengan menghitung produktivitas tenaga kerja pekerjaan pengecoran *pilecap pier* 1 pada pembangunan rekonstruksi jembatan Palu IV. Survey dilakukan selama 6 hari yang terdiri atas 2 kelompok kerja dengan masing-masing setiap kelompok kerja terdiri dari 6 orang. Dimensi pada *pilecap pier* 1 dengan panjang17,1 m, lebar 17,1 m dengan ketinggian 4 m. Hasil Rekap Survey disajikan pada Tabel 1. Pada hari pertama telah mengerjakan pegecoran *pilecap pier* 1 sebanyak 228 m^3, hari kedua 180 m^3, hari ketiga 150 m^3, hari keempat 204 m^3, hari kelima 150 m^3 dan hari keenam 246 m^3 dengan total volume pekerjaan sebesar 1,158 m^3 dengan jumlah tenaga kerja sebanyak enam tenaga kerja yang terdiri atas 1 mandor dan 5 pekerja

Tabel 1. Hasil Pengamatan Pekerjaan Pengecoran *Pilecap pier* 1

Hari ke-	(Orang)	(m3)	
pertama	6	228	*Pilecap Pier 1*
kedua	6	180	*Pilecap Pier 1*
ketiga	6	150	*Pilecap Pier 1*
keempat	6	204	*Pilecap Pier 1*
kelima	6	150	*Pilecap Pier 1*
keenam	6	246	*Pilecap Pier 1*
Total		1158	*Pilecap Pier 1*

Berdaasarkan hasil prthitungan dengan menggunakan rumus (1) koefisien produktivitas tenaga kerja pengecoran untuk jenis tenaga kerja Mandor adalah 0.0509 dan pekerja 0.2546 dengan jumlah mandor 1 orang dan pekerja 5 orang, dengan keseluruhan tenaga kerja adalah 6 orang. sedangkan dari koefisien produktivitas tenaga pekerja pengecoran pada Permen PUPR no.8 tahun 2023, AHSP Bina Marga mandor adalah 0,0502, tukang 1,5060 dan pekerja 0,6024, maka didapatkan rata – rata koefisien produktivitas tenaga kerja pengecoran *pilecap pier* 1 dan Permen PUPR Bina Marga disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Koefisien produktivitas tenaga kerja pada pengecoran fc'35 Mpa Permen PUPR dan *pilecap pier* 1 Rekonstruksi Jembatan.

NO.	KOMPONEN	SATUAN	PERKIRAAN KUANTITAS PUPR	PERKIRAAN KUANTITAS PILECAP PIER 1
A.	TENAGA			
1.	Pekerja	Jam	0,6024	0,2546
2.	Tukang	Jam	1,5060	-
3.	Mandor	Jam	0,0502	0,0509

Contoh aktifitas pengecoran *pilecap pier* 1 pada hari pertama disajikan pada gambar 2 dan gambar 3. Gambar 2 menyajikan aktifitas pengecoran pada jam 16.00 s/d 17.00 wita dan gambar 2 menyajikan aktifitas pengecoran pada jam 17.00 s/d 18.00 wita.



Gambar 2. Pengecoran *pilecap pier* 1 jam 16.00 s/d 17.00 wita



Faktor Yang Mempengaruhi Produktivitas Tenaga Kerja

Dalam proses pekerjaan pengecoran ada faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja pada pekerjaan pengecoran *pilecap pier* 1 rekonstruksi jembatan, antara lain:

1) Jarak Antara *Batching Plant*

Adapun lokasi pada *batching plant* yang di gunakan untuk pengecoran *pilecap pier* 1 rekonstruksi jembatan terletak di kelurahan Watusampu, kecamatan Ulujadi, kota Palu. Dimana pada lokasi *batching plant* ke lokasi proyek tersebut mempunyai jarak 16 km dengan waktu tempuh selama 32 menit.

2) Kondisi Lapangan

Adapun kondisi lapangan yang mempengaruhi pengecoran yaitu disaat air laut sedang pasang terjadi genangan air di titik pengecoran, sehingga pengecoran terhambat, maka dilakukan pemasangan pipa untuk mengalirkan genangan air keluar dari titik pengecoran ke lubang utama penampungan air yang akan diresap dengan sistem pompa seperti yang terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. Genangan Air pada Titik Pengecoran

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan maka dapat disimpulkan: 1) Koefisien produktivitas tenaga kerja pengecoran *pilecap pier* 1 mandor adalah 0.0509 dan pekerja 0.2546, dari koefisien produktivitas tenaga kerja pengecoran *pilecap pier* 1 pembangunan rekonstruksi jembatan dengan jumlah mandor 1 orang dan pekerja 5 orang, yang jumlah keseluruhan tenaga kerja adalah 6 orang, sedangkan dari koefisien produktivitas tenaga pekerja pengecoran pada Permen PUPR no.8 tahun 2023, AHSP Bina Marga mandor adalah 0,0502, tukang 1,5060 dan pekerja 0,6024. 2) Faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja pada pekerjaan pengecoran *pilecap pier* 1 rekonstruksi jembatan yaitu jauhnya *batching plant* ke tempat proyek dengan jarak 16 km sehingga truk *mixer* datang paling banyak sampai 4 truk perjam. Faktor yang mempengaruhi produktivitas tenaga kerja juga yaitu disaat air laut sedang pasang terjadi genangan air di titik pengecoran, sehingga pengecoran terhambat.

.

DAFTAR PUSTAKA

Basari, K., Pradipta, R. Y., Hatmoko, J. U. D., & Hidayat, A. (2014). *AnalisaKoefisien Produktivitas Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Pembesian*. Jurnal Karya Teknik Sipil, Volume 3, Nomor 4.

Hernandi, Y. (2020). *Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Produktivitas Pekerja Pada Pelaksanaan Konstruksi Gedung Bertingkat*". Jurnal Mitra Teknik Sipil.

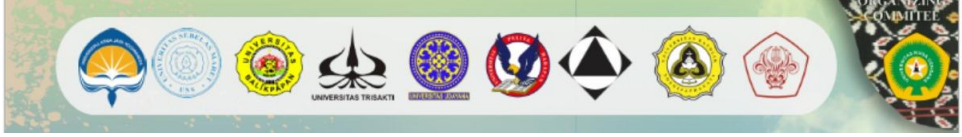
Natalia, Monika. (2020). Perbandingan Produktivitas Tenaga Kerja Dengan menggunakan Metode Time Study Terhadap AHSP SNI 2016. Jurnal Teknik Sipil 6(2):155-166.

Pawellangi, A (2022). Produktivitas Tenaga Kerja Pada Pekerjaan Pembesian (Studi Kasus Pada Pembangunan Gedung Universitas Islam Negri Dato'karama Palu). Skripsi. Universitas Tadulako.

Rangan, P. R. (2019). Perencanaan Jembatan Sungai Mappajang Dengan Jembatan Beton Prategang. *Journal Dynamic Saint*.

Setiawan, Aris (2020). Analisa Perbandingan Produktivitas Tenaga Kerja Aktual pada Pekerjaan Kolom dengan Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP). *Proceeding Sciences and Engineering National Seminar*.Volume 5, No.1, Desember.

Sari, E. (2016). Analisis Resiko Proyek Pada Pekerjaan Jembatan Sidamukti–Kadu di Majalengka Dengan Metode *Fme*a dan *Decision Tree*. *Journal of Engineering and Sustainable Technology*. Volume 2. Nomor 2.


UNIVERSITAS TRISAKTI

ANALISIS *LIFE CYCLE COST* PADA GEDUNG SMP-IT ROBBANI – BANJARBARU

Yustika Aprilia Putri[1], Hendra Cahyadi[2*], Abdurrahman[3], Robiatul Adawiyah[4]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Kalimantan MAB Banjarmasins, Jl. Adhyaksa No. 2, Banjarmasin, 70123
[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Kalimantan MAB Banjarmasins, Jl. Adhyaksa No. 2, Banjarmasin, 70123
**email: irarizqonroyan@gmail.com*
[3]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Kalimantan MAB Banjarmasins, Jl. Adhyaksa No. 2, Banjarmasin, 70123
[,4]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Kalimantan MAB Banjarmasins, Jl. Adhyaksa No. 2, Banjarmasin, 70123

ABSTRAK

Life cycle cost adalah proses untuk menentukan jumlah dari semua biaya yang berhubungan dengan suatu aset atau penggantian aset, Mengelola biaya daur hidup jangka panjang untuk memastikan pelayanan yang konsisten sesuai tujuan dirancang suatu bangunan. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan total biaya siklus hidup atau *Life Cycle Cost* (LCC) untuk masa periodik perawatan 2023-2032 pada bangunan Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru. Dari penelitian ini didapat Biaya siklus hidup Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru untuk tahun 2023-2032 dengan tingkat inflasi 4,44% adalah sebesar Rp. 1.554.097.268,00. Untuk biaya per tahun sebesar Rp. 155.409.727,00 selama 10 tahun. Biaya terbesar selama siklus hdiup Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru untuk tahun 2023-2032 adalah komponen elektrikal sebesar Rp. 82.572.932,00 per tahun atau mencapai 53,132% dari total biaya pemeliharaan. Sedangkan biaya terkecil adalah komponen arsitektur yaitu sebesar Rp. 1.139.025,00 per tahun atau mencapai 0,733% dari total biaya pemeliharaan.

Kata Kunci : Biaya, Siklus Hidup, Bangunan Gedung, Pemeliharaan, Inflasi

1. PENDAHULUAN

Sekolah Menengah Pertama Islam Terpadu Robbani atau yang bisa disebut SMP-IT Robbani adalah bangunan yang dirancang oleh CV. Kusuma Jaya Perkasa terletak di Komplek Mentaos Asri, Kecamatan Banjarbaru Utara, Kota Banjarbaru. Gedung dengan 3 lantai tersebut mulai dibangun secara bertahap pada tahun 2019 dan selesai di tahun 2020.

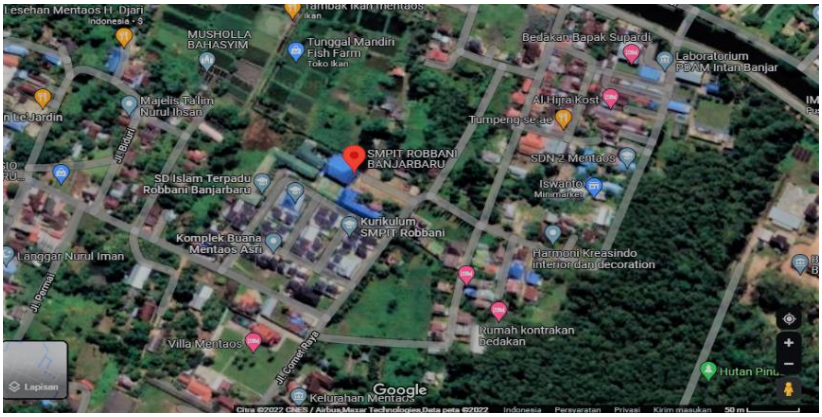
Sekolah Menengah Pertama Islam Terpadu (SMP-IT) Robbani Banjarbaru, didirikan dengan tujuan untuk melayani masyarakat luas terutama dalam dunia pendidikan. Guna memperpanjang kelayakan dan memaksimalkan kinerja sekolah tersebut, maka digunakan salah satu metode untuk menganalisa nilai ekonomis sebuah bangunan dengan mempertimbangkan biaya perawatan sepanjang umur siklus hidup bangunan atau bisa juga disebut dengan istilah metode *life cycle cost*. Metode ini telah dikenal sejak pertengahan tahun 1970 dan di masa sekarang telah diterapkan oleh beberapa negara, oleh perusahaan-perusahaan besar dan proyek-proyek yang disponsori oleh pemerintah. Metode ini juga berguna untuk mengambil keputusan berdasarkan nilai ekonomis dengan mempertimbangkan lokasi, perencanaan teknik dan arsitektur, pembangunan, pengaturan, pengoperasian sampai dengan pembuangan yang diikuti dengan penggantian dari komponen atau sistem selama jangka waktu umur hidup bangunan.

Berdasarkan hal tersebut di atas, maka dilakukan penelitian dengan judul "Analisis Life Cycle Cost Pada Gedung SMP-IT Robbani". Karena dengan penelitian tersebut maka akan didapatkan biaya pemeliharaan sekolah selama jangka waktu tertentu dan untuk mengetahui komponen biaya terbesar dalam pemeliharaan Gedung SMP-IT Robbani

2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian

Penelitian ini berlokasi di Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru Komplek Mentaos Asri, Kecamatan Banjarbaru Utara, Kota Banjarbaru. Lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

(Sumber Google Maps)



Gambar 2. Gedung SMP-IT Robbani

(Sumber : Dokumentasi Pribadi)

Tahap persiapan

Tahap persiapan ditunjukan melalui langkah-langkah berikut :

1. Studi literatur. Merupakan pencarian informasi dari berbagai sumber yang relevan, yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan.
2. Survey lapangan. Kegiatan ini bertujuan untuk mengumpulkan data data lapangan di lokasi penelitian. Kegiatan ini dilakukan saat melakukan survey pada Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru.

Tahap pengumpulan data

Tahap pengumpulan data merupakan proses mendapatkan data-data yang diperlukan untuk dapat melakukan penelitian. Sesuai dengan rumusan masalah yang ingin dicapai maka dibutuhkan data-data pendukung penelitian sebagai berikut (Roja, 2021):

1. Data primer. Merupakan sumber data penelitian yang diperoleh langsung dari sumber asli (tidak melalui media perantara). Data primer pada penelitian ini bisa di dapatkan melalui metode wawancara langsung kepada Ketua Yayasan dan Kepala SMP-IT Robbani Banjarbaru.
2. Data sekunder. Merupakan data yang diperoleh peneliti dari sumber yang sudah ada. Data sekunder yang mendukung penelitian ini adalah :
   a. RAB pembangunan Gedung SMP-IT Robbani.
   b. Gambar pengerjaan atau soft drawing Gedung SMP-IT Robbani.

Tahap analisis data

Identifikasi komponen bangunan yang ditinjau. Identifikasi dilakukan untuk menentukan komponen–komponen bangunan yang akan ditinjau. Komponen yang ditinjau merupakan komponen–komponen yang mendukung berjalannya fungsi dari bangunan tersebut. Pada analisa ini, peneliti menentukan komponen yang akan ditinjau melalui survey langsung ke lapangan (Kamagi, et al, 2013).

Inflasi. Guna inflasi untuk menghitung besarnya biaya pemeliharaan gedung selama 10 tahun kedepan. Besarnya nilai inflasi didapat berdasarkan website Badan Pusat Statistik (BPS) Kalimantan Selatan selama sepuluh tahun terakhir.

Tabel bunga. Tabel bunga digunakan untuk mendapatkan nilai faktor inflasi. Tabel bunga yang digunakan diambil dari buku tabel bunga majemuk.

Menghitung biaya pemeliharaan menggunakan rumus suku bunga. Setelah didapatkan besarnya nilai inflasi, tahap selanjutnya adalah menghitung biaya pemeliharaan selama 10 tahun dengan menggunakan rumus suku bunga pembayaran tunggal dengan rumus (Putri, 2019):

$$F = P(\frac{P}{F}, i\%, N) \qquad (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi komponen bangunan yang diteliti

Komponen penelitian yang ditinjau adalah seluruh komponen yang berada pada gedung SMP-IT Robbani yang mendukung jalannya fungsi dari bangunan tersebut. Pada penelitian ini yang diteliti adalah komponen pemeliharaan, diantaranya yaitu : komponen arsitektual, komponen struktur, komponen elektrikal, komponen mekanikal, komponen tata ruang luar gedung dan komponen kebersihan.

Inflasi

Inflasi digunakan untuk menghitung estimasi biaya. Dikarenakan data inflasi untuk daerah Banjarbaru tidak ditemukan, maka digunakan data inflasi dari Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Selatan. Data inflasi Provinsi Kalimantan Selatan dalam sepuluh tahun terakhir dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 1. Tingkat Infllasi Kalimantan Selatan 2014-2023

Tahun	Inflasi (%)
2014	6,98
2015	7,28
2016	5,14
2017	3,57
2018	3,82
2019	2,63
2020	4,01
2021	1,68
2022	2,25
2023	6,99
Rata-rata	4,44

(*Sumber : BPS Kalimantan Selatan, 2024*)

Namun dikarenakan inflasi 4,44% tidak ada di dalam tabel suku bunga, maka akan dilakukan perhitungan dengan rumus interpolasi sebagai berikut :

Diketahui :

x_1 = 4% y_1 = 1,480

x = 4,44% y_2 = 1,553

x_2 = 4,5% y = ?

penyelesaian :

$$y = y_1 + (x - x_1)\frac{(y2-y1)}{(x2-x1)}$$

$$y = 1{,}480 + (4{,}44 - 4)\frac{(1{,}553-1{,}480)}{(4{,}5-4)}$$

y = 1,480 + (0,44) $\frac{0,073}{0,5}$

y = 1,480 + 0,06424

y = **1,544**

Berdasarkan perhitungan diatas, didapatkan rata – rata inflasi selama 10 tahun terakhir pada Provinsi Kalimantan Selatan sebesar 4,44% dengan besar bunga 1,544. Inflasi tersebut akan digunakan untuk menghitung estimasi biaya selama 10 tahun kedepan dan diausimsikan tetap.

Estimasi biaya pemeliharaan dengan pengaruh inflasi menggunakan rumus suku bunga

Estimasi biaya pemeliharaan dihitung sampai 10 tahun ke depan menggunakan rumus suku bunga pembayaran tunggal (mencari F jika diketahui P) seperti yang tertera pada persamaan berikut

$F = P(1 + i)^n$

Dimana :

F = *Future Worth*

P = *Prersent worth*

i% = tingkat bunga efektif per periode

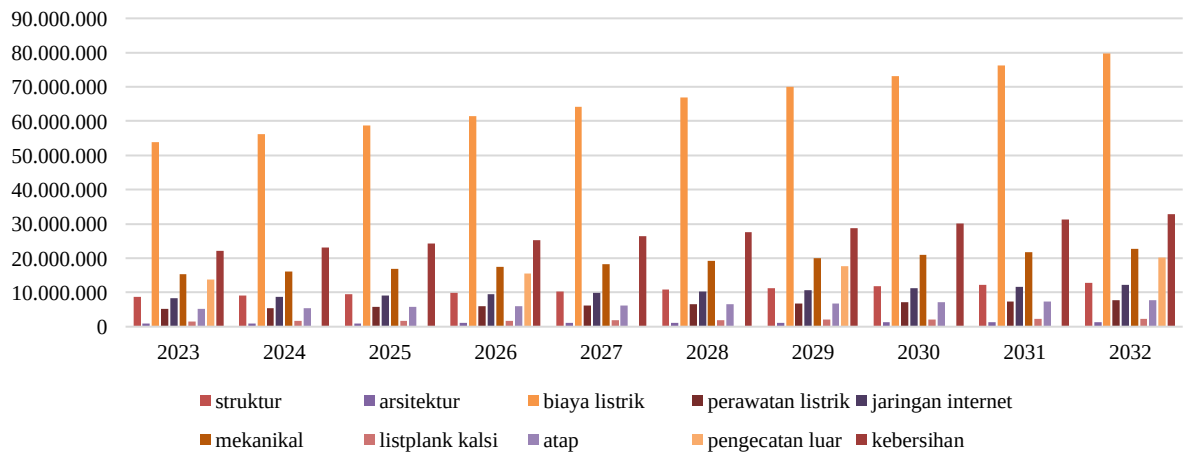
N = Jumlah periode pemajemukan

Rekapitulasi biaya pemeliharaan SMP-IT Robbani Banjarbaru 2023-2032

Setelah memperhitungkan inflasi 4,44%, maka total biaya pemeliharaan Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru dari tahun 2023 sampai 2032 adalah sebagai berikut

Tabel 2. Rekapitulasi Biaya Pemeliharaan Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru 2023-2032

Tahun	Struktur	Arsitektur	Biaya Listrik	Biaya Perawatan Jaringan Listrik	Jaringan Internet / *Wifi*	Mekanikal	Listplank	Atap	Pengecatan Luar	Kebersihan
2023	8.663.298	929.516	53.891.040	5.222.000	8.271.648	15.406.989	1.566.600	5.222.000	13.670.419	22.167.390
2024	9.047.948	970.787	56.283.802	5.453.857	8.638.909	16.091.059	1.636.157	5.453.857		23.151.622
2025	9.449.677	1.013.889	58.782.803	5.696.008	9.022.477	16.805.502	1.708.802	5.696.008		24.179.554
2026	9.869.243	1.058.906	61.392.759	5.948.911	9.423.075	17.551.666	1.784.673	5.948.911	15.573.364	25.253.126
2027	10.307.437	1.105.922	64.118.598	6.213.042	9.841.459	18.330.960	1.863.913	6.213.042		26.374.365
2028	10.765.088	1.155.024	66.965.464	6.488.902	10.278.420	19.144.855	1.946.670	6.488.902		27.545.387
2029	11.243.058	1.206.308	69.938.730	6.777.009	10.734.782	19.994.887	2.033.103	6.777.009	17.741.201	28.768.402
2030	11.742.249	1.259.868	73.044.010	7.077.908	11.211.406	20.882.660	2.123.372	7.077.908		30.045.719
2031	12.263.605	1.315.806	76.287.164	7.392.167	11.709.193	21.809.850	2.217.650	7.392.167		31.379.749
2032	12.808.109	1.374.228	79.674.314	7.720.379	12.229.081	22.778.207	2.316.114	7.720.379	20.210.805	32.773.010
Total	**106.159.712**	**11.390.254**	**660.378.684**	**63.990.183**	**101.360.450**	**188.796.635**	**19.197.054**	**63.990.183**	**67.195.789**	**271.638.324**



Gambar 3. Rekapitulasi Biaya Pemeliharaan Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru 2023-2032

Biaya pemeliharaan Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru untuk tahun 2023 sampai dengan 2032 untuk setiap komponen dapat dilihat pada tabel berikut:

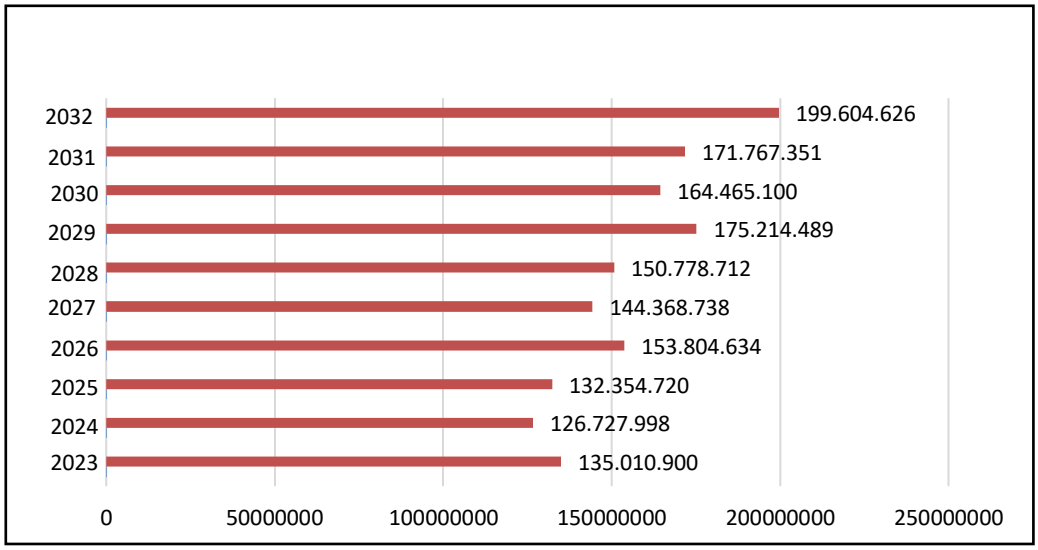
Tabel 3. Rekapitulasi Biaya Pemeliharaan Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru 2023-2032 Per Komponen

No	Komponen	Biaya Pemeliharaan (Rp)
1	Struktur	106.159.712
2	Arsitektur	11.390.254
3	Biaya Listrik	660.378.684
4	Biaya Perawatan Jaringan Listrik	63.990.183
5	Jaringan Internet / *Wifi*	101.360.450
6	Mekanikal	188.796.635
7	Listplank	19.197.054
8	Atap	63.990.183
9	Pengecatan Luar	67.195.789
10	Kebersihan	271.638.324
Total		1.554.097.268

Biaya pemeliharaan per tahun dari tahun 2023 sampai dengan tahun 2032 secara lengkap dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini :

Tabel 4. Rekapitulasi Biaya Pemliharaan Per tahun Gedung SMP-IT Robbani

Tahun	Biaya Total Pemeliharaan (Rp)
2023	135.010.900
2024	126.727.998
2025	132.354.720
2026	153.804.634
2027	144.368.738
2028	150.778.712
2029	175.214.489
2030	164.465.100
2031	171.767.351
2032	199.604.626
Total	**1.554.097.268**
Rata-rata	**155.409.727**



Gambar 4. Rekapitulasi Biaya Pemeliharaan Per tahun Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru

Dari tabel dan gambar di atas dapat disimpulkan bahwa total biaya siklus hidup atau *Life Cycle Cost* pada Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru untuk tahun 2023 hingga tahun 2032 dengan menggunakan inflasi 4,44% adalah sebesar Rp. 1.554.097.268,00. Rata-rata biaya pemeliharaan untuk satu tahun sebesar Rp. 155.409.727,00 selama 10 tahun.

Untuk mendapatkan rata-rata biaya pemeliharaan tiap komponen pertahun dihitung dengan menggunakan rumus berikut ini :

$$\text{Rata-rata} = \frac{(\text{Total Biaya Pemeliharaan Perkomponen } 2023-2032)}{10}$$

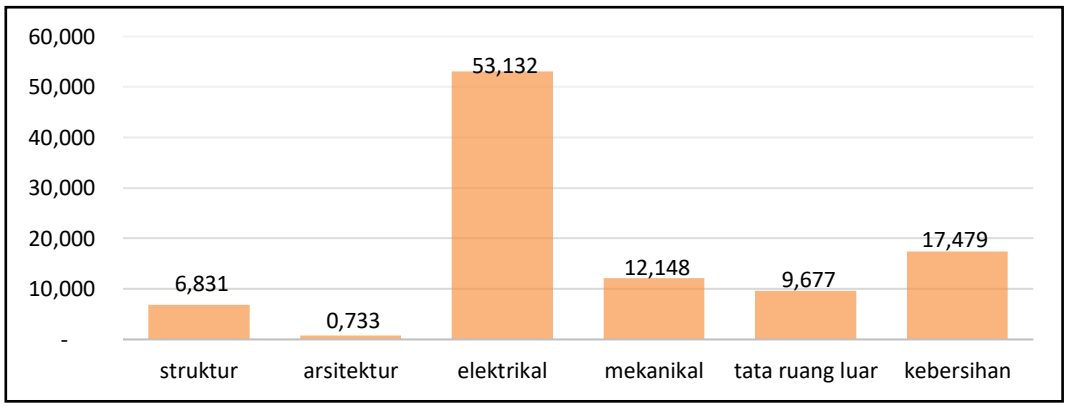
Untuk mendapatkan prensetase biaya pemeliharaan per komponen per tahun digunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Persentase \%} = \frac{(\text{Rata-rata Biaya Pemeliharaan Perkomponen})}{\text{Rata-rata Total Biaya Pemeliharaan } 2023-3032} \text{ X } 100\%$$

Berdasarkan rumus di atas, didapatkan hasil rata-rata biaya pemeliharaan seluruh komponen per tahun yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 5. Rata-rata Biaya Pemeliharaan Perkomponen Pertahun Gedung SMP-IT Robbani tahun 2023-2032

No	Komponen	Biaya Rata-rata (Rp)	Presentase (%)
1	Struktur	10.615.971,00	6,831
2	Arsitektur	1.139.025,00	0,733
3	Elektrikal		
	Biaya Listrik	66.037.868,00	42,493
	Jaringan Listrik	6.399.018,00	4,118
	Jaringan Internet / *Wifi*	10.136.045,00	6,522
	Total Elektrikal	82.572.932,00	53,132
4	Mekanikal	18.879.664,00	12,148
5	Tata Ruang Luar		
	Listplank	1.919.705,00	1,235
	Atap	6.399.018,00	4,118
	Pengecatan Luar	6.719.579,00	4,324
	Total Tata Ruang Luar	15.038.303,00	9,677
6	Kebersihan	27.163.832,00	17,479
Total		155.409.727,00	100



Gambar 5. Persentase Biaya Pemeliharaan Per Komponen Pertahun Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru 2023-2032

Dari gambar dan tabel di atas didapatkan kesimpulan bahwa biaya pemeliharaan terbesar terletak pada pemeliharaan eletrikal dengan biaya pertahun mencapai Rp. 82.572.932,00 dengan persentase 53,132%. Untuk biaya terkecil berada pada komponen arsitektur dengan biaya sebesar Rp. 1.139.025,00 dengan persentase 0,733%.

Perbandingan dengan penelitian sejenis

Hasil penelitian ini bila dibandingkan dengan penelitian lain sejenis antara lain. Pertama Wongkar dan Pratasis, P. A. (2016) dengan judul Analisis Life Cycle Cost Pada Pembangunan Gedung (Studi Kasus: Sekolah St. Ursula Kotamobagu) menyimpulkan bahwa biaya pemeliharaan yang terdiri dari biaya pemeliharaan dinding sebesar Rp.204.559.574,57, biaya pemeliharaan lantai sebesar Rp.1.530.119,49 dan biaya pemeliharaan plafond sebesar Rp.121.844.171,43. Kemudian penelitian oleh Tawakal (2022) dengan judul Analisis Life Cycle Cost Pada Pemeliharaan Bangunan Gedung *(*Studi Kasus Gedung SDN Rungkut Menanggal I/582*)* menyimpulkan total biaya pemeliharaan kelima komponen selama 30 tahun sebesar Rp 2.503.432.266 yang terdiri dari pemeliharaan komponen struktural sebesar Rp 133.691.622, arsitektural sebesar Rp 987.099.847, mekanikal sebesar Rp 527.200.846,elektrikal sebesar Rp 393.506.081 dan tata ruang luar sebesar Rp 497.638.202. Biaya pemeliharaan terbesar pada pemeliharaan seluruh komponen yang ditinjau terdapat pada pembersihan dinding keramik dan kusen dengan besar bobot rata-rata selama 30 tahun kedepan adalah 15,83%. Berikutnya penelitian R Firzal Adam, A. (2024) dengan judul Penggunaan Metode Life Cycle Cost Pada Pembangunan Gedung Madrasah Tsanawiyah Negeri 4 Kabupaten Tabalong menyimpulkan bahwa total biaya selama periode umur rencana bangunan yaitu sebesar Rp.2.765.890.655,07. Dengan biaya pemeliharaan terdiri dari biaya pemeliharaan atap yaitu Rp.470.167.830,91 dengan bobot 17,00 %. Biaya pemeliharaan plafond yaitu Rp.396.131.932,25 dengan bobot 14,32 %. Biaya pengecatan yaitu Rp.470.167.830,91 dengan bobot 18,54 %. Biaya pemeliharaan pelapis lantai dan dinding (keramik) yaitu Rp.1.260.828.317,81 dengan bobot 45,58 %. Terakhir biaya pembongkaran keseluruhan pada komponen atap, plafond, pelapis lantai dan dinding (keramik), dan upah pengecatan ulang yaitu Rp.125.951.993,76 dengan bobot 4,55 %. Bobot pemeliharaan terbesar adalah biaya pemeliharaan pelapis lantai dan dinding (keramik) yaitu 45,58 %.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang di dapat dari penelitian ini adalah besar biaya siklus hidup Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru pada 10 tahun kedepan adalah sebesar Rp. 1.554.097.268,00 dengan menggunakan inflasi 4,44%. Rata rata biaya per tahun pemeliharaan Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru adalah sebesar Rp. 155.409.727,00 selama 10 tahun ke depan. Biaya pemeliharaan terbesar selama siklus hidup pada Gedung SMP-IT Robbani Banjarbaru adalah komponen elektrikal yaitu sebesar Rp. 82.572.932,00 per tahun atau mencapai 53,132% dari total biaya pemeliharaan. Sedangkan biaya terkecil adalah komponen arsitektur yaitu sebesar Rp. 1.139.025,00 per tahun atau mencapai 0,733% dari total biaya pemeliharaan.

DAFTAR PUSTAKA

Buyung, R. A., Pratasis, P. A., & Malingkas, G. Y. (2019). "Life Cycle Cost (LCC) pada Proyek Pembangunan Gedung Akuntansi Universitas Negeri Manado (UNIMA) di Tondano". *Jurnal Sipil Statik, 7(11).*

Google Maps. Diakses tanggal 23 Juni 2024.

Kamagi, G. P., Tjakra, J., Langi, J. E. C., & Malingkas, G. Y. (2013). "Analisis Life Cycle Cost Pada Pembangunan Gedung (Studi Kasus: Proyek Bangunan Rukan Bahu Mall Manado)". *Jurnal Sipil Statik, 1(8).*

Kaming, P., Liano, I. H., & Sigit, W. A. (2019). "Adopsi Life Cycle Costing Untuk Bangunan Gedung Diklat Muara Enim". *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (Jrkms), 121-132.*

Putri, S. (2019). "Analisis Life Cycle Cost Biaya Pemeliharaan Gedung Auditorium Politeknik Kesehatan Kemenkes Gorontalo". *Skripsi, 1(511414013*).

R Firzal Adam, A. (2024). "Penggunaan Metode Life Cycle Cost Pada Pembangunan Gedung Madrasah Tsanawiyah Negeri 4 Kabupaten Tabalong". *Online Repository of Universitas NU Kalimantan Selatan, 1-15.*

Roja, R. (2021). "Analisis Life Cycle Cost Pada Gedung Terminal Tipe A Anak Air Padang". *Doctoral Dissertation, Universitas Andalas.*

South Kalimantan Central Statistics Agency, 2024

Tawakal, M. I. (2022). "Analisis Life Cycle Cost Pada Pemeliharaan Bangunan Gedung (Studi Kasus Gedung SDN Rungkut Menanggal I/582)". *Doctoral dissertation, Univertitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur*.

Wongkar, Y. K., Tjakra, J., & Pratasis, P. A. (2016). "Analisis Life Cycle Cost Pada Pembangunan Gedung (Studi Kasus: Sekolah St. Ursula Kotamobagu)". *Jurnal Sipil Statik, 4(4).*

ANALISIS PENAWARAN KONTRAKTOR GEDUNG SEKOLAH DI PROVINSI BALI

Putu Ira Pramesti Wiraningsih[1*], I Made Aryatirta Predana[2]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Raya Kampus Unud, Jimbaran*
***e-mail**: www.irapramesti@gmail.com*
[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Raya Kampus Unud, Jimbaran
***e-mail**: aryatirta@unud.ac.id*

ABSTRAK

Gedung sekolah merupakan salah satu bagian dari sub-klasifikasi Bangunan Gedung Pendidikan yang secara rutin ditawarkan setiap tahun oleh Pemerintah melalui Lembaga Pengadaan Secara Elektronik (LPSE). Gedung sekolah pada umumnya memiliki desain yang tipikal sehingga menarik minat kontraktor untuk memperebutkan proyek tersebut. Beberapa tahun terakhir, proyek konstruksi yang ditawarkan oleh Pemerintah Provinsi Bali mengalami penurunan jumlah hingga 30% setiap tahunnya. Keterbatasan jumlah proyek tersebut membuat kontraktor berkompetisi mengajukan penawaran dengan nilai yang rendah. Fenomena persaingan tersebut kemudian menimbulkan pertanyaan apakah penawaran yang diajukan tersebut sudah optimum bagi kontraktor. Penawaran dikatakan optimum ketika penawaran tersebut memberikan peluang menang dan keuntungan harapan. Analisis penawaran optimum dilakukan pada proyek bangunan gedung sekolah di Provinsi Bali pada tahun 2018-2020 dengan Metode Friedman, didapatkan bahwa nilai optimum adalah penawaran dengan mark-up 1% - 8% atau ketika kontraktor menawar sebesar 76,21% - 81,49% dari nilai HPS. Berdasarkan tinjauan pada proyek 3 tahun terakhir yaitu tahun 2021-2024, diketahui hanya 14,55% kontraktor di Provinsi Bali memenangkan pekerjaan dengan harga yang wajar. Penawaran yang diajukan mengutamakan peluang kemenangan dengan cara menekan persentase keuntungan, atau dengan kata lain berpeluang besar untuk mengalami kerugian. Namun secara administratif diketahui proyek mampu diselesaikan dengan mutu dan waktu yang tepat meskipun dengan biaya yang tidak wajar. Tender sebagian besar dimenangkan oleh dua penawar terendah, yaitu sebanyak 88% proyek dimenangkan oleh penawar terendah pertama ataupun kedua, sedangkan hanya 12% proyek lannya dapat dimenangkan oleh penawar yang lebih tinggi.

Kata kunci: Tender, Metode Friedman, Peluang Kemenangan, Penawaran Optimum, Pemenang Tender

1. PENDAHULUAN

Pengadaan barang/jasa yang bersumber dari APBN/APBD merupakan pengadaan di lingkungan pemerintah yang bertujuan untuk menyediakan barang jasa publik. Sebagian besar penyedia jasa konstruksi umumnya diperoleh melalui penawaran bersaing (*competitive bidding*). Gedung sekolah merupakan salah satu bagian dari sub-klasifikasi Bangunan Gedung Pendidikan yang secara rutin ditawarkan setiap tahun oleh Pemerintah melalui Lembaga Pengadaan Secara Elektronik (LPSE). Bangunan gedung sekolah merupakan bangunan komersial yang digunakan untuk menunjang kegiatan belajar-mengajar, oleh karena itu banyak pembangunan gedung sekolah baru yang bermunculan (Putra, 2022). Desain gedung sekolah juga pada umumnya tipikal, sehingga para penyedia jasa konstruksi berlomba-lomba untuk memperebutkan proyek tersebut.

Penyedia jasa konstruksi dalam hal ini adalah kontraktor. Persaingan para kontraktor tersebut yang kemudian tanpa disadari menjadi masalah dasar dalam industri konstruksi, terlebih lagi jumlah paket pekerjaan konstruksi yang ditawarkan pemerintah menurun cukup signifikan beberapa tahun terakhir. Hal tersebut membuat kontraktor berlomba-lomba memberikan penawaran terbaiknya untuk memenangkan proyek. Sebuah penawaran dapat dikatakan optimum ketika penawaran tersebut mampu memberikan kesempatan untuk memenangkan proyek dan tetap memberikan keuntungan (Nursetyo, 2016). Kondisi optimum penawaran penyedia dapat diketahui dengan melakukan analisis untuk mendapatkan rentang nilai mark-up yang memberikan peluang kemenangan namun tetap memberikan keuntungan harapan bagi kontraktor.

Dengan mengetahui kondisi optimum penawaran maka akan dapat dilihat bagaimana efektifitas penawaran yang diajukan kontraktor di Provinsi Bali. Terdapat tiga metode pendekatan strategi penawaran yang dapat digunakan untuk menghitung besarnya nilai penawaran optimum, yaitu metode Friedman, Gates dan Ackoff & Sasieni. Pemilihan metode harus disesuaikan dengan kriteria penawar, apabila kontraktor sangat membutuhkan pekerjaan sehingga persaingan menjadi cukup ketat maka digunakan metode Friedman, sedangkan apabila para pesaing tidak terlalu membutuhkan pekerjaan atau permintaan pasar sedang tinggi maka sebaiknya digunakan metode Gates (Patmadjaja, 1999). Adapun melihat kondisi ketatnya persaingan antar penyedia jasa dalam tender proyek konstruksi saat ini maka dalam penelitian ini digunakan Metode Friedman. Penawaran yang berada pada rentang optimum menunjukkan bahwa para penyedia jasa tersebut mampu memperoleh kemenangan dengan keuntungan yang wajar. Sedangkan apabila penawaran berada diluar rentang optimum maka itu artinya penyedia jasa melakukan penawaran yang terlalu rendah

untuk dapat memenangkan tender proyek.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penawaran

Penawaran dapat diartikan sebagai biaya langsung yang ditambah dengan suatu nilai nominal tertentu (Ervianto, 2005). Nominal tertentu tersebutlah yang kemudian disebut dengan nilai mark-up. Sebuah penawaran dapat dikatakan optimum ketika penawaran tersebut mampu memberikan kesempatan untuk memenangkan proyek dan tetap memberikan keuntungan (Nursetyo, 2016). Penawaran terhadap suatu proyek oleh kontraktor akan menjadi lebih akurat dan efektif apabila digunakan metode pendekatan dalam menentukan strategi penawarannya. Metode Friedman mampu merumuskan probabilitas kemenangan untuk penawaran dengan dua atau lebih pesaing. Perhitungan peluang untuk memenangkan penawaran dengan metode Friedman dirumuskan sebagai berikut:

$$P(C_oWin/B_o) = P(B_o < B_a)^n \quad (1)$$

$$P(B_o < B_a) = \frac{Kumulatif\ Pesaing}{Jumlah\ Total\ Penawar}\ x\ 100\% \quad (2)$$

dengan P(CoWin/Bo) = Peluang kemenangan terhadap dua atau lebih pesaing, P(Bo<Ba) = Peluang kemenangan terhadap satu pesaing dan n = Jumlah pesaing.

$$E(P) = m_o\ x\ P(B_o < B_a)^n \quad (3)$$

$$m_o = \frac{(Penawaran - BiayaLangsungProyek)}{BiayaLangsungProyek}\ x\ 100\% \quad (4)$$

dengan E(P) = Keuntungan harapan, mo = Nilai mark-up dan $P(Bo<Ba)^n$ = Peluang kemenangan terhadap terhadap n pesaing

Metode Friedman

Metode *Friedman* adalah pengajuan penawaran harga terendah untuk memenangkan tender dengan memaksimalkan harapan, dimana metode ini menggunakan dua buah perumusan probabilitas untuk menang yang pertama adalah peluang kemenangan untuk identitas dari pesaing dikenal, yang kedua adalah peluang kemenangan untuk identitas dari pesaing tak dikenal. Metode *Gates* hampir mirip dengan metode *Friedman* yang menggunakan dua buah perumusan probabilitas. Metode ini memprediksi *mark-up* optimum pada suatu proyek dengan tujuan utama memaksimalkan keuntungan harapan dan menganggap biaya estimasi sama dengan biaya aktual. Pada hakikatnya, pemilihan metode harus disesuaikan dengan kriteria penawar, apabila kontraktor sangat membutuhkan pekerjaan sehingga persaingan menjadi cukup ketat maka digunakan metode *Friedman*, sedangkan apabila para pesaing tidak terlalu membutuhkan pekerjaan atau permintaan pasar sedang tinggi maka sebaiknya digunakan metode *Gates* (Patmadjaja, 1999). Maka dari itu pendekatan dengan metode *Friedman* lebih cocok digunakan dengan kondisi persaingan penyedia dalam tender saat ini. (Dewi dkk, 2022)

Estimasi Biaya Proyek

Keuntungan yang diperoleh kontraktor bergantung kepada kecakapan estimator membuat perkiraan biaya. Apabila harga penawaran yang diajukan terlalu tinggi, kemungkinan besar kontraktor tersebut mengalami kekalahan dalam persaingan tender. Sebaliknya, apabila harga penawaran yang diajukan terlalu rendah demi memenangkan tender, maka hal tersebut akan menyebabkan kontraktor mengalami kesulitan selama proses pengerjaan proyek bahkan cenderung mengalami kerugian. Dalam proyek pemerintah, nilai Harga Perkiraan Sendiri (HPS) ditetapkan oleh Pejabat Pembuat Kommitmen (PPK) setelah melalui evaluasi dari tahap perencanaan. Penyusunan dan penetapan HPS bertujuan untuk menilai kewajaran harga harga satuan penawaran dan dasar untuk menetapkan batas tertinggi penawaran yang sah dalam pengadaan barang jasa (PERPRES No. 12, 2021).

Estimasi biaya langsung proyek untuk keseragaman dalam penelitian ini diasumsikan sesuai ketentuan berikut; menurut PERLEM No. 9 (2018) biaya tak langsung proyek sebesar 15%, menurut PP No. 40 (2009) PPh pada penyedia jasa pelaksanaan konstruksi adalah sebesar 2%, dan total nilai HPS sudah termasuk PPN sebesar 10% (PERPRES No. 12, 2021). Sehingga biaya langsung proyek dapat dihitung dengan rumusan berikut.

$$\text{Biaya Langsung Proyek} = 75{,}45\% \text{ x HPS} \quad (5)$$

Keberhasilan Proyek

Keberhasilan erat kaitannya dengan kecermatan kita dalam menentukan tujuan sedangkan tujuan merupakan suatu sasaran yang sudah kita tentukan (Kurniawan, 2009). Suatu keberhasilan memiliki bentuk yang beragam, disesuaikan kembali dengan tujuan yang ingin dicapai. Misalnya untuk seorang pengusaha jasa konstruksi atau kontraktor yang memiliki kontrak dengan pemilik proyek harus bertanggung jawab penuh atas implementasi fisik proyek. Kriteria keberhasilan sebuah proyek dapat diukur dari efisiensi internal yang dicapai yaitu ketepatan biaya, waktu dan kualitas.

Keuntungan Kontraktor

Proyek konstruksi adalah pekerjaan dengan tingkat kompleksitas dan resiko tinggi, sehingga terdapat banyak biaya tak terduga yang berpotensi mengurangi keuntungan yang diperoleh oleh perusahaan. Keuntungan atau laba merupakan salah satu tujuan utama sebuah perusahaan untuk tetap menjalankan aktivitasnya. Strategi keuangan tertentu perlu dilakukan oleh para pemilik perusahaan jasa konstruksi untuk menjaga margin keuntungan yang ditargetkan. Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan resiko biaya dan indikator-indikator yang mempengaruhi keuntungan yang didapat oleh seorang kontraktor, diantaranya indikator tenaga kerja, material, peralatan, metode pelaksanaan, finansial, karakteristik proyek, manajerial, perencanaan dan hal tak terduga.

3. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilaksanakan di Provinsi Bali dengan studi dokumentasi pada LPSE Provinsi Bali.

Jenis dan Sumber Data

Dalam hal ini menggunakan data sekunder yang didapatkan langsung melalui studi dokumentasi pada laman LPSE Provinsi Bali yaitu berupa berita acara pemenang tender untuk dapat dilihat daftar kontraktor yang ikut serta dalam tender proyek konstruksi sepanjang tahun 2018-2023 beserta daftar nilai penawaran yang diajukan oleh setiap penyedia jasa dan pemenangnya.

Pengumpulan Data

Metode studi dokumentasi dilakukan untuk menjawab rumusan masalah pertama dengan mengumpulkan data penawaran-penawaran terdahulu berupa berita acara pemenang tender proyek konstruksi sepanjang tahun 2018-2023 di LPSE Provinsi Bali. Data nilai penawaran dari kontraktor yang ikut serta dalam tender tahun 2018-2020 dikumpulkan untuk diolah sehingga didapat rentang penawaran optimum bagi kontraktor untuk mengajukan penawaran. Kemudian data nilai penawaran kontraktor tahun 2021-2023 digunakan sebagai objek penelitian.

Pengolahan Data

Data sekunder yang telah diperoleh kemudian dianalisis dengan pendekatan kuantitatif, mencakup perhitungan biaya langsung proyek yang merupakan nilai HPS dikurangi dengan biaya tak langsung serta perhitungan nilai mark-up pada masing-masing data penawaran untuk kemudian mencari peluang kemenangan dan keuntungan harapan dengan menggunakan metode Friedman. Perhitungan biaya langsung dari masing-masing proyek dilakukan dengan menggunakan rumusan 5. Sedangkan untuk menghitung nilai *mark-up* dari masing-masing penawaran telah dihitung menggunakan rumusan 4 untuk kemudian diurutkan berdasarkan *mark-up* terendah hingga tertinggi pada keseluruhan proyek sehingga memperoleh distribusi frekuensi dan frekuensi kumulatif dari pesaing.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Penawaran Terdahulu

Analisis penawaran optimum dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan rentang nilai mark-up yang memberikan peluang kemenangan dan keuntungan harapan, penentuan tersebut dimulai dengan melakukan pengumpulan data proyek konstruksi di LPSE Provinsi Bali untuk diolah dan dianalisis dengan metode Friedman.

Berdasarkan hasil studi dokumentasi pada website Layanan Pengadaan Secara Elektronik (LPSE) Provinsi Bali diperoleh data tender proyek dengan sub-klasifikasi Bangunan Gedung (BG) khususnya untuk Gedung Pendidikan di Provinsi Bali tahun 2018-2020 yaitu sejumlah 23 proyek.

Pengolahan data dimulai dengan perhitungan biaya langsung dari setiap proyek, nilai mark-up penawaran dari setiap kontraktor serta distribusi frekuensi dan frekuensi kumulatif penawar. Terdapat 175 penawaran yang terkumpul untuk kemudian dilakukan distribusi frekuensi penawaran Setelah dilakukan pengolahan data, selanjutnya akan dianalisis dengan metode *Friedman*. Adapun nilai mark-up yang diolah adalah yang bernilai 1% atau lebih. Batasan tersebut diambil karena apabila penawaran diajukan dengan mark-up kurang dari 1% maka penawaran dianggap tidak memberikan keuntungan.

Tabel 1. Hasil Analisis dengan Metode Friedman

Mark-up		**Distribusi Frekuensi**		**Mengalahkan Pesaing**																	
%	% terhadap HPS	Frek. Penawar	Frek. Kumulatif	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
				P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)	P (%)	K (%)

1	76,21	7	171	97,71	0,98	95,48	0,95	93,30	0,93	91,17	0,91	89,08	0,89	87,05	0,87	85,06	0,85	83,11	0,83	81,21	0,81	79,36	0,79
2	76,96	11	164	93,71	1,87	87,82	1,76	82,30	1,65	77,13	1,54	72,28	1,45	67,74	1,35	63,48	1,27	59,49	1,19	55,75	1,12	52,25	1,04
3	77,72	10	153	87,43	2,62	76,44	2,29	66,83	2,00	58,43	1,75	51,08	1,53	44,66	1,34	39,05	1,17	34,14	1,02	29,85	0,90	26,09	0,78
4	78,47	9	143	81,71	3,27	66,77	2,67	54,56	2,18	44,59	1,78	36,43	1,46	29,77	1,19	24,33	0,97	19,88	0,80	16,24	0,65	13,27	0,53
5	79,23	6	134	76,57	3,83	58,63	2,93	44,90	2,24	34,38	1,72	26,32	1,32	20,16	1,01	15,43	0,77	11,82	0,59	9,05	0,45	6,93	0,35
6	79,98	12	128	73,14	4,39	53,50	3,21	39,13	2,35	28,62	1,72	20,93	1,26	15,31	0,92	11,20	0,67	8,19	0,49	5,99	0,36	4,38	0,26
7	80,74	10	116	66,29	4,64	43,94	3,08	29,12	2,04	19,31	1,35	12,80	0,90	8,48	0,59	5,62	0,39	3,73	0,26	2,47	0,17	1,64	0,11
8	81,49	6	106	60,57	4,85	36,69	2,94	22,22	1,78	13,46	1,08	8,15	0,65	4,94	0,40	2,99	0,24	1,81	0,14	1,10	0,09	0,66	0,05
9	82,25	8	100	57,14	5,14	32,65	2,94	18,66	1,68	10,66	0,96	6,09	0,55	3,48	0,31	1,99	0,18	1,14	0,10	0,65	0,06	0,37	0,03
10	83,00	6	92	52,57	5,26	27,64	2,76	14,53	1,45	7,64	0,76	4,02	0,40	2,11	0,21	1,11	0,11	0,58	0,06	0,31	0,03	0,16	0,02
11	83,75	7	86	49,14	5,41	24,15	2,66	11,87	1,31	5,83	0,64	2,87	0,32	1,41	0,15	0,69	0,08	0,34	0,04	0,17	0,02	0,08	0,01
12	84,51	12	79	45,14	5,42	20,38	2,45	9,20	1,10	4,15	0,50	1,87	0,22	0,85	0,10	0,38	0,05	0,17	0,02	0,08	0,01	0,04	0,00
13	85,26	5	67	38,29	4,98	14,66	1,91	5,61	0,73	2,15	0,28	0,82	0,11	0,31	0,04	0,12	0,02	0,05	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
14	86,02	4	62	35,43	4,96	12,55	1,76	4,45	0,62	1,58	0,22	0,56	0,08	0,20	0,03	0,07	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
15	86,77	10	58	33,14	4,97	10,98	1,65	3,64	0,55	1,21	0,18	0,40	0,06	0,13	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	87,53	2	48	27,43	4,39	7,52	1,20	2,06	0,33	0,57	0,09	0,16	0,02	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	88,28	6	46	26,29	4,47	6,91	1,17	1,82	0,31	0,48	0,08	0,13	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	89,04	8	40	22,86	4,11	5,22	0,94	1,19	0,21	0,27	0,05	0,06	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	89,79	10	32	18,29	3,47	3,34	0,64	0,61	0,12	0,11	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	90,55	2	22	12,57	2,51	1,58	0,32	0,20	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	91,30	2	20	11,43	2,40	1,31	0,27	0,15	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	92,05	1	18	10,29	2,26	1,06	0,23	0,11	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	92,81	3	17	9,71	2,23	0,94	0,22	0,09	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	93,56	2	14	8,00	1,92	0,64	0,15	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	94,32	1	12	6,86	1,71	0,47	0,12	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	95,07	5	11	6,29	1,63	0,40	0,10	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	95,83	2	6	3,43	0,93	0,12	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	96,58	3	4	2,29	0,64	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	97,34	1	1	0,57	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	98,09	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31	98,85	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	99,60	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

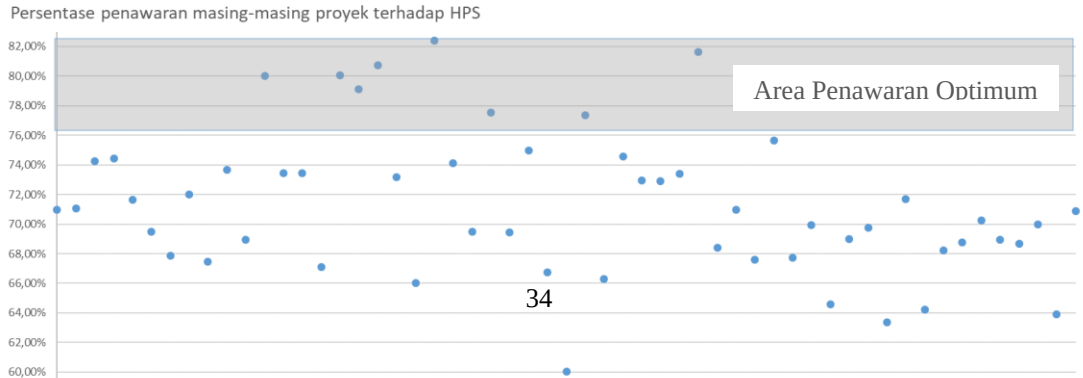
Hasil perhitungan peluang kemenangan dan keuntungan harapan dengan Metode *Friedman* ditunjukkan pada Tabel 1 diatas. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut diambil nilai *mark-up* dengan peluang kemenangan yang lebih besar atau sama dengan 60% untuk masing-masing jumlah pesaing, sehingga didapatkan besarnya nilai *mark-up* yang optimum yaitu 1% - 8% atau jika diubah dalam nilai persentase terhadap HPS merupakan penawaran pada rentang 76,21% - 81,49%.

Penawaran Kontraktor

Selama tiga tahun terakhir, yaitu sepanjang tahun 2021-2024 terdapat 55 proyek Gedung Sekolah yang ditawarkan untuk kontraktor kecil pada Layanan Pengadaan Secara Elektronik (LPSE) Provinsi Bali. Adapun secara rinci terdapat 40 proyek pada tahun 2021 dengan rentang penawaran 60,02% - 82,40%, 10 proyek pada tahun 2022 dengan rentang penawaran 63,37 - 71,68% dan 55 proyek pada tahun 2023 dengan rentang penawaran 63,90 – 70,89%. Sebaran data hasil analisis dengan rentang penawaran optimum pada 55 proyek dapat dilihat pada Gambar 1.

Didapatkan bahwa pada tahun 2021 sebanyak 32 proyek atau 80% proyek pada tahun itu dimenangkan dengan nilai penawaran diluar rentang optimum, pada tahun 2022 sebanyak 10 proyek atau 100% proyek pada tahun itu dimenangkan dengan nilai penawaran diluar rentang optimum dan pada tahun 2023 sebanyak 5 proyek atau 100% proyek pada tahun itu juga dimenangkan dengan nilai penawaran diluar rentang optimum. Secara menyeluruh dapat dikatakan bahwa selama tiga tahun terakhir, persentase penawaran dengan nilai diluar batas kewajaran semakin meningkat setiap tahunnya. Hanya 8 proyek bangunan gedung sekolah yang dimenangkan dengan pengajuan nilai penawaran yang optimum atau hanya sebesar 14,55%, sedangkan 85,45% proyek lainnya dimenangkan dengan nilai penawaran yang tidak optimum.

Pengajuan penawaran diluar batas kewajaran tersebut menujukkan bahwa kontraktor berusaha menekan target laba atau keuntungan perusahaan demi meningkatkan peluang kemenangan, atau dengan kata lain penawaran yang diajukan berpeluang besar untuk mengalami kerugian. Pengajuan nilai tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti jumlah proyek yang ditawarkan semakin sedikit, ketakutan kontraktor untuk tidak mendapatkan proyek dan sistem pengadaan yang lebih mengutamakan proyek dengan harga terendah.

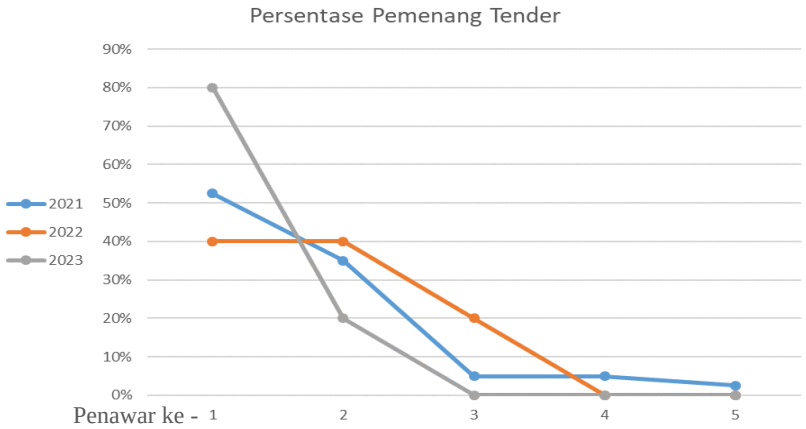


Gambar 1. Sebaran Persentase Penawaran Proyek terhadap HPS

Dengan persentase keuntungan yang menipis, kontraktor perlu melakukan strategi sebagai upaya untuk menjaga margin keuntungan yang ditargetkan dari nilai penawaran yang telah mereka ajukan. Menurut Dewi dkk (2022), upaya yang dapat dilakukan kontraktor untuk memperoleh keuntungan dari nilai penawaran yang telah diajukan adalah dengan memperkuat Faktor Keuangan dan Koordinasi. Faktor tersebut terdiri dari tujuh indikator, yakni kelancaran proses pembayaran dari owner komunikasi internal yang baik, lingkungan aman, keahlian tenaga kerja, kondisi lapangan baik, kerjasama dengan supplier, dan respon baik dari masyarakat yang menjadi faktor dominan dan mempengaruhi keuntungan kontraktor.

Pemenang Tender

Apabila dilihat dari posisi kontraktor dalam memenangkan proyek, hasilnya dapat dipetakan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Pemetaan Pemenang Tender

Dalam tiga tahun terakhir, tender proyek gedung sekolah hanya memungkinkan untuk dimenangkan oleh 5 penawar terendah. Didapatkan pada tahun 2021, 53% tender dimenangkan oleh penawar terendah pertama, 35% oleh penawar terendah kedua, 5% oleh penawar terendah ketiga, 5% oleh penawar terendah keempat dan 3% sisanya oleh penawar terendah kelima. Pada tahun 2022, 40% tender dimenangkan oleh penawar terendah pertama, 40% oleh penawar terendah kedua dan 20% oleh penawar terendah ketiga. Pada tahun 2023, 80% tender dimenangkan oleh penawar terendah pertama dan 20% oleh penawar terendah kedua.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa sebagian besar dimenangkan oleh dua penawar terendah, yaitu sebanyak 88% proyek dimenangkan oleh penawar terendah pertama ataupun kedua, sedangkan hanya 12% proyek lainnya dimenangkan oleh penawar yang lebih tinggi.

5. KESIMPULAN

Analisis penawaran optimum dilakukan pada proyek bangunan gedung sekolah di Provinsi Bali pada tahun 2018-2020 dengan Metode Friedman, didapatkan bahwa nilai optimum adalah penawaran dengan mark-up 1% - 8% atau ketika kontraktor menawar sebesar 76,21% - 81,49% dari nilai HPS.

Berdasarkan tinjauan pada proyek 3 tahun terakhir yaitu tahun 2021-2024, diketahui hanya 14,55% kontraktor di Provinsi Bali memenangkan pekerjaan dengan harga yang wajar. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa mereka berusaha menekan target laba atau keuntungan perusahaan demi meningkatkan peluang kemenangan, atau dengan kata lain penawaran yang diajukan berpeluang besar untuk mengalami kerugian.

Tender sebagian besar dimenangkan oleh dua penawar terendah, yaitu sebanyak 88% proyek dimenangkan oleh penawar terendah pertama ataupun kedua, sedangkan hanya 12% proyek lannya dapat dimenangkan oleh penawar yang lebih tinggi.

Namun secara administratif, pencapaian mutu dan waktu yang terjadi cukup baik sesuai kontrak dan spesifikasi yang disyaratkan. Sehingga dapat dilakukan penelitian lanjutan mengenai peran dari seluruh komponen yang terlibat seperti konsultan perencana dalam pembuatan HPS, pejabat pengadaan dalam melakukan tahap seleksi/tender, keterlibatan konsultan pengawas hingga instansi pemberi kerja dalam proses pelaksanaan yang mempengaruhi nilai penawaran dan keuntungan kontraktor. Serta bagaimana penilaian kepuasan mereka pada output yang diberikan dari hasl penawaran yang dimenangkan diluar rentang kewajaran.

Selain itu perlu dilakukan evaluasi sistem pengadaan dan aturan-aturan terkait untuk menciptakan kondisi persaingan yang sehat bagi kontraktor sesuai tujuan dari pengadaan barang jasa itu sendiri yakni menghasilkan barang jasa yang berkualitas dan wajar, tanpa menghilangkan prinsip-prinsip pengadaan.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

Dewi, A.A.D.P, Sudarsana, D.K, dan Wiraningsih, P.I.P. (2022). “Analysis of Optimum Bid and Contractor’s Effort in Obtaining Profit”. International Journal Of Civil, Mechanical And Energy Science (IJCMES)., Vol-8,Issue-4, July - August 2022, 1-10

Ervianto, W.I. 2005. Manajemen Proyek Konstruksi (Edisi Revisi). In *Yogyakarta: Andi*.

Handoko, T.. 2003. *Manajemen Edisi 2*. Yogyakarta: BPFE UGM.

Kurniawan. 2009. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Keberhasilan Implementasi Kebijakan. *Getok Tular*, .

Nursetyo, G. 2016. *Kajian Permainan Dalam Aturan Lelang Proyek*.

Patmadjaja, H. 1999. Model Strategi Penawaran Untuk Proyek Konstruksi Di Indonesia. *Universitas Kristen Petra: Civil Engineering Dimension*, .

PERLEM No. 9. 2018. *Peraturan Lembaga Kebijakan Pengadaan Barang/Jasa Pemerintah No. 9 Tahun 2018 tentang Pedoman Pengadaan Barang/Jasa melalui Penyedia*. Hal. 35-37.

PERPRES No. 12. 2021. *Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 12 Tahun 2021 tentang Pengadaan Barang/Jasa Pemerintah*.

PP No. 40. 2009. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 40 Tahun 2009 tentang Pajak Penghasilan atas Penghasilan dari Usaha Jasa Konstruksi*.

Putra, D.M. 2022. *Penyebab Keterlambatan dalam Pelaksanaan Gedung Sekolah Bertingkat di Serang*. Universitas Trisakti: Jurnal Deformasi.

Riswandi, Natalia, M., Satwarnirat, S., Mirani, Z., Sapril, M.L. 2019. Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Keuntungan Kontraktor Pada Proyek Konstruksi Gedung Di Kota Padang 2018. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*, 16(1).

Santoso, S. 2016. *Seri Solusi Bisnis Berbasis TI Menggunakan SPSS untuk Statistik Multivariat*. Elex Media Komputindo.

ANALISIS PENYEBAB PERSELISIHAN DALAM PELAKSANAAN KONTRAK LUMSUM PADA PROYEK-PROYEK BANGUNAN TINGGI MILIK PEMERINTAH

Jack Widjajakusuma[1*], Aazokhi Waruwu[2] dan Ritman Miko Hartanto[3]

[1*]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang*
***e-mail**: jack.widjajakusuma@uph.edu*

[2]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang*
e-mail: aazokhi.waruwu@uph.edu

[3]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Jl. M.H. Thamrin Boulevard 1100, Tangerang*
e-mail: ritman.miko@gmail.com

ABSTRAK

Penerapan kontrak lumsum dalam pengerjaan proyek pemerintah yang dibiayai oleh APBN atau APBD mengakibatkan perselisihan (*dispute*) antara kontraktor dan auditor BPK. Yang dimaksud dengan perselisihan dalam penelitian ini adalah perbedaan pandangan antara kontraktor dan auditor. Survey awal dalam penelitian ini menunjukkan bahwa dari 5 proyek bangunan tinggi yang dikerjakan oleh penyedia jasa X dalam kurun waktu 2019-2021 terdapat 4 proyek yang mengalami perselisihan dalam masa audit. Salah satu perdebatan yang paling sering terjadi dalam masa audit adalah perbedaan volume material dalam pengerjaan proyek. Jika volume yang dikerjakan oleh penyedia jasa lebih besar, volume yang lebih besar ini tidak diakui oleh auditor. Sementara jika volume yang dikerjakan oleh penyedia jasa lebih kecil, maka selisih volume pekerjaan ini mesti dikurangi atau dikembalikan oleh penyedia jasa. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan mendapatkan variabel penyebab terjadinya perdebatan diantara penyedia jasa dan auditor. Penelitian ini menggunakan metode analisis data statistik dengan hasil mendapatkan 3 variabel yang paling berpengaruh terhadap tingkat terjadinya perselisihan yaitu (i) item pekerjaan gambar tender berbeda dengan *shop drawing*, (ii) volume BoQ rencana berbeda dengan volume gambar tender dan (iii) ada perbedaan spesifikasi pada kerangka acuan kerja dengan gambar tender dan shop drawing. Ketiga variabel ini mempunyai pengaruh sebesar 73%. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk meminimalisir terjadinya perselisihan pada proyek bangunan tinggi milik pemerintah.

Kata kunci: Manajemen Proyek, Kontrak Lumsum, Perselisihan, Undang-Undang Jasa Konstruksi

1. PENDAHULUAN

Kegiatan pembangunan konstruksi merupakan upaya untuk memajukan peradaban manusia dalam mendukung segala kegiatan dan juga untuk memajukan perekonomian suatu daerah dan negara. Seperti halnya pembangunan gedung tinggi yang bertujuan untuk memaksimalkan pembangunan fasilitas masyarakat ditengah semakin minimnya area atau lahan yang tersedia dengan cara pembangunan bertingkat atau vertikal. Pembangunan gedung tinggi secara bertingkat menjadi pilihan yang tak dapat terelakan khususnya di perkotaan, seperti untuk pembangunan rumah sakit, perkantoran, rumah susun atau apartemen dan sekolah atau universitas. Berdasarkan survey awal yang dilakukan terhadap penyedia jasa X dalam pelaksanaan kontrak lumsum dari 5 proyek bangunan tingkat tinggi milik pemerintah dengan jumlah lantai diatas 10 lantai selama periode 2019-2021, terdapat 4 proyek bangunan tinggi yang mengalami perselisihan pada masa pelaksanaannya. Perselisihan ini terjadi karena ketidaksamaan spesifikasi mutu antara gambar rencana, uraian item pekerjaan, kerangka acuan spesifikasi teknis. Penelitian (Tristanto & Widjajakusuma, 2022) menunjukkan bahwa sering terjadi penyesuaian desain dan item pekerjaan dalam pelaksanaan pekerjaan bangunan tinggi karena belum adanya gambar rencana dan item pekerjaan tersebut dalam kontrak pekerjaan.

Bangunan gedung tinggi milik pemerintah yang dibangun dengan pendanaan APBN atau APBD harus mematuhi aturan-aturan dalam UUJK No. 2 tahun 2017 dan peraturan turunannya. Selanjutnya, pada masa pelaksanaan konstruksi akan diaudit oleh auditor dari Inspektorat atau BPKP atau BPK. Pada masa audit berpotensi menimbulkan perselisihan pendapat terutama kontrak pekerjaan dengan tipe kontrak lumsum. Salah satu perselisihan yang sering terjadi dalam masa audit dengan kontrak lumsum adalah sebagai berikut: jika volume pekerjaan yang dilaksanakan oleh penyedia jasa lebih besar dari volume pekerjaan kontrak , maka perbedaan volume pekerjaan tidak dapat diakui oleh auditor, namun jika volume pekerjaan yang dilaksanakan oleh penyedia jasa lebih kecil dari volume pekerjaan kontrak, maka perbedaan volume ini mesti disesuaikan. Sementara berdasarkan Peraturan Presiden No. 12 Tahun 2021 kontrak lumsum adalah kontrak yang berdasarkan keluaran yang mana lingkup pekerjaan dan jumlah harga yang pasti dan tetap dalam batas waktu tertentu sehingga tidak memungkinkan penyesuaian harga, sehingga auditor tidak memperbolehkan klaim jika volume pekerjaan yang dilakukan lebih besar, namun mesti menyesuaikan harga jika

volume pekerjaan yang dilaksanakan lebih kecil. Hal ini kurang adil dan merugikan bagi kontraktor dan menjadi penyebab utama perselisihan bagi kontraktor dengan pihak auditor.

Hal ini yang menjadi dasar penelitian ini dilakukan, dalam penelitian ini perselisihan yang dibahas adalah perbedaan pandangan antara penyedia jasa dan auditor. Kajian yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan variabel yang sangat berpengaruh menjadi penyebab terjadinya perselisihan diantara penyedia jasa dan auditor. Dengan demikian tujuan penelitian ini menjadi:

1) Untuk mengetahui faktor dan variabel penyebab sering terjadi munculnya perselisihan pada implementasi kontrak lumsum proyek bangunan tinggi milik pemerintah.
2) Untuk mengetahui variabel apa saja yang sangat mempengaruhi perselisihan dalam implementasi kontrak lumsum proyek bangunan tinggi milik pemerintah.
3) Untuk memberikan rekomendasi dan masukan dalam meminimalisir potensi dan penyelesaian permasalahan perselisihan pada implementasi kontrak lumsum proyek bangunan tinggi milik pemerintah.

Batasan masalah penelitian ini adalah untuk mengukur kesamaan prespektif terkait prinsip-prinsip implementasi kontrak lumsum dalam manajemen kontrak proyek bangunan tinggi milik pemerintah.

1) Ditinjau dari segi kesamaan pemahaman sudut pandang penyedia jasa dan auditor dalam implementasi kontrak lumsum pada proyek bangunan tinggi milik pemerintah.
2) Faktor dan variabel yang dipakai dalam penelitian merupakan hasil observasi dan tanya jawab dari pihak penyedia jasa dan auditor pada proyek bangunan tinggi milik pemerintah.
3) Penelitian ini berfokus pada perselisihan dalam manajemen kontrak lumsum proyek bangunan tinggi milik pemerintah.

2. BEBERAPA DEFINISI DASAR

Dalam bagian ini akan diberikan beberapa definisi yang diperlukan dalam studi ini.

Definisi bangunan tinggi

Menurut UU No.28 tahun 2002 tentang Bangunan Gedung pasal I ayat 7 mengenai kriteria ketinggian bangunan gedung dengan tingkat klasifikasi diantaranya:

1) bangunan gedung bertingkat tinggi dengan jumlah lantai > 8 lantai,
2) bangunan gedung bertingkat sedang dengan jumlah lantai > 5 sampai 8 lantai,
3) bangunan gedung bertingkat rendah dengan jumlah lantai > 1 sampai 4 lantai.

Kontrak Kerja Konstruksi

Menurut Undang Undang Jasa Konstruksi (UUJK) kontrak kerja konstruksi merupakan keseluruhan dokumen yang mengatur hubungan hukum antara pengguna jasa dan penyedia jasa dalam pelaksaan pekerjaan konstruksi. Pekerjaan konstruksi secara keseluruhan merupakan rangkaian kegiatan perencanaan dan pelaksanaan beserta pengawasan yang mencakup pekerjaan arsitek, sipil, mekanikal, elektrikal dan tata lingkungan beserta kelengkapannya. Dalam UUJK No.2 Tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi, Pasal 1 butir 8 pada Bab 1 Ketentuan Umum "Kontrak Kerja Konstruksi adalah keseluruhan dokumen kontrak yang mengatur hubungan hukum antara Pengguna Jasa dan Penyedia Jasa dalam penyelenggaraan Jasa Konstruksi".

Sedangkan kelengkapan dalam kontrak kerja konstruksi menurut FIDIC (*Federation Internationale Des Ingenieurs-Conseils*) merupakan suatu perjanjian kontrak yang berisikan antara lain: a) surat penunjukkan (*letter of award*), b) surat penawaran (*letter of tender*), c) persyaratan (*conditions*), d) spesifikasi (*specifications*), e) gambar-gambar (*drawings*), f) jadwal (*schedules*), dan g) dokumen lainnya yang merupakan bagian dalam perjanjian kontrak kerja.

Kontrak Lumsum

Pemahaman kaidah menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KKBI) lumsum adalah uang yang dibayarkan untuk semua biaya (transport, uang makan, dan sebagainya) dengan cara pembayaran sekaligus. Dalam wilayah kerja Indonesia, kontrak kerja lumsum untuk pelaksanaan atau penyelenggaraan kegiatan di bidang Jasa Konstruksi mempunyai beberapa aturan.Ketentuan kontrak lumsum yang diatur dalam Undang-Undang No.2 Tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi dan Perpres 54 Tahun 2010 pasal 51 ayat 1, sebagai berikut: a) jumlah harga pasti dan tetap serta tidak dimungkinkan penyesuaian harga, b) risiko sepenuhnya ditanggung oleh penyedia Barang/Jasa, c) pembayaran berdasarkan produk keluaran sesuai kontrak, d) pekerjaan berorientasi pada keluaran (*output based*), e) total harga penawaran bersifat mengikat, dan f) tidak diperbolehkan adanya pekerjaan tambah/kurang.

PP 29 Tahun 2000 pasal 21 yang menyatakan bahwa kontrak kerja konstruksi dengan imbalan lumsum merupakan kontrak jasa atas penyelesaian seluruh pekerjaan dalam jangka waktu tertentu dengan jumlah harga yang pasti dan tetap serta semua risiko yang mungkin terjadi dalam proses penyelesaian pekerjaan sepenuhnya ditanggung oleh penyedia jasa sepanjang gambar dan spesifikasi tidak berubah.

Sementara, Perpres No. 16 Tahun 2018 menyatakan bahwa kontrak lumsum adalah: a) lingkup pekerjaan dan jumlah

harga pasti dan tetap dalam batas waktu tertentu, b) semua risiko sepenuhnya ditanggung oleh penyedia jasa, c) berorientasi pada output keluaran produk sesuai kontrak, dan d) terdapat definisi yang sama mengenai pengertian kontrak lumsum pada Perpres No. 12 Tahun 2020, pasal 27 ayat 5.

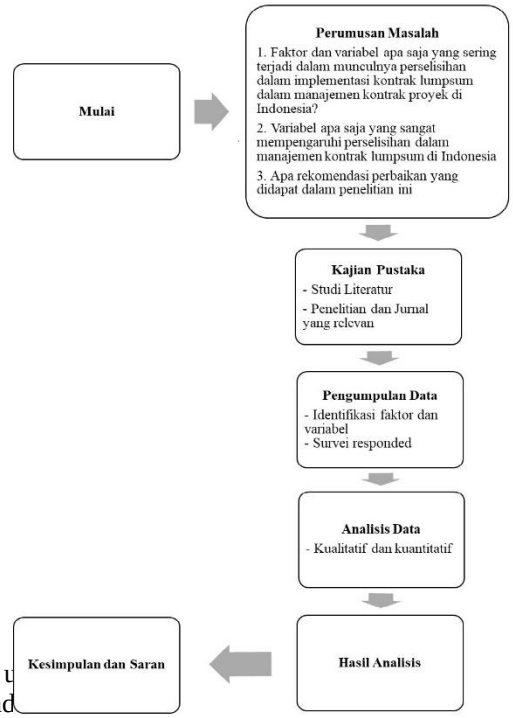
Pada pasal 33 ayat 2 dan 4 dari Permen PUPR No. 14 Tahun 2020 mengenai Kontrak Lumsum adalah sebagai berikut: a) kontrak didasarkan atas produk/keluaran (*output based*), b) ruang lingkup kemungkinan kecil berubah, dan c) *Detailed Engineering Design* (DED) dan spesifikasi teknis lengkap dan akurat.

Adapun cara pembayaran hasil pekerjaan untuk Kontrak Lumsum sebagaimana yang dijelaskan diatas, dilakukan berdasarkan tercapainya tahapan produk/keluaran yang dicantumkan dalam kontrak tanpa terperinci biaya dan volume.

Menurut FIDIC kontrak lumsum adalah jenis kontrak yang volumenya sudah bisa dipastikan dan tidak akan ada perubahan sementara kontrak gabungan yaitu kontrak lumsum dan unit price yaitu kontrak yang sebagian volumenya sudah bisa dipastikan dan sebagian masih dalam perkiraan. Dengan demikian gagasan dalam FIDIC adalah bahwa penyedia jasa konstruksi dapat memperoleh pembayaran tambahan jika penyedia jasa konstruksi melakukan perkerjaan tambahan atau pekerjaan berbeda (International Federation of Consulting Engineers, 2017)

3. METODOLOGI PENELITIAN

Jenis penelitian yang dilaksanakan adalah metode penelitian komparatif kuantitatif. Kerangka berpikir yang dilakukan dalam penelitian ini diberikan oleh **Gambar 1**. Kajian pustaka dan konsultasi dengan para pakar yang mempunyai pengalaman dalam proyek bangunan gedung tinggi dengan pembiayaan negara akan memberikan variabel penyebab perselisihan. Selanjutnya, kuesioner dirancang untuk menganalisis variabel penyebab perselisihan. Uji statistik akan menghasilkan variabel penyebab perselisihan yang paling signifikan. Dari variabel penyebab perselisihan yang paling signifikan ntuk memberikan rekomendasi dan masukan dalam meminimalisir potensi dan penyelesaian permasalahan perselisihan pada implementasi kontrak lumsum proyek bangunan tinggi milik pemerintah.

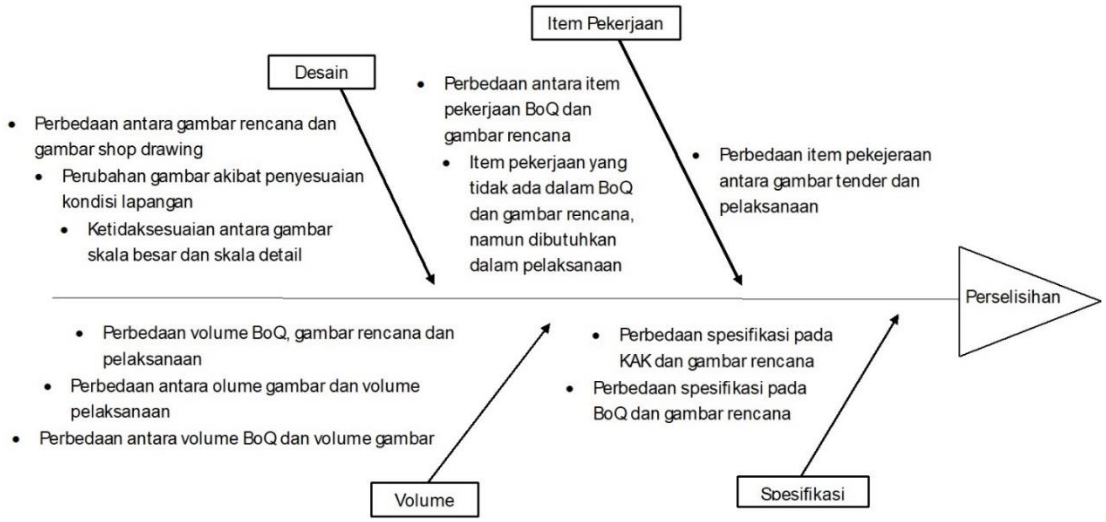


diawali dengan studi literatur u mendasar untuk melakukan campuran SCC. Dengan referensi yang ad n perencanaan campuran sebagai dasar metode experimental pada penelitian ini. Pada penelitian ini karang jahe mati dengan ciri sudah berwarna putih seperti kapur diambil dari bibir pantai Sangrila Tanjung Kait, Mauk, Kabupaten Tangerang. Karang jahe tersebut dicuci terlebih dahulu lalu dikeringkan dan kemudian ditumbuk untuk mendapatkan ukuran butir sesuai gradasi yang diinginkan. Apabila sudah hancur dan mencapai gradasi yang diinginkan yaitu gradasi no 2 maka selanjunya dilakukan pengajuan berat jenis, pengujian gradasi, dan penyerapan kadar air pada karang jahe tersebut yang nantinya akan dijadikan sebagai bahan tambah subsitusi dengan agregat halus yaitu pasir. Pasir, krikil, semen pada penelitian ini

menggunakan material yang disediakan oleh PT Bumi Prima Abadi sehingga berat jenisnya mengikuti data yang sudah tersedia. Ukuran butir agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan ukuran 10mm. Setelah pengujian material dilakukan langkah selanjutnya melakukan perhitungan untuk kebutuhan material pencampuran dengan menggunakan metode EFNARC. Kebutuhan sampel yang akan dibuat adalah sebanyak 30 dengan variasi 10 sampel untuk SCC tanpa subsitusi karang jahe (SCC A), 10 sampel selanjutnya untuk 10% subsitusi karang jahe terhadap pasir (SCC B), dan 10 sampel lagi untuk 15% subsitusi karang jahe terhadap pasir (SCC C). Setelah perhitungan kebutuhan dilakukan pencampuran, beton basah sebelum dimasukan dalam cetakan silender 15 x 30 cm dicek slumpnya agar minimal mencapai diameter 60cm. Beton yang mengering dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan perawatan dalam bak perendaman sebelum nantinya akan di uji kekuatan tekannya. Kuat tekan pada sampel benda uji akan diuji pada umur beton 7, 14, dan 28 hari. Sampel yang di uji masing-masing 3 buah diumur 7 hari, 3 buah hari diumur 14 hari dan 4 buah diumur 28 hari. Sampel yang ditekan datanya kemudian diolah untuk melihat capaian persentase kuat tekan dan persentase karang jahe berapakah yang mempunyai pengaruh besar terhadap kuat tekan SCC.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap pertama adalah penentuan variabel penyebab perselisihan yang sering terjadinya perselisihan antara kontraktor dan auditor di lapangan terkait dengan kontrak lumsum untuk proyek-proyek yang dibiayai oleh APBN atau APBD berdasarkan literatur yang relevan (Irawan et al., 2016; Wibisono & Hardjomuljadi, 2018) serta diskusi dengan beberapa manajer proyek dan pakar. Hasil penentuan tahap pertama ini ditampilkan dalam diagram tulang ikan (bandingkan dengan Gambar 2). Variabel penyebab perselisihan dikelompokkan menjadi 3 faktor yakni: volume, item perkerjaan, desain dan spesifikasi seperti ditunjukkan dalam **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.**. Pakar dalam studi ini merupakan praktisi yang mempunyai pengalaman dalam proyek bangunan gedung tinggi dengan pembiayaan negara lebih dari 10 tahun seperti diperlihatkan dalam **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.**.



Gambar 2. Diagram tulang ikan (*fishbone*)

Kajian lebih lanjut dan diskusi dengan pakar terkait dengan kriteria yang mesti ada dalam kontrak lumsum agar perselisihan dapat diminimalisasi (Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020; Hartanto et al., 2021) menghasilkan 1 faktor dan 8 variabel tambahan, sementara faktor desain dan spesifikasi dapat digabung menjadi 1 faktor karena terkait dengan kejelasan gambar. Faktor tersebut adalah faktor Kriteria Kontrak Lumsum dengan variabel X-1 sampai dengan X-8 seperti diperlihatkan dalam Tabel 2

Tabel 1. Pengalaman dan Jabatan Pakar

No.	Nama	Usia	Pengalaman	Jabatan
1.	Pakar 1	>55 Thn	>20 Thn	Ex. Kepala Satuan Pengawasan Intern
2.	Pakar 2	>35 Thn	>13 Thn	Manajer Administrasi Kontrak
3.	Pakar 3	>35 Thn	>13 Thn	Manajer Proyek

4.	Pakar 4	>35 Thn	>13 Thn	Manajer Proyek
5.	Pakar 5	>35 Thn	>15 Thn	Manajer Proyek

Responden dalam studi ini sebanyak 39 responden yang semuanya pernah terlibat dan mempunyai pengalaman dalam kegiatan proyek bangunan tinggi milik pemerintah. Adapun responden terdiri dari kalangan Pejabat Pembuat Komitmen (owner), kontraktor, konsultan manajemen konstruksi dan auditor. Auditor terdiri dari auditor BPK, BPKP dan Inspektorat. Kuesioner dalam penelitian ini memakai skala Likert dari 1-5

Selanjutnya, jawaban dari para responden ini akan diuji validitas dan reliabilitas. Pengujian validitas menggunakan nilai koefisien korelasi $r > 0{,}316$. Pengujian reliabilitas menggunakan metode Cronbach's Alpha dan tingkat korelasi $r > 0{,}9$. Kedua pengujian ini mereduksi 24 variabel penyebab perselisihan menjadi 19 variabel. Selanjutnya dari 19 variabel penyebab perselisihan berkurang menjadi 14 variabel dengan melalui uji interkolerasi. Dari uji analisis faktor dan regresi linier metode stepwise menjadi 3 variabel utama penyebab perselisihan.

Tabel 2. Variabel Perselisihan pada kontrak lumsum proyek bangunan gedung tinggi

No.	Faktor	Item	Variabel	Referensi
1.	**Kriteria Kontrak Lumsum**	X-1	Jelas lugas, mudah dimengerti dan tidak ambigu	(Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020; Irawan et al., 2016)
		X-2	Harus terperinci Ketentuan Pengguna Jasa / Kerangka Acuan Kerja	(Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020)
		X-3	Adil dan berimbang untuk kedua pihak yang terlibat Owner dan Kontraktor	(Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020)
		X-4	Keselarasan antar dokumen-dokumen dalam kontrak / Hirarki Dokumen Kontrak	(Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020)
		X-5	Tidak bertentangan dengan peraturan yang berlaku	(Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020)
		X-6	Adanya Jaminan penyelesaian proyek dengan aman dan nyaman tanpa ada kecelakaan	(Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020)
		X-7	Multi tafsir terhadap definisi kontrak lumsum	Pakar
		X-8	Adanya Jaminan Penyelesaian Pekerjaan dan estimasi biaya dan waktu yang ditetapkan	(Irawan et al., 2016)
2.	**Item Pekerjaan**	X-9	Item Pekerjaan BQ rencana berbeda dengan Gambar Tender	(Wibisono & Hardjomuljadi, 2018)

		X-10	Item Pekerjaan Gambar Tender berbeda dengan Shop Drawing	(Wibisono & Hardjomuljadi, 2018)
		X-11	Item Pekerjaan Gambar Shop Drawing berbeda dengan Item Pekerjaan Pelaksanaan	(Wibisono & Hardjomuljadi, 2018)
		X-12	Tidak terdapat dalam BQ dan Gambar Tender tetapi dibutuhkan dalam kelengkapan sistem fungsi	(Wibisono & Hardjomuljadi, 2018)
		X-13	Adanya Item pekerjaan baru yang belum ditetapkan di dalam dokumen-dokumen kontrak atau timbul saat masa pelaksanaan / pekerjaan yang tidak dapat diperkirakan sebelumnya	(Wibisono & Hardjomuljadi, 2018)
3.	**Volume**	X-14	Volume BQ rencana berbeda dengan Volume Gambar Tender	(Bawono & Pujirahardjo, 2013)
		X-15	Volume Gambar Tender berbeda dengan Volume Gambar Shop Drawing	(Bawono & Pujirahardjo, 2013)
		X-16	Volume Gambar Shop Drawing berbeda dengan Volume Pelaksanaan	(Bawono & Pujirahardjo, 2013)
		X-17	Volume pekerjaan di dalam tanah belum dapat diperkirakan pada saat tender (unforeseen condition)	Pakar 1
		X-18	Perubahan desain atau Variation Order akibat penyesuaian kondisi lapangan	(Ediyanto & Hardjomuljadi, 2020)
4.	**Gambar Desain dan Spesifikasi**	X-19	BQ rencana berbeda dengan Gambar Tender/rencana	(Irawan et al., 2016)
		X-20	Gambar Tender/rencana berbeda dengan Gambar Shop Drawing	(Irawan et al., 2016)
		X-21	Gambar Shop Drawing berbeda dengan Pelaksanaan	(Irawan et al., 2016)

		X-22	Ada perbedaan Spesifikasi pada Kerangka Acuan Kerja dengan gambar tender dan Shop Drawing	(Irawan et al., 2016)
		X-23	Ada perbedaan Spesifikasi pada BQ tender dengan Gambar Tender dan Shop Drawing	(Bawono & Pujirahardjo, 2013)
		X-24	Perbedaan dalam gambar detail (skala kecil) dengan gambar Lay out (skala besar)	Pakar 1

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari penelitian untuk analisis penyebab perselisihan dalam pelaksanaan kontrak lumsum pada proyek-proyek bangunan tinggi milik pemerintah dalam sudut pandang auditor dan penyedia jasa adalah:

1) Melalui studi literatur dan diskusi dengan manajer proyek dan para pakar menghasilkan 24 variabel yang dikelompokan dalam 5 faktor yaitu: kriteria kontrak lumsum (8 variabel), item pekerjaan (5 variabel), volume (5 variabel), gambar desain dan spesifikasi (6 variabel) pada tingkat perselisihan terhadap implementasi kontrak lumsum pada proyek bangunan tinggi milik pemerintah.
2) Variabel yang sangat berpengaruh terhadap perselisihan dalam manajemen kontrak lumsum adalah

i) X1.10 (item pekerjaan gambar tender berbeda dengan shop drawing), ii) X1.14 (volume BoQ rencana berbeda dengan volume gambar tender) dan iii) X1.22 (ada perbedaan spesifikasi pada kerangka acuan kerja dengan gambar tender dan *shop drawing*). Ketiga variabel penyebab perselisihan memiliki kontribusi sebesar 73% terhadap perselisihan.

Rekomendasi atau saran perbaikan yang diajukan peneliti berdasarkan hasil uji analisis statistik yang didapat pada uji variabel dan faktor yang sangat berpengaruh pada terjadinya perselisihan sebagai berikut:

1) Sebelum memasuki tahap kontrak pelaksanaan pekerjaan yang nantinya akan dilakukan dengan tipe manajemen kontrak lumsum. Diperlukan evaluasi dan penyempurnaan desain dari pemberi kerja dan konsultan perencana secara menyeluruh yang berorientasi pada integreated design seperti lingkup pekerjaan, volume pekerjaan, gambar dan spesifikasi teknis agar tidak terjadi selisih paham saat masa pelaksanaan antara pemberi kerja, konsultan, penyedia jasa dan auditor. Hal ini telah selaras dengan dukungan Permen PUPR No. 14 Tahun 2020 pada pasal 33 ayat 2 mengenai Jenis Kontrak dalam Pekerjaan Konstruksi dan ayat 4 mengenai penjelasan Kontrak lumsum bahwa pada butir (b) Ruang lingkup kemungkinan kecil berubah; dan butir (c) *Detailed Engineering Design* dan Spesifikasi teknis lengkap dan akurat.
2) Diperlukan adanya klausul dan pembahasan secara terperinci mengenai batasan dan penyelesaian pada dokumen kontrak jika variabel dan faktor hasil penelitian diatas terjadi pada masa kontrak pelaksanaan khususnya dengan tipe kontrak lumsum

DAFTAR PUSTAKA

Bawono, H., & Pujirahardjo, A. (2013). Analisis Perbandingan Risiko Kontrak Lumpsum Dan Kontrak Unit Price (Studi Kasus Kontraktor di Kota Samarinda Kalimantan Timur) . *Rekayasa Sipil*, *7*(2).

Ediyanto, A., & Hardjomuljadi, S. (2020). Analisis Perbandingan Model Kontrak APBN dan APBD Terhadap Model Kontrak FIDIC. *Jurnal Konstruksia*, *11*(2).

Hartanto, R., Widjajakusuma, J., & Simanjuntak, M. (2021). Studi Literatur Kontrak Lumsum Berdasarkan Standar Pemerintah Indonesia dan FIDIC. In Hermawan (Ed.), *Konferensi Nasional Teknik Sipil 15: The Construction Industry Recover, Rebuild & Renew in The Pandemic Era* (pp. 428–434). Unika Soegijapranata.

International Federation of Consulting Engineers. (2017). *Red Book. Conditions of Contract for Construction for Building and Engineering works designed by the Employer*. Fidic.

Irawan, R., Rafi'e, R., & Pratiwi, R. (2016). Studi Perbandingan Standar dan Prosedur Dokumen Kontrak FIDIC Dengan Standar Menteri Pekerjaan Umum. *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil Dan Tambang*, *2*(2).

Tristanto, W., & Widjajakusuma, J. (2022). Analisis Faktor Dan Variabel Kualitas Gambar Perencanaan Yang Berpengaruh Terhadap Keterlambatan Proyek Apartemen MN. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, *7*(7), 9091–9103.

Wibisono, A., & Hardjomuljadi, S. (2018). Analisis Pemilihan Model Kontrak Fidic Rainbow Contract 2017 Pekerjaan Pembangunan Dermaga (Kajian dari Sudut Pandang Pengguna Jasa). *Jurnal Konstruksia*, *9*(2).

ANALISIS PERBANDINGAN BIAYA DAN WAKTU PEKERJAAN *PILE CAP* DAN *TIE BEAM* DENGAN METODE PRACETAK DAN KONVENSIONAL

I Nyoman Yudha Astana[1*], GAP Candra Dharmayanti[2], dan Pande Bagus Tri Warsana[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali*
***e-mail**: astana_yudha@unud.ac.id*
[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali
e-mail: candra_dharmayanti@unud.ac.id
[3] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali
e-mail: -

ABSTRAK

Metode pelaksanaan yang umum digunakan pada pekerjaan beton dalam pelaksanaan proyek kontruksi yaitu metode pracetak dan metode konvensional. Untuk mengetahui lebih jauh kedua metode tersebut, perlu dilakukan analisis khususnya mengenai biaya dan waktu pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* antara metode pracetak dan konvensional. Penelitian ini dilakukan pada Proyek Pembanguan Restaurant La Vonne yang menggunakan metode pracetak untuk pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam*. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis perbandingan biaya dan waktu pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* menggunakan metode konvensional dan metode pracetak, serta untuk mengetahui titik impas volume terhadap waktu dan biaya pekerjaaan *pile cap* dan *tie beam* pada kedua metode tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* dengan metode konvensional lebih murah 12,70% dibandingkan dengan metode pracetak. Biaya pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* pracetak sebesar Rp. 265.400.674,33 sedangkan pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* konvensional sebesar Rp 235.500.563,57. Metode pracetak lebih cepat 26,84% dibandingkan dengan metode konvensional. Waktu pelaksanaan metode pracetak memerlukan 191,65 jam sedangkan metode konvensional membutuhkan 243,08 jam. Titik impas volume terhadap waktu terjadi pada volume 0,49m^3 dengan waktu 3,617 jam, sedangkan titik impas volume terhadap biaya terjadi pada volume 0,76m^3 memiliki biaya sebesar Rp 4.997.749,80.

Kata kunci: Waktu dan biaya, metode konvensional, metode pracetak

1. PENDAHULUAN

Proyek Pembangunan Restourant La Vonne yang berlokasi di Sunset Road, Kabupaten Badung, terdiri dari 2 lantai. Proyek ini menggunakan *pile cap* dan *tie beamnya* dengan metode pracetak, namun metode konvensional masih sering digunakan pada proyek-proyek sejenis. Untuk memilih metode yang tepat ditinjau dari segi biaya dan waktu, diperlukan analisis perbandingan antara pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* menggunakan metode konvensional dan metode pracetak, sehingga didapat titik impas dalam penggunaan metode pelaksanaan di lapangan.

Peningkatan permintaan akan fasilitas konstruksi mendukung adanya terobosan dalam metode atau sistem konstruksi terhadap biaya dan waktu pelaksanaan proyek, tenaga kerja, serta teknologi. Pada umumnya pelaksanaan proyek konstruksi memiliki jadwal yang mengharuskan untuk memperhatikan waktu pengerjaan sehingga dapat selesai tepat waktu. Upaya meningkatkan kecepatan waktu pengerjaan proyek konstruksi memerlukan manajemen waktu (*time management*) dengan memaksimalkan sumber daya yang tersedia (Soetjipto, 2014) . Apabila waktu pengerjaan konstruksi dapat diselesaikan lebih cepat dari waktu yang ditetapkan, maka biaya konstruksi menjadi lebih kecil dan dapat memberikan keuntungan kepada kontraktor.

Metode yang digunakan dalam proyek konstruksi sangat berpengaruh terhadap biaya dan waktu pelaksanaan konstruksi. Dalam bidang teknik sipil, terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk pengerjaan *pile cap* dan *tie beam*, yaitu metode konvensional dan metode pracetak. Metode beton konvensional dapat diartikan sebagai pengecoran/pengerjaan langsung di lapangan, sedangkan pracetak diproduksi terlebih dahulu di pabrik kemudian proses pemasangan dilaksanakan di lokasi proyek (Sediyanto & Alkik, 2018)

Sejauh ini terdapat beberapa penelitian sejenis terkait struktur konvensional dan pracetak dengan menganalisa perbandingan biaya dan waktu pekerjaan. Pada Penelitian sebelumnya telah membandingkan biaya dan waktu untuk pekerjaan *tie beam* dan *pile cap* menggunakan metode konvensional dan pracetak. Pemilihan metode terbaik dalam pelaksanaan dilapangan perlu dilakukan perhitungan titik impas volume pekerjaan *tie beam* dan *pile cap* antara kedua metode tersebut. Titik impas ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam menentukan metode yang tepat apabila dilihat dari segi biaya dan waktu.

2. LANDASAN TEORI

Pekerjaan Beton

Beton merupakan bahan komposit yang digunakan pada konstruksi dengan campuran dari beberapa material seperti semen, agregat halus, agregat kasar, air dan bahan tambahan lainnya sesuai dengan keperluan (Tjokrodimuljo, 2007). Metode konvensional dan metode pracetak merupakan metode yang dapat digunakan dalam pelaksanaan beton diantaranya:

a Beton Konvensional
Beton konvensional merupakan beton yang semua pekerjaannya dikerjakan secara manual dengan menyusun tulangan pada struktur yang dibangun. Namun, metode ini membutuhkan biaya tinggi untuk bekisting dan upah pekerja. (Ervianto, 2006).

b Beton Pracetak
Beton pracetak merupakan komponen yang dicetak atau dipabrikasi, baik di bengkel produksi maupun di lokasi proyek, kemudian dipasang di lapangan untuk membentuk sebuah bangunan.

Kedua metode pelaksanaan tersebut memiliki keunggulan serta kelemahan masing-masing. Dimana hal tersebut dapat menjadi pertimbangan untuk memilih metode pelaksanaan yang akan digunakan pada proyek konstruksi. Menurut Elly dan Supartono (2000), beton pracetak mempunyai beberapa keunggulan dan kelemahan daripada dengan beton konvensional, antara lain:

a Keunggulan
- Risiko biaya tak terduga yang rendah dan hanya sedikit perbaikan yang diperlukan.
- Mutu yang lebih terjamin.
- Waktu pelaksanaan yang lebih singkat.

b Kelemahan
- Hanya dapat dilakukan pada daerah yang sudah memiliki peralatan untuk *erection* dan *handling*.
- Apabila produksi sedikit maka tidak ekonomis.
- Ukuran dan bentuk elemen pracetak dibatasi oleh kapasitas alat angkat dan kemampuan transportasi.

Rencana Anggaran Biaya

Rencana Anggaran Biaya (RAB) merupakan estimasi yang mencakup biaya upah, material, dan biaya lainnya yang diperlukan untuk membuat suatu bangunan. RAB juga berfungsi sebagai acuan untuk menganalisis supaya proses pembangunan dapat berlangsung secara efektif dan efisien (Tahan, 2021).
Metode pelaksanaan pekerjaan sangat mempengaruhi biaya dari suatu bangunan. Dikarenakan setiap metode pekerjaan membutuhkan tenaga kerja, material dan alat yang berbeda-beda (Ibrahim, 2001). Hal tersebut memperngaruhi biaya tidak langsung suatu bangunan. Secara matematis rencana anggaran biaya dapat dituliskan RAB = ∑(volume x harga satuan)

Produktivitas

Produktivitas tenaga kerja ialah ukuran volume pekerjaan yang dapat diselesaikan oleh tenaga kerja dalam satuan pekerjaan tertentu setiap satuan waktu . Produktivitas ini dapat digunakan sebagai ukuran efisiensi dalam pemanfaatan tenaga kerja, karena seorang pekerja mungkin belum sepenuhnya memanfaatkan seluruh kemampuannya dalam suatu pekerjaan (Sedarmayanti, 2009).

$$P = \frac{volume\ pekerjaan}{satuan\ waktu}$$

Break Event Point

Menurut Munawir (2014), *break event point* merupakan suatu kondisi di mana dalam operasional perusahaan, perusahaan tidak mendapatkan laba maupun rugi (pendapatan = total biaya). Oleh karena itu, *break even point* (titik impas) ialah keadaan di mana perusahaan tidak mendapatkan laba maupun kerugian, dengan demikian perusahaan dikatakan impas apabila jumlah pendapatan sama dengan jumlah pengeluaran (Munawir, 2010).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Biaya Pelaksanaan *Pile Cap* dan *Tie Beam* Konvensional

Sesudah menentukan volume dan menganalisis harga satuan untuk pekerjaan *pile cap* dan *tie beam*, langkah berikutnya adalah menghitung analisis biaya pelaksanaan untuk beton konvensional secara keseluruhan. Hasil rekapitulasi biaya pelaksanaan untuk pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rekapitulasi biaya pelaksanaan *pile cap* dan *tie beam* konvensional

No	Pekerjaan	Harga Total (Rp)

1	Pile Cap	95.612.143,73
2	Tie Beam 1	58.367.490,43
3	Tie Beam 2	53.844.434,03
4	Tie Beam 3	27.676.495,38
	Total	**235.500.563,57**

Biaya Pelaksanaan *Pile Cap* dan *Tie Beam* Pracetak

Sesudah menentukan volume dan menganalisis harga satuan untuk pekerjaan *pile cap* dan *tie beam*, adalah menghitung analisis biaya pelaksanaan untuk beton pracetak secara keseluruhan. Hasil rekapitulasi dari biaya pelaksanaan dapat pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi biaya pelaksanaan *pile cap* dan *tie beam* pracetak

No	Pekerjaan	Harga Total (Rp)
1	Pile Cap	110.222.539,10
2	Tie Beam 1	62.734.074,19
3	Tie Beam 2	61.387.410,61
4	Tie Beam 3	31.056.650,43
	Total	**265.400.674,33**

Waktu Pelaksanaan *Pile Cap* dan *Tie Beam* Konvensional dan Pracetak

Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* menggunakan beton konvensional dan pracetak akan dibandingkan. Setelah perbandingan waktu antara kedua metode tersebut, akan terlihat metode mana yang lebih cepat dalam menyelesaikan pekerjaan. Waktu pelaksanaan pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* menggunakan metode konvensional ditampilkan pada Tabel 3 sementara waktu pelaksanaan menggunakan metode pracetak terdapat pada Tabel 4.

Tabel 3. Rekapitulasi waktu pelaksanaan *pile cap* dan *tie beam* konvensional

No	Pekerjaan	Durasi
Pile Cap		
1	Pek. Galian	33,34 Jam
2	Pek. Urugan Pasir	2,12 Jam
3	Pek. Lantai Kerja	2,12 Jam
4	Pek. Bekisting	19,72 Jam
5	Pek. Pembesian	29,74 Jam
6	Pek. Pengecoran	2,28 Jam
7	Pek. Pengurugan	3,10 Jam
8	Pek. Pemadatan	3,10 Jam
TOTAL		**95,34 Jam**
Tie Beam		
1	Pek. Galian	35,55 Jam
2	Pek. Urugan Pasir	4,15 Jam
3	Pek. Lantai Kerja	3,8 Jam
4	Pek. Bekisting	56,56 Jam
5	Pek. Pembesian	44,69 Jam
6	Pek. Pengecoran	3,03 Jam
TOTAL		**147,78 Jam**

Tabel 4. Rekapitulasi waktu pelaksanaan *pile cap* dan *tie beam* pracetak

No	Pekerjaan	Durasi

Pile Cap		
1	Pek. Galian	33,34 Jam
2	Pek. Urugan Pasir	2,12 Jam
3	Pek. Lantai Kerja	1,94 Jam
4	Pek. Produksi	32 Jam
5	Pek. Instal Pile Cap	4 Jam
6	Pek. Pembesian	5,38 Jam
7	Pek. Pengecoran	1 Jam
8	Pek. Urugan dan Pemadatan Tanah	6 Jam
TOTAL		**85,76 Jam**
Tie Beam		
1	Pek. Galian	35,55 Jam
2	Pek. Urugan Pasir	4,15 Jam
3	Pek. Lantai Kerja	3,8 Jam
4	Pek. Produksi	47,45 Jam
5	Pek. Instal Tie Beam	5,85 Jam
6	Pek. Pembesian	9,02 Jam
TOTAL		**105,82 Jam**

Analisis Perbandingan Biaya Pekerjaan *Pile Cap* dan *Tie Beam*

Berdasarkan hasil analisi data dan perhitungan yang diperoleh, rencana anggaran biaya total untuk pekerjaan pile cap dan tie beam dengan metode konvensional yaitu sebesar Rp. 235.500.563,57 sedangkan pada metode pracetak yaitu sebesar Rp. 265.400.674,33. maka dari data tersebut metode konvensional lebih hemat dibandingkan dengan metode pracetak. Untuk persen perbandingan biaya pekerjaan pile cap dan tie beam pada proyek Restaurant La VONNE dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Perbandingan biaya} = \frac{RAB\ Pracetak - RAB\ Konvensiol}{RAB\ Konvensional} x100\%$$

$$= \frac{265.400.674{,}33 - 235.500.563{,}57}{235.500.563{,}57} x100\%$$

$$= 12{,}70\%$$

Biaya pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* dengan menggunakan metode konvensional lebih hemat sebesar 12,70% dibandingkan dengan metode pracetak.

Analisis Perbandingan Waktu Pekerjaan *Pile Cap* dan *Tie Beam*

Berdasarkan hasil analisis data pada kedua metode yang ditinjau, maka didapatkan waktu pelaksanaan metode konvensional selama 243,08 jam dan waktu pelaksanaan metode pracetak selama 191,65 jam. Setelah mendapatkan waktu pelaksanaan dari kedua metode, maka dapat dihitung persentase perbandingan penggunaan metode pracetak pada pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* sebagai berikut:

$$\text{Perbandingan Waktu} = \frac{Waktu\ Konvensional - Waktu\ Pracetak}{Waktu\ Pracetak} x100\%$$

$$= \frac{243{,}08 - 191{,}65}{191{,}65} x100\%$$

$$= 28{,}64\%$$

Waktu pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* dengan menggunakan metode pracetak lebih cepat sebesar 26,84% dibandingkan dengan metode konvensional.

Analisis Titik Impas (Break Event Point)

Setelah mengetahui waktu dan biaya pekerjaan *pile cap* dan *tie beam*, maka dapat ditentukan titik impas volume terhadap waktu dan biaya masing-masing metode. Perhitungan titik impas dilakukan dengan menggunakan persamaan regresi linear sederhana. Sehingga titik impas dapat ditemukan pada titik perpotongan antara persamaan garis regresi linier tersebut.

Titik Impas Volume Terhadap Biaya

Melalui analisis yang telah dilakukan maka didapatkan persamaan regresi dari metode konvensional dan metode pracetak.

Metode Konvensional:

$\hat{Y} = 454.332,452 + 6.015.272,134\ X$

$6.015.272,134\ X = -454.332,452$ ..... 1)

Metode Pracetak:

$\hat{Y} = -12.359.377,96 + 22.980.025,57X$

$22.980.025,57\ X = 12.359.377,96$ ..... 2)

Untuk mengetahui koordinat titik impas dari metode konvensional dengan metode pracetak, maka persamaan 1) dan 2) diselesaikan dengan cara superposisi.

$6.015.272,134\ X = -454.332,452$

$22.980.025,57\ X = 12.359.377,96$ —

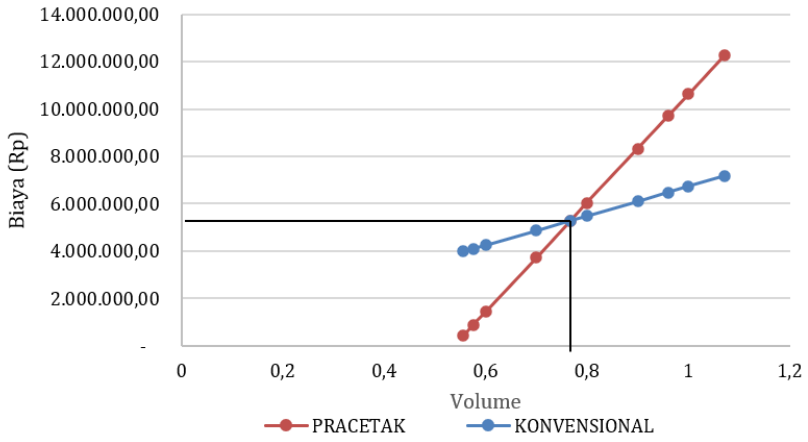
$-16.964.753,44\ X = -12.813.710,41$

$X = 0,76$

Masukkan nilai X ke persamaan metode konvensional sehingga didapatkan:

$Y = 454.332,452 + 6.015.272,134\ X$

$Y = 4.997.749,80$



Gambar 1 Grafik Hubungan Volume Terhadap Biaya

Melalui hasil analisis titik impas maka didapatkan titik impas volume terhadap biaya pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* antara metode konvensional dengan metode pracetak pada volume 0,76m^3 dengan biaya sebesar Rp 4.997.749,80. Gambar 1 merupakan grafik yang menunjukkan jika volume >0,76m^3 maka biaya pada metode konvensional lebih murah dibandingkan dengan metode pracetak.

Titik Impas Volume Terhadap Waktu

Melalui analisis yang telah dilakukan maka didapatkan persamaan regresi dari metode konvensional dan metode pracetak.

Metode Konvensional:

$\hat{Y} = 0,669 + 5,957\ X$

$5,957\ X = -0,669$ ..... 3)

Metode Pracetak:

$\hat{Y} = 2,56 + 2,141\ X$

$2,141\ X = -2,56$ ..... 4)

Untuk mengetahui koordinat titik impas dari metode konvensional dengan metode pracetak, maka persamaan 3) dan 4) diselesaikan dengan cara superposisi.

$5,957\ X = -0,669$

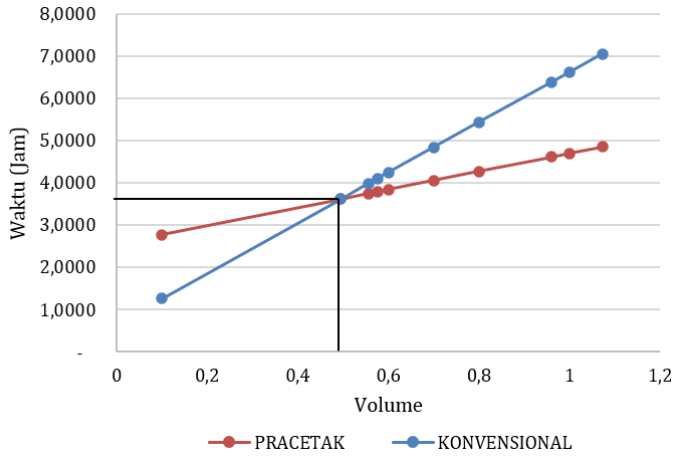
$2,141\ X = -2,56$ —

$3,815\ X = 1,888$

$X = 0,495$

Masukkan nilai X ke persamaan metode konvensional sehingga didapatkan:

Y= 0,669 + 5,957 X
Y= 3,62



Gambar 2 Grafik Hubungan Volume Terhadap Waktu

Analisis titik impas volume terhadap waktu pekerjaan struktur pile cap dan tie beam antara metode konvensional dengan metode pracetak didapatkan pada volume 0,49 m^3 dengan waktu 3,617 jam. Sehingga pada Gambar 2 menunjukkan jika volume > 0,49 m^3 maka waktu pada metode pracetak akan lebih cepat (rendah) dibandingkan dengan metode konvensional.

4. KESIMPULAN

Biaya yang diperoleh pada pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* dengan menggunakan metode konvensional adalah sebesar Rp. 235.500.563,57 lebih murah 12,70% jika dibandingkan dengan biaya pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* metode konvensional. Sedangkan untuk biaya pekerjaan *pile cap* dan *tie beam* metode pracetak adalah sebesar Rp. 265.400.674,33. Waktu yang didapatkan pada pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* dengan menggunakan metode pracetak lebih cepat sebesar 26,84% dengan waktu pekerjaan struktur pile cap dan tie beam metode konvensional. Waktu pelaksanaan pekerjaan pile cap dan tie beam metode konvensional adalah 243,08 jam sedangkan pekerjaan pile cap dan tie beam metode pracetak selama 191,65 jam.
Sedangkan titik impas volume terhadap biaya pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* antara metode konvensional dengan metode pracetak pada volume 0,76m^3 dengan biaya sebesar Rp 4.997.749,80. Sedangkan titik impas volume terhadap waktu pekerjaan struktur *pile cap* dan *tie beam* antara metode konvensional dengan metode pracetak didapatkan pada volume 0,49m^3 dengan waktu 3,617 jam.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standarisasi Nasional. (2012). Tentang Tata Cara Perhitungan Harga Satuan Pekerjaan Beton Pracetak Untuk Konstruksi Bangunan Gedung (SNI 7832- 2012). Jakarta, Indonesia.

Elly, T., & Supartono, F. X. (2000). Kecenderungan Industri Konstruksi Indonesia Masa Depan Dengan Pengembangan Sistem Elemen Pracetak.

Ervianto, W. I. (2006). Eksplorasi Teknologi dalam Proyek Konstruksi; Beton Pracetak dan Bekisting. In *CV ANDI OFFSET*.

Ibrahim, H. Bachtiar. 2001. (2001). Rencana Dan Estimate Real of Cost. Jakarta : Bumi Aksara. *Rencana Dan Estimate Real of Cost. Jakarta : Bumi Aksara.*

Munawir. (2010). Analisa Laporan Keuangan. Edisi keempat. Cetakan kelima belas. In *Yogyakarta*.

Munawir. (2014). Analisa Laporan Keuangan. Edisi keempat. Cetakan ketujuh belas. In *Liberty, Yogyakarta*.

Sedarmayanti. (2009). *Sumber Daya Manusia Dan Produktivitas Kerja: Sedarmayanti - Belbuk.com*. Mandar Maju.

Sediyanto, & Alkik, M. H. (2018). Analisis Perbandingan Waktu dan Biaya pada Pelaksanaan Pekerjaan Kolom Precast dan Konvensional. Ilmu Teknik dan Komputer, 2(1).

Soetjipto, J. W. (2014). Analisa Perbandingan Pelaksanaan Pembangunan Menggunakan Beton Konvensional dengan Elemen Beton Pracetak pada Bangunan Tingkat Tinggi. *Diagonal*, *5*(October).

Tahan, T. (2021). Perbandingan Rencana Anggaran Biaya Antara Metode SNI 2010 Dan Analisis Harga Satuan Pekerjaan. *Jurnal Kacapuri : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, *4*(2).

Tjokrodimuljo, K. (2007). Teknologi Beton, Buku Ajar. *Jurusan Teknik Sipil–Magister Teknologi Bahan Bangunan–Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Yogyakarta*.

ANALISIS PERBANDINGAN WAKTU PELAKSANAAN PEKERJAAN PENGECORAN MENGGUNAKAN TOWER CRANE DENGAN CONCRETE PUMP

Anak Agung Gde Agung Yana[1], I Putu Ari Sanjaya[2], I Putu Agus Arie Gunawan[3], I Gusti Ngurah Oka Suputra[4], dan Made Yani Anggreni[5].

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung Bali*
***e-mail**: agungyana@unud.ac.id*

[2]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung Bali*
e-mail: iputuarisanjaya@unud.ac.id

[3]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung Bali*
e-mail: ariegnwn23@gmail.com

[4]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung Bali*
e-mail: okasuputra@unud.ac.id

[5]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Ngurah Rai, Jl. Padma Penatih Denpasar Bali*
e-mail: yani.anggreni@unr.ac.id

ABSTRAK

Pemilihan alat yang tepat untuk melakukan pekerjaan konstruksi sangat dibutuhkan, agar pelaksanaan pekerjaan menjadi efektif dan efesien. Menggunakan alat yang tepat akan mempengaruhi biaya dan waktu. Pada proyek Pembangunan Gedung Kantor (DPMPTSP, Disnaker, Diskes Dan Capil) Kabupaten Gianyar menggunakan dua alat pada waktu melakukan pengecoran pelat lantai yaitu *tower crane* dan *concrete pump*. Kedua alat yang digunakan memiliki kelebihan dan kekurangan, yang mempengaruhi produktivitas pelaksanaan. Produktivitas alat akan mempengaruhi waktu dan biaya proyek konstruksi. Penelitian yang dilakukan di sini adalah mencari titik impas (*break event point*) waktu penggunaan alat *tower crane* dan *concrete pump* pada waktu pelaksanaan pengecoran pelat lantai. Metoda pelaksanaan yang dilakukan adalah dengan melakukan pengamatan siklus pengecoran yang dilakukan oleh alat concrate pump dan tower crane. Dari pengamatan yang dilakukan akan diperoleh produktivitas masing-masing alat. Dengan menggunakan metoda regresi dan hasil pengamatan yang dilakukan, selanjutnya data pengawmatan dianalisis untuk mencari persamaan regresi antara volume dan waku pelaksanaan pekerjaan pengecoran menggunakan tower crane dan concrate pump. Persamaan regresi ini akan digunakan mencari waktu pelaksanaan pengecoran pada lantai 1, 2, dan atap serta titik impas (break event point) dari kedua alat yang di gunakan untuk melakukan pengecoran pelat lantai pada gedung. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, untuk menyelesaikan pengecoran setiap 6 m^3 pada lantai II, III dan Atap secara berurutan tower crane memerlukan waktu (0,208; 0,219; 0,400) jam sedangakn concrete pump membutuhkan waktu (0,138; 0,155; 0,216) jam. Untuk titik impas kedua alat tersebut pada lantai II, III dan Atap atas volume terhadap waktu adalah (4,926 m3; 0,1 jam), (5,011 m3; 0,121 jam), (3,149 m3; 0,116 jam). Hasil titik impas menunjukan bahwa alat tower crane dibatasi hingga volume titik impas tertentu pada masing-masing lantai, setelah titik impas tersebut penggunaan concrete pump lebih menguntungkan dari segi dan waktu.

Kata kunci: waktu, pengecoran beton, *tower crane, concrete pump, break event.*

1. PENDAHULUAN

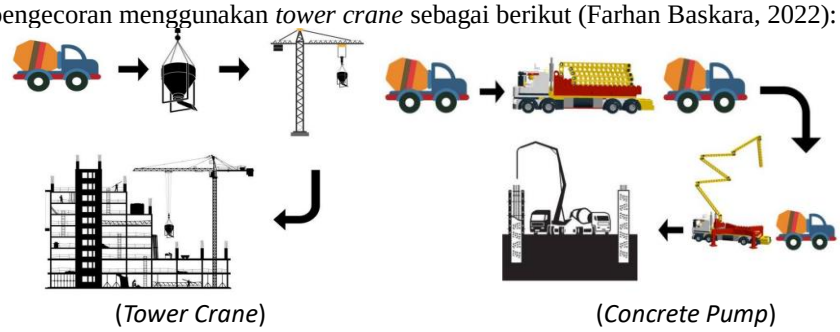
Perkembangan dan kemajuan teknologi yang pesat di bidang konstruksi membuat pembangunan hotel, mall, kantor dan sebagainya menjadi lebih mudah dikerjakan. Akibat hal tersebut menuntut perusahaan-perusahaan di bidang konstruksi untuk meningkatkan efektifitas dalam segala pekerjaan pada proyek konstruksi. Suatu perusahaan konstruksi harus mempunyai spesifikasi yang baik untuk bisa bersaing pada bidang konstruksi. Hal yang penting diperhatikan adalah pemilihan alat berat, pengendalian waktu serta pengawasan terhadap mutu bahan agar sesuai dengan spesifikasi awal yang telah direncanakan. Jenis peralatan, jumlah dan kapasitas alat yang akan digunakan merupakan faktor yang sangat penting dalam menentukan penggunaan alat berat yang digunakan pada proyek. Pada pelaksanaan proyek kontruksi terdapat beberapa item pekerjaan yang dilakukan, salah satunya pekerjaan pengecoran pelat lantai. Pengecoran pelat lantai pada pembangunan gedung bertingkat membutuhkan bantuan alat berat agar memudahkan dalam pengerjaan dan mengefisienkan waktu. Penggunaan alat berat juga sangat berpengaruh terhadap biaya karena pekerjaan yang volumenya terlalu besar dapat dikerjakan dengan mudah. Proyek pembangunan Gedung Kantor (DPMPTSP, Disnaker, Diskes Dan Capil) Kabupaten Gianyar yang berlokasi di Desa Buruan Blahbatuh,

Kabupaten Gianyar, Provinsi Bali merupakan pembangunan gedung kantor dengan luas bangunan 8,880 m2 yang mencakup lantai basement, lantai 1, lantai 2, lantai 3, dan lantai atap. Pada pelaksanaan proyek menggunakan dua alat pada pekerjaan pengecoran yaitu tower crane dan concrete pump dalam satu lokasi proyek untuk mempercepat proses pengecoran, namun tetap diperhitungkan agar kedua alat berjalan dengan efisien. Dalam kontrak kerja dinyatakan bahwa metode pengecoran pelat lantai menggunakan satu alat yaitu concrete pump, sedangkan saat dilapangan terdapat pekerjaan pengecoran yang menggunakan tower crane. Hal tersebut dikarenakan disebutkan bahwa pihak kontraktor dapat melakukan inovasi dalam item pekerjaan yang dilakukan, namun pihak kontraktor tidak semata-mata melakukan sebuah inovasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan waktu pekerjaan pengecoran permeter kubik beton serta pengaruhnya terhadap produktivitas yang dihasilkan melalui analisis Break Even Point (BEP) atau titik impas. Dalam hal ini Break Even Point bertujuan untuk mengetahui metode pengecoran yang paling efektif dan efisien pada pelaksanaan proyek. Pada analisis BEP akan dicari perpotongan persamaan garis regresi dari masing-masing alat pengecoran yang digunakan.

2. TINJAUAN PUSTAKA DAN METODA

Pengecoran Beton

Menurut SNI 2847-2019 beton merupakan campuran semen hidraulis atau semen portland dengan bahan agregat kasar, agregat halus, dan air dengan atau tidak menggunakan bahan tambahan lainnya. Proses dimulai saat beton plastis dituangkan ke dalam cetakan baik menggunakan bucket (dibantu dengan alat berat) maupun melalui pipa, beton yang sudah dituangkan kemudian dikonsolidasikan dan diratakan. Menurut Saputro (2017a), konsolidasi dilakukan bertujuan untuk mengurangi rongga yang terdapat dalam beton, dapat dilakukan secara manual dengan cara menusuk menggunakan besi batang atau dapat dilakukan menggunakan alat penggetar (vibrator), hal ini dilakukan agar beton yang telah melewati pengecoran mampu menahan beban maksimal karena tidak terdapat rongga udara dalam beton tersebut. Tahapan pengecoran menggunakan *tower crane* sebagai berikut (Farhan Baskara, 2022):



Gambar 1. Proses Pengecoran
Sumber: Farhan Baskara (2022)

Alat Berat Pengecoran

Penggunaan peralatan disesuaikan dengan kebutuhan dilapangan dan bergantung pada besar proyek yang dilaksanakan. Peralatan yang akan dibahas adalah peralatan yang hanya dipakai pada proyek tempat studi kasus. Menurut Saputro (2017) masing-masing alat memiliki spesifikasi, produktivitas dan teknis pengecoran yang berbeda-beda.

Tower Crane

Tower crane merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengangkat material secara vertikal dan horizontal ke suatu tempat yang tinggi pada ruang gerak terbatas (Ahmad & Suryanto, 2012).

Concrete Pump

Menurut Limanto (2009), concrete pump merupakan alat pompa campuran beton cair menggunakan pipa untuk mengalirkan campuran beton yang dibantu dengan pompa sebagai pendorong dalam satu kesatuan pada kendaraan.

Pemilihan Alat

Dalam memilih peralatan untuk suatu royek konstruksi harus sesuai dengan kondisi lapangan, agar dapat berproduksi dengan optimal dan seefisien mungkin (Saputro, 2017). Peralatan yang dipakai dalam proses pengecoran beton harus tetap memastikan beberapa aspek untuk memberikan kemudahan dan tidak merugikan dalam pelaksanaannya sehingga dapat mengurangi mutu beton. Perlu diketahui bahwa pemilihan peralatan untuk pengecoran pada pengangkutan bahan cor dari mixer ke bidang yang hendak dicor, perlu memperhatikan tiga aspek berikut yaitu

(Saputro, 2017):

1. Jarak antara *mixer* dengan bidang pekerjaan yang akan di cor.
2. Volume pengecoran.
3. Metode yang dipakai dalam pencampuran beton dan cara pengecoran beton.

Produktivitas Peralatan

Produktivitas adalah perbandingan antara output dan input hasil yang didapat (output) dengan seluruh sumber daya yang digunakan (input)(Fadhila & Nursin, 2019). Produktivitas alat tergantung pada kapasitas dan waktu siklus alat. Rumus persamaan dasar untuk mencari produktivitas alat adalah (Habibi et al., 2023):

$$Produktivitas = \frac{kapasitas}{CT} \quad (1)$$

atau

$$Produktivitas = \frac{volume\ pekerjaan}{durasi} \quad (2)$$

Pada umumnya waktu siklus alat ditentukan menggunakan satuan menit sedangkan produktivitas alat dihitung menggunakan produksi /jam sehingga perlu adanya perubahan dari menit ke jam. Jika faktor efisiensi alat dimasukan maka rumus menjadi:

$$Produktivitas = kapasitas\ x\ \frac{60}{CT} x\ efisiensi \quad (3)$$

Keterangan:

- Produktivitas alat dihitung dalam m^3/jam, waktu alat ditetapkan dalam menit (60 menit).
- kapasitas = kapasitas *bucket* untuk menampung beton dalam m^3.
- CT = *cyclus time*/waktu siklus (menit).
- efisiensi = waktu efektif alat bekerja dalam satu jam (menit/jam).

Siklus kerja pemindahan material merupakan suatu kegiatan yang dilakukan berulang. Waktu yang diperlukan dalam melakukan kegiatan tersebut disebut waktu siklus atau cycle time (CT), dirumuskan sebagai berikut (Fadhila & Nursin, 2019):

$$CT = LT + HT + DT + RT + ST \quad (4)$$

Keterangan:

LT (*loading time*)	= waktu muat yang dibutuhkan alat untuk memuat material ke dalam alat angkut sesuai kapasitasnya.
HT (*hauling time*)	= waktu angkat yang diperlukan alat untuk bergerak dari tempat pemuatan ke tempat pembongkaran material.
DT (*dumping time*)	= yaitu waktu yang diperlukan alat untuk pembongkaran material di tempat yang ditentukan.
RT (*return time*)	= waktu yang diperlukan alat untuk kembali ke tempat pemuatan.
ST (*spotting time*)	= waktu alat menunggu sampai alat diisi kembali.

Faktor efisiensi alat sangat mempengaruhi produktivitas, dimana efisiensi alat tersebut bekerja tergantung dari beberapa hal yaitu:

1. Kemampuan operator memakai alat
2. Pemilihan dan pemeliharaan alat
3. Perencanaan dan pengaturan letak alat
4. Topografi dan volume pekerjaan
5. Kondisi cuaca
6. Metode pelaksanaan alat

Dalam menentukan besarnya efisiensi kerja alat di lapangan memang sulit, namun berdasarkan penelitian terdahulu dan pengalaman dapat ditentukan efisiensi yang mendekati kenyataan, seperti pada Tabel 1 (Frederika & Rai Widhiawati, 2017):

Tabel 1. Efisiensi Kerja

Kondisi Operasi Alat	Pemeliharaan Mesin				
	Baik Sekali	Baik	Sedang	Buruk	Buruk Sekali
Baik Sekali	0,83	0,81	0,76	0,70	0,63
Baik	0,78	0,75	0,71	0,65	0,60
Sedang	0,72	0,69	0,65	0,60	0,54
Buruk	0,63	0,61	0,57	0,52	0,45
Buruk Sekali	0,52	0,50	0,47	0,42	0,32

Sumber: Frederika & Rai Widhiawati (2017)

Waktu Siklus Alat

Dalam perhitungan waktu siklus terdapat HT (haulting time) dan RT (return time) yang dihitungt dari pergerakan hoisting, swelling, trolley dan landing yang sesuai kapasitas dari tower crane yang digunakan dalam menentukan produktivitas dari alat tersebut. Menurut Ahmad & Suryanto (2012) untuk menghitung produktivitas tower crane menggunakan persamaan sebagai berikut:

a) Waktu Tempuh Vertikal (Tv)

$$Tv = \frac{Dv}{Vv} \quad (5)$$

Keterangan:
Tv = Waktu tempuh vertikal (menit)
Dv = Jarak tempuh vertikal (m)
Vv = Kecepatan Hoist TC angkat & kembali (m/menit)

b) Waktu Tempuh Rotasi (Tr)

$$Tr = \frac{\alpha}{Vr} \quad (6)$$

Keterangan:
Tr = Waktu tempuh rotasi (menit)
α = Sudut putar (rad)
Vr = Kecepatan swing TC (radian/menit)

c) Waktu Tempuh Horizontal (Th)

$$Th = \frac{Dh}{Vh} \quad (7)$$

Keterangan:
Th = Waktu tempuh horizontal (menit)
Dh = Jarak tempuh horizontal (m)
Vh = Kecepatan Trolley TC angkat & kembali (m/menit)

d) Waktu Tempuh Landing

$$TLanding = \frac{Jarak\ Tambahan}{Vlanding} \quad (8)$$

Keterangan:
TLanding = Waktu tempuh *landing*/mendaratkan (menit)
Vlanding = Kecepatan Trolley TC angkat & kembali (m/menit)

Dalam menentukan waktu tempuh rotasi terdapat mekanisme putar tower crane yang dihitung seperti berikut (Ahmad & Suryanto, 2012) :

a) Jarak Asal Terhadap TC (D1)

$$D1 = \sqrt{(y_{TC} - y_{AB})^2 + (x_{AB} - X_{TC})^2} \quad (9)$$

b) Jarak Tujuan Terhadap TC (D2)

$$D2 = \sqrt{(y_{TC} - y_{TJ})^2 + (x_{TJ} - X_{TC})^2} \quad (10)$$

c) Jarak Hirizontal (Dh)

$$Dh = |D1 - D2| \quad (11)$$

d) Sudut *Slewing*

$$D3 = \sqrt{(y_{TJ} - y_{AB})^2 + (x_{AB} - X_{TJ})^2} \quad (12)$$

Untuk menentukan sudut mekanisme putar :

$$\cos\alpha = \frac{D1^2 + D2^2 + D3^2}{2\ x\ D1\ x\ D2} \quad (13)$$

Keterangan:
Dh = Jarak tempuh horizontal (m)
x_{TC}= Koordinat x posisi TC
y_{TC}= Koordinat y posisi TC
x_{AB}= Koordinat x posisi awal bucket
y_{AB}= Koordinat y posisi awal bucket
x_{TJ}= Koordinat x posisi tujuan area pengecoran
y_{TJ}= Koordinat y posisi tujuan area pengecoran

Sehingga HT dan RT didapat dari:

$$HT = Tv_{angkat} + Tr_{angkat} + Th_{angkat} + TLanding$$
$$RT = Tv_{kembali} + Tr_{kembali} + Th_{kembali} + TLanding$$

Keterangan:
HT (*hauling time*) = waktu angkat yang diperlukan alat untuk bergerak dari tempat pemuatan ke tempat pembongkaran material.
RT (*return time*) = waktu kembali yang diperlukan alat untuk kembali ke tempat pemuatan.
Tv = Waktu tempuh vertikal (menit)
Tr = Waktu tempuh rotasi (menit)
Th = Waktu tempuh horizontal (menit)
TLanding = Waktu tempuh *landing*/mendaratkan (menit)

Waktu Pelaksanaan

Waktu pelaksanaan suatu pekerjaan akan dipengaruhi oleh metode pekerjaan dan target waktu pekerjaan yang diinginkan untuk melaksanakan suatu item pekerjaan. Analisa perbandingan waktu pekerjaan Time Study adalah teknik pengukuran dengan cara pengumpulan data berdasarkan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu pekerjaan. (Ilham & Herzanita, 2021):

Analisis Regresi

Regresi digunakan untuk mempelajari pola dan mengukur hubungan dua konsep statistika antara dua atau lebih variabel, jika digunakan hanya dua variabel disebut regresi sederhana dan jika digunakan lebih dari dua variabel disebut regresi berganda (Frederika & Rai Widhiawati, 2017). Secara umum persamaan garis regresi linier sederhana dinyatakan sebagai berikut (Frederika & Rai Widhiawati, 2017):

$$Y = a + bX \quad (14)$$

Rumus persamaan regresi tersebut diperoleh dengan menggunakan Metode Kuadrat Terkecil (Least Squares Method). Apabila diberikan serangkaian data sampel (X1, Y1) dengan I = 1,2,3,…..n, maka nilai dengan (peramalan) kuadrat terkecil bagi parameter dalam persamaan garis regresi dinyatakan sebagai berikut:

$$\hat{Y} = a + bX \quad (15)$$

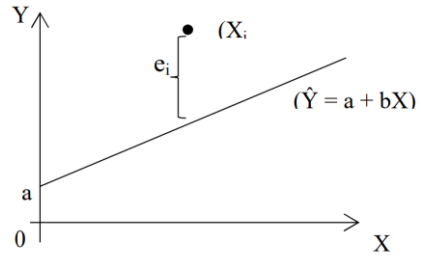
Metode kuadrat terkecil akan memberikan jumlah kuadrat deviasi vertikal (tegak) dari titik – titik observasi ke garis regresi tersebut sekecil mungkin, atau dengan kata lain metode kuadrat terkecil memberikan $\sum(Yi - \hat{Y})2 = \sum(ei)2$ yang terkecil. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. mengenai kriteria kuadrat terkecil.

Agar jumlah kuadrat simpangan vertikal ke garis regresi yaitu $\Sigma (Yi - Y)2$ sekecil mungkin, maka $\Sigma (Yi - Y)2 = \Sigma (ei)2$ diminimumkan terhadap a dan b untuk menentukan nilai a dan b diberikan dengan rumus berikut:

$$b = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{n\sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (16)$$
$$a = \frac{(\sum Y - b\sum X)}{n} \quad (17)$$

Keterangan:
$\hat{Y}$ = Taksiran nilai Y
X =Variabel bebas (volume)
Y = Variabel terikat (waktu)
a = Konstanta atau titik potong dengan sumbu Y, bila X = 0
b =Arah garis regresi, yang menyatakan perubahan nilai Y akibat perubahan I unit X
n =banyaknya pasangan data obeservasi/pengukuran

Nilai koefisien regresi bisa bertanda positif atau negatif, hal tersebut menyatakan arah hubungan atau pengaruh variabel bebas X terhadap variabel terikat Y.



Gambar 2. Kriteria Kuadrat Kecil
Sumber: (Frederika & Rai Widhiawati, 2017)

Analisis BEP

Menurut Ryan Kumala (2022), titik impas adalah suatu keadaan dimana suatu alternatif tidak lebih baik ataupun tidak lebih buruk dari alternatif yang lainnya. Dalam analisis BEP ini dicari perpotongan dari persamaan garis regresi dari masing-masing peralatan pengecoran. Perpotongan dari persamaan garis yang dapat digunakan adalah metode eliminasi, yaitu dengan cara mengalikan dengan sebuah angka sehingga ada variabel yang mempunyai koefisien yang sama. Berikut merupakan contoh perhitungan titik impas (Ryan Kumala, 2022).

Misalkan terdapat dua buah persamaan garis yaitu 2x + 5y = 6, dan 3 x - 7y = 5, maka penyelesaian titik potongnya yaitu:

a) Masing-masing persamaan dikalikan dengan 3 (persamaan I) dan 2 (persamaan II) untuk mengeliminasi nilai x (untuk mendapatkan nilai y) menjadi:

2x + 5y = 6	(x 3) → 6x + 15y	=	18	
3x – 7y = 5	(x 2) → 6x + 14y	=	10	—
	0 +29y	=	8	
	y	=	0,276	

b) Kemudian subtitusi nilai y yang didapat kedalam rumus pertama atau ke dua (untuk mendapatkan nilai x)

2x + 5y = 6 → 2x + 5(0,276)	6
2x	6 – 1,38
x	4,62/2
x	2,31

c) Sehingga titik potongnya berada di koordinat (x = 2,31; y = 0,276)

Metode Penelitian

Objek penelitian dilakukan pada proyek Pembangunan Gedung Kantor (DPMPTSP, Disnaker, Diskes, dan Capil) Kecamatan Blahbatuh, Kabupaten Gianyar. Pelaksanaan proyek tersebut menggunakan kedua alat pengecoran dalam pelaksanaannya yaitu tower crane dan concrete pump. Metode observasi yaitu pengamatan lapangan dan mengadakan wawancara langsung. Pengolahan data dilakukan mulai dari waktu siklus pengecoran dan produktivitas peralatan. Dalam pengamatan waktu siklus yang digunakan merupakan waktu siklus masing-masing peralatan namun berbeda lantai dalam hal penggunaannya, maka dari itu perlu adanya penyesuaian data dengan melakukan analisis perhitungan waktu siklus pada masing-masing peralatan tersebut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Waktu Siklus

Waktu siklus TC rata-rata 1 concrete bucket pada lantai II:

$$CT = LH + HT + DT + RT + ST$$
$$CT = 36 + 96{,}6 + 20 + 88{,}0 + 60 = 299{,}9\ detik$$

Jumlah mobilisasi concrete bucket dalam proses pengecoran tiap 6 m3 beton ready mix sebanyak 7 kali. Maka waktu total tiap pengecoran 6 m3 pada pekerjaan pengecoran pelat lantai II = 7 x 299,9 = 2099,58 detik ≈ 34,99 menit ≈ 0,583 jam. Untuk menyesuaikan data waktu siklus dilakukan perhitungan estimasi waktu siklus TC pada lantai III dan Atap. Berikut merupakan perhitungan haulting time dan return time pada lantai III:

Kapasitas Mekanisme Tower crane:

Tabel 2 Spesifikasi Mekanisme *Tower crane*

Keterangan	*Hoisting*	*Slewing*	*Trolley*	*Landing*
	m/menit	rpm	m/menit	m/menit
Waktu Angkat	40	0.7	100	40
Waktu Kembali	80	0.7	100	80

Sumber: PT. Gaharu Sempana

Volume pengecoran = 215,93 m^3
Jarak vertikal (Dv) = 10,17 m
Jarak tambahan = 2 m
Koordinat posisi TC (x;y) = 367540,66; 60783.37
Koordinat posisi awal *bucket* (x;y) = 315952,15; 89660,09
Koordinat area pengecoran (x;y) = 388431,00; 68088,94
Jarak Jarak Asal Terhadap TC (D1)

$$D1 = \sqrt{(y_{TC} - y_{AB})^2 + (x_{AB} - X_{TC})^2}$$

$$D1 = \sqrt{(60783.37 - 89660{,}09)^2 + (315952{,}15 - 367540{,}66)^2}$$

$$D1 = 59{,}12 \text{ m}$$

Jarak Tujuan Terhadap TC (D2)

$$D2 = \sqrt{(y_{TC} - y_{TJ})^2 + (x_{TJ} - X_{TC})^2}$$

$$D2 = \sqrt{(60783.37 - 68088{,}94)^2 + (388431{,}00 - 367540{,}66)^2}$$

$$D2 = 22{,}13\ m$$

Jarak Horizontal (Dh)

$$Dh = |D1 - D2|$$

$$Dh = |59{,}12 - 22{,}13|$$

$$Dh = 36{,}99\ m$$

Sudut *Slewing* (D3)

$$D3 = \sqrt{(y_{TJ} - y_{AB})^2 + (x_{AB} - X_{TJ})^2}$$

$$D3 = \sqrt{(68088{,}94 - 89660{,}09)^2 + (315952{,}15 - 388431{,}00)^2}$$

$$D3 = 75{,}62\ m$$

$$\cos\alpha = \frac{D1^2 + D2^2 + D3^2}{2\ x\ D1\ x\ D2}$$

$$\cos\alpha = \frac{59{,}12^2 + 22{,}13^2 + 75{,}62}{2\ x\ 59{,}12\ x\ 22{,}13}$$

$$\cos\alpha = -0{,}66°$$

$$\alpha = 2{,}295\ rad$$

1. Perhitungan Waktu Pengangkatan (*Haulting Time*)
   a) Waktu Tempuh Vertikal (Tv)

$$Tv = \frac{Dv}{Vv}$$

$$Tv = \frac{10{,}17}{40} x60\ dtk = 18{,}3\ detik$$

   b) Waktu Tempuh Rotasi (Tr)

$$Tr = \frac{\alpha}{Vr}$$

$$Tr = \frac{2{,}295}{0{,}7} x60\ dtk = 196{,}7\ detik$$

   c) Waktu Tempuh Horizontal (Th)

$$Th = \frac{Dh}{Vh}$$

$$Th = \frac{36{,}99}{100} x60\ dtk = 22{,}19\ detik$$

   d) Waktu Tempuh Landing

$$TLanding = \frac{Jarak\ Tambahan}{Vlanding}$$

$$TLanding = \frac{2}{40} x60\ dtk = 3\ detik$$

Total waktu pengangkatan = Tv + Tr + Th + Tlanding
Total waktu = 18,3 + 196,7 + 22,19 + 3 = 240,2 detik

2. Perhitungan Waktu Kembali (*Return Time*)
   a) Waktu Tempuh Vertikal (Tv)

$$Tv = \frac{Dv}{Vv}$$

$$Tv = \frac{10,17}{80} x60\ dtk = 9,1\ detik$$

   b) Waktu Tempuh Rotasi (Tr)

$$Tr = \frac{\alpha}{Vr}$$

$$Tr = \frac{2,295}{0,7} x60\ dtk = 196,7\ detik$$

   c) Waktu Tempuh Horizontal (Th)

$$Th = \frac{Dh}{Vh}$$

$$Th = \frac{36,99}{100} x60\ dtk = 22,19\ detik$$

   d) Waktu Tempuh Landing

$$TLanding = \frac{Jarak\ Tambahan}{Vlanding}$$

$$TLanding = \frac{2}{80} x60\ dtk = 1,5\ detik$$

Total waktu kembali = Tv + Tr + Th + Tlanding
Total waktu = 9,1 + 196,7 + 22,19 + 1,5 = 229,5 detik

Waktu siklus TC rata-rata 1 concrete bucket lantai III:

$$CT = LH + HT + DT + RT + ST$$
$$CT = 36 + 101,8 + 20 + 91,2 + 60 = 309,0\ detik$$

Jumlah mobilisasi concrete bucket dalam proses pengecoran tiap 6 m3 beton ready mix sebanyak 7 kali. Maka waktu total tiap pengecoran 6 m3 pada pekerjaan pengecoran pelat lantai III = 7 x 309,0 = 2162,7 detik ≈ 36,04 menit ≈ 0,601 jam. Untuk lantai atap waktu total tiap pengecoran 6 m3 pada pekerjaan pengecoran = 7 x 334,5 = 2319,5 detik ≈ 38,66 menit ≈ 0,644 jam.

Waktu siklus CP rata-rata /6m3 beton ready mix lantai III:

$$CT = LH + HT + DT + RT + ST$$
$$CT = 15,1 + 0 + 0 + 0 + 0 = 15,1\ menit$$

Maka waktu siklus concrete pump pada pengecoran pelat lantai III /6m3 adalah 15,1 menit ≈ 0,252 jam. Untuk lantai atap waktu siklus concrete pump pada pengecoran pelat lantai III /6m3 adalah 15,1 menit ≈ 0,252 jam. Untuk menyesuaikan data waktu siklus CP maka dilakukan pendekatan dengan cara mengurangi waktu siklus lantai III dengan selisih rata-rata waktu siklus pengamatan.

Rata-rata CT Lantai III = 13,7 menit

Rata-rata CT Lantai Atap = 15,1 menit

Waktu siklus lantai II:

$$CT = CT\ Lt\ III - (ratarata\ ct\ Atap - ratarata\ ct\ III)$$
$$CT = 11,10 - (15,1 - 13,7)$$
$$CT = 9,76$$

Waktu siklus CP rata-rata /6m3 beton ready mix lantai II:

$$CT = LH + HT + DT + RT + ST$$
$$CT = 12,4 + 0 + 0 + 0 + 0 = 12,4\ menit$$

Maka waktu siklus *concrete pump* pada pengecoran pelat lantai II /6m^3 adalah 12,4 menit ≈ 0,207 jam.

Tabel 3 Rata-rata waktu siklus

Rata-rata	Total Waktu (dt)					
	Tower Crane			Concrete Pump		
	Lt. II	Lt. III	Lt. Atap	Lt. II	Lt. III	Lt. Atap
detik	2099,58	2162,66	2319,51	12,41	13,75	15,09
menit	34,99	36,04	38,66	0,21	0,23	0,25
jam	0,583	0,601	0,644	0,003	0,004	0,004

Analisis Regresi

Dari hasil perhitungan waktu yang telah dilakukan, maka dilanjutkan dengan analisis regresi seperti persamaan 14. Pada analisis ini diberikan contoh satu perhitungan detail hingga analisis BEP dan rekapan persamaan regresi dapat dilihat pada Tabel 6. Adapun contoh perhitungan yang dapat ditampilkan yaitu regresi waktu lantai II. Kumulatif waktu siklus rata-rata yang didapatkan dibuat dalam tabel sebanyak truck mixer yang diperlukan yaitu n=36, dikarenakan variabel X menggunakan volume truck mixer maka X merupakan kelipatan 6. Kemudian dijumlahkan dan dijabarkan dalam rumus sebagai berikut:

Perhitungan persamaan regresi waktu TC:

$$Y = a + bX$$

Dimana persamaan tersebut dijabarkan dalam persamaan 16 dan 17 sebagai berikut:

$$b = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{n\sum X^2 - (\sum X)^2} = 0{,}1$$

$$a = \frac{(\sum Y - b\sum X)}{n} = -0{,}392$$

Jadi diperoleh persamaan regresi:

$$Y = -0{,}392 + 0{,}1X$$

Perhitungan persamaan regresi waktu CP:

$$Y = a + bX$$

Dimana persamaan tersebut dijabarkan dalam persamaan 16 dan 17 sebagai berikut:

$$b = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{n\sum X^2 - (\sum X)^2} = 0{,}035$$

$$a = \frac{(\sum Y - b\sum X)}{n} = -0{,}072$$

Jadi diperoleh persamaan regresi:

$$Y = -0{,}072 + 0{,}035X$$

Tabel 6 Persamaan Regresi

Lantai	Persamaan Regresi Waktu (Y=a+bX)	
	Tower Crane	Cocrete Pump
II	-0,392+0,1X	-0,072+0,035X
III	-0,380+0,1X	-0,055+0,035X
Atap	-0,197+0,099X	0,007+0,035X

Analisis BEP

Metode yang digunakan untuk menentukan koordinat titik perpotongan garis yaitu dengan eleminasi persamaan garis regresi.

Koordinat titik impas tower crane dengan concrete pump Lantai II:

Eliminasi 'Y':

Y= -0,392 + 0,1X		X	=	92
Y= -0,072 + 0,035X	→	35 X	=	72
Dikurangi:		65 X	=	2
		X	=	-0,32/-0,065
		X	=	4,926

Masukan nilai 'X' ke persamaan regresi TC:

Y = -0,392 + 0,1(4,926) = 0,1

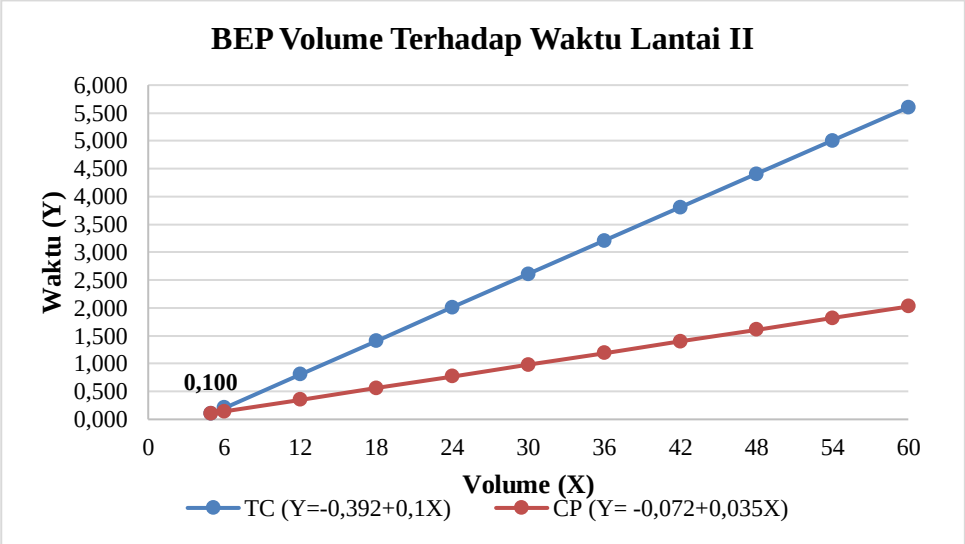
Jadi diantara TC dan CP bertitik impas pada x = 4,926 dan y = 0,1.

Perbandingan waktu pengecoran beserta grafik titik impas lantai II ditampilkan dalam Tabel dan Gambar 4.

Tabel 7 Perbandingan Volume dengan Waktu Pengecoran Lantai II

Volume (m3)	Waktu (jam) (Y)	
(X)	TC (Y=-0,392+0,1X)	CP (Y= -0,072+0,035X)
4,926	0,100	0,100
6	0,208	0,138
12	0,807	0,348
18	1,406	0,557
24	2,005	0,767
30	2,604	0,977
36	3,203	1,186
42	3,802	1,396
48	4,401	1,606
54	5,001	1,816
60	5,600	2,025

Keterangan: = Titik impas TC dan CP



Gambar 4. Grafik Titik Impas Volume dengan Waktu TC dan CP Pengecoran Lantai II

Berdasarkan Tabel 2 diketahui perbandingan waktu pengecoran pelat lantai II yang menyatakan setiap kelipatan volume 6 m3 membutuhkan waktu 0,208 jam untuk TC dan 0,138 jam untuk CP. Pada Gambar 4 diketahui grafik titik impas dari waktu pengecoran TC dengan CP adalah pada volume 4,926 m3 dengan waktu yang dibutuhkan 0,1 jam. Dengan adanya titik impas dapat dilihat bahwa concrete pump melakukan pekerjaan pengecoran lebih cepat dibandingkan tower crane.

4. SIMPULAN

Untuk lantai II, III dan Atap secara berurutan TC membutuhkan waktu yaitu (0,208 jam; 0,219 jam; 0,400 jam) sedangkan CP membutuhkan waktu (0,138 jam; 0,155 jam; 0,216 jam) pada setiap volume 6 m3 pekerjaan pengecoran. Maka pada ketiga lantai tersebut CP melakukan pekerjaan lebih cepat dibandingkan TC. Titik impas volume terhadap waktu pada lantai II, III dan Atap adalah (4,926 m3; 0,1 jam), (5,011 m3; 0,121 jam), (3,149 m3; 0,116 jam). Dari segi waktu penggunaan concrete pump lebih menguntungkan karena setelah titik impas concrete pump membutuhkan waktu yang lebih sedikit dibanding tower crane untuk melakukan pengecoran pelat lantai dengan volume yang lebih besar dari 4,923 m3).

5. DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, I. A., & Suryanto, M. (2012). *Analisis Produktivitas Dan Biaya Operasional Tower Crane Pada Proyek Puncak Central Business District Surabaya*.

Fadhila, H., & Nursin, A. (2019). *Analisis Waktu Siklus Tower Crane Pada Proyek South Side Apartment*.

Farhan Baskara. (2022). *Analisis Biaya Dan Waktu Pelaksanaan Pekerjaan Pengecoran Menggunakan Concrete Pump Dan Concrete Bucket*.

Frederika, A., & Rai Widhiawati, I. A. (2017). *Analisis Produktivitas Metode Pelaksanaan Pengecoran Beton Ready Mix Pada Balok Dan Pelat Lantai Gedung*. *Jurnal Spektran*, *5*(1).

Habibi, M., Pramanda, H., Idroes, I., & Ariansyah, D. (2023). *Analisis Perbandingan Waktu, Biaya Dan Tenaga Kerja Alat Concrete Lift Dan Concrete Pump Pada Pembangunan Gedung Pusdalops Kota Banda Aceh*. *Maret*, *2*(1), 135–146.

Ilham, M., & Herzanita, A. (2021). *Analisis Perbandingan Bekisting Konvensional Dengan Bekisting Aluminium Ditinjau Dari Aspek Biaya Dan Waktu Pelaksanaan*. *Jurnal Artesis*, *1*(1).

Limanto, S. (2009). *Analisis Produktivitas Concrete Pump Pada Proyek Bangunan Tinggi*. In *Konferensi Nasional Teknik Sipil* (Vol. 3).

Ryan Kumala. (2022). *Analisis Break Even Point Terhadap Pelaksanaan Pekerjaan Struktur Beton Dan Profitabilitas Proyek (Studi Kasus Proyek Pembangunan Pandawa Residence)*.

Saputro, C. D. (2017). *Studi Komparasi Biaya Dan Waktu Berdasarkan Metode Pelaksanaan Pekerjaan Pengecoran Beton (Studi Kasus Proyek Pembangunan Hotel Sewutomo Yogyakarta)*.

Sni 2847-2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung Dan Penjelasan*.

ANALISIS RISIKO DAN BIAYA K3 PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG KANTOR TERPADU KABUPATEN GIANYAR BALI

Dewa Ketut Sudarsana[1*], A. A. Diah Parami Dewi[2], I Putu Yuda Sutrisna Mudri[3]

[123]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana Bali, Jl. Kampus Bukit Unud Jimbaran, Badung, Bali
***e-mail**: dksudarsana@unud.ac.id*

ABSTRAK

Pelaksanaan Proyek Pembangunan Gedung Kantor Terpadu (DPMPTSP, DISNAKER, DISKES, dan CAPIL) Kabupaten Gianyar ditengarai alokasi biaya K3 belum memadai. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi biaya komponen Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) yang dibutuhkan serta membandingkan persentase biaya SMKK dengan nilai kontrak. Metode deskriptip digunakan pada penelitian ini. Pengumpulan data dilakukan melalui pengamatan langsung, wawancara dengan pihak terkait, dan data sekunder seperti Time Schedule, Rencana Anggaran Biaya (RAB), dan gambar kerja. Analisis risiko menggunakan metode matrik kemungkinan dan keparahan. Evaluasi biaya K3 mengacu Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019. Hasil identifikasi bahaya ditemukan 106 risiko dengan persentase 11% risiko rendah, 27% risiko sedang, 55% risiko tinggi, dan 13% risiko sangat tinggi. Evaluasi biaya komponen SMKK menghasilkan total biaya Rp. 827.653.346,23 dengan persentase 1,2% lebih besar dari penawaran biaya K3 pada kontrak

Kata kunci: SMKK, analisis risiko K3, evaluasi biaya K3

1. PENDAHULUAN

Perusahaan konstruksi memegang peranan krusial dalam mendorong pertumbuhan ekonomi dan pembangunan nasional. Namun, tantangan terkait keselamatan dan kesehatan kerja (K3) masih harus diatasi. Meskipun banyak peraturan K3 yang ada, tingkat kecelakaan kerja di Indonesia tetap tinggi. Pada tahun 2017, sekitar 2,78 juta pekerja meninggal akibat kecelakaan dan penyakit kerja (Romadona et al., 2024), dan jumlah kecelakaan meningkat dari 123.041 pada 2017 menjadi 173.105 pada 2018 (Sumarna, 2020). Hal ini disebabkan oleh pandangan sebagian pihak yang meremehkan pentingnya K3 dan menganggapnya sebagai beban tambahan biaya proyek. Salah satu proyek konstruksi dengan risiko tinggi adalah Proyek Pembangunan Gedung Kantor untuk DPMPTSP, DISNAKER, DISKES, dan CAPIL di Kabupaten Gianyar, yang berlokasi di Jalan Udayana, Desa Buruan, Kecamatan Blahbatuh, Kabupaten Gianyar, dan diawasi oleh PT. Gaharu Sempana. Proyek ini sangat menekankan keselamatan kerja karena skala dan risikonya. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis untuk menilai penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) serta memperkirakan biaya yang diperlukan untuk memenuhi standar K3 dalam proyek ini.

Pengertian K3

"Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) mencakup berbagai tindakan yang dirancang untuk melindungi kesejahteraan fisik dan mental para pekerja, dengan fokus pada pencegahan kecelakaan kerja dan penyakit akibat pekerjaan. Menurut Fariza Yulianti Saputri et al. (2024), K3 bertujuan untuk memastikan dan melindungi keselamatan serta kesehatan pekerja dengan cara mencegah kecelakaan dan penyakit yang terkait dengan pekerjaan". Sementara itu, Zebua et al. (2022) menjelaskan bahwa K3 merupakan bentuk perlindungan yang dirancang agar pekerja tetap berada dalam kondisi aman dan sehat selama menjalankan tugas mereka. Tindakan K3 meliputi penilaian risiko, perancangan prosedur kerja yang aman, dan penyediaan pelatihan serta peralatan pelindung diri untuk mengurangi risiko kecelakaan dan penyakit di tempat kerja.

Sistem manajemen K3

Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) dalam proyek konstruksi sangat krusial karena risiko kecelakaan yang tinggi. Tanpa penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3), proyek konstruksi dapat menghadapi berbagai masalah dalam aspek kemanusiaan, ekonomi, lingkungan, dan hukum (Romadona et al., 2024). Implementasi SMK3:

1. "Risiko Kecelakaan: Proyek konstruksi sering melibatkan berbagai kegiatan berisiko tinggi, sehingga penerapan SMK3 adalah langkah penting untuk mengelola dan mengurangi risiko tersebut. SMK3 membantu menciptakan lingkungan kerja yang aman dengan menetapkan prosedur, standar, dan pelatihan yang diperlukan untuk melindungi pekerja dari potensi bahaya.
2. Penerapan SMK3 sesuai Permen PUPR Nomor 10 Tahun 2021: Permen PUPR Nomor 10 Tahun 2021

mengatur Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) yang harus diterapkan dalam proyek konstruksi. SMKK adalah elemen dasar yang memastikan keselamatan dalam proyek konstruksi dengan mengatur pengendalian mutu pekerjaan konstruksi (PMPM). Penerapan SMKK mencakup pengembangan kebijakan keselamatan, identifikasi risiko, penetapan prosedur kerja aman, dan pelaksanaan pelatihan serta pemantauan secara berkala.

3. Tujuan SMKK: SMKK bertujuan untuk melindungi keselamatan dan kesehatan tenaga kerja serta lingkungan sekitar proyek. Dengan menerapkan SMKK, perusahaan konstruksi dapat mengurangi risiko kecelakaan dan penyakit kerja, meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, dan memenuhi ketentuan hukum yang berlaku".

Secara keseluruhan, penerapan SMKK yang efektif sangat penting untuk memastikan keselamatan dan kesehatan pekerja, kelancaran proyek, dan kepatuhan terhadap peraturan yang berlaku.

Identifikasi bahaya/risiko

Identifikasi bahaya merupakan langkah penting dalam upaya pencegahan kecelakaan dan pengendalian risiko. Tanpa mengidentifikasi potensi bahaya yang mungkin terjadi, tidak akan ada upaya pencegahan dan pengendalian yang dapat dilakukan untuk meminimalkan risiko kecelakaan kerja (Nalhadi et al., 2015). Identifikasi bahaya juga merupakan proses sistematis untuk mengenali potensi bahaya, yang bertujuan untuk meningkatkan kewaspadaan dan kehati-hatian tenaga kerja dalam melaksanakan tugasnya, sehingga dapat mencegah terjadinya kecelakaan kerja (Ramadhan et al., 2017). Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan identifikasi bahaya yang mungkin terjadi dalam sebuah proyek konstruksi agar potensi bahaya dapat diminimalkan dengan pengendalian yang tepat.

Penilaian risiko

Penilaian risiko adalah metode yang digunakan untuk mengelola risiko yang dihadapi oleh pekerja dan memastikan keselamatan serta kesehatan tenaga kerja selama bekerja (Anwar et al., 2017). Proses penilaian risiko melibatkan penentuan atau evaluasi tingkat risiko yang diperoleh dari mengalikan angka kemungkinan dan keparahan yang dihasilkan dari bahaya yang telah diidentifikasi, sehingga menghasilkan nilai risiko (Harjono, 2018). Nilai kemungkinan dan keparahan ini diperoleh dari tabel yang mengacu pada AS/NZS 4360:2004, seperti yang terdapat pada Tabel 1 dan Tabel 2. Setelah nilai risiko ditentukan, langkah berikutnya adalah perankingan risiko, yang mengklasifikasikan risiko sebagai rendah, sedang, tinggi, atau sangat tinggi. Proses perankingan ini mengacu pada tabel jenis prioritas sesuai AS/NZS 4360:2004, seperti yang terlihat pada Tabel 3.

Tabel 1. Nilai Tingkat Kemungkinan

Likelihood/ probability	**Rating**	**Deskripsi**
Frequent	5	Selalu terjadi
Probable	4	Sering terjadi
Occasional	3	Kadang-kadang dapat terjadi
Unlikely	2	Mungkin dapat terjadi
Improbable	1	Sangat jarang terjadi

Tabel 2. Nilai Tingkat Keparahan

Severity	***Rating***	**Deskripsi**
Catastrophic	5	Meninggal dunia, cacat permanen / serius, kerusakan lingkungan yang parah, kebocoran B3, kerugian finansial yang sangat besar, biaya pengobatan > 50 juta.
Major	4	Hilang hari kerja, cacat permanen / sebagian, kerusakan lingkungan yang sedang, kerugian finansial yang besar, biaya pengobatan < 50 juta.
Moderate/ Serious	3	Membutuhkan perawatan medis, terganggunya pekerjaan, kerugian finansial cukup besar, perlu bantuan pihak luar, biaya perlu bantuan pihak luar, biaya pengobatan < 10 juta.
Minor	2	Penanganan P3K, tidak terlalu memerlukan bantuan dari luar, biaya finansial sedang, biaya pengobatan < 1 juta
Negligible	1	Tidak mengganggu proses pekerjaan, tidak ada cidera / luka, kerugian financial kecil, biaya pengobatan < 100 ribu.

Tabel 3. Skala Tingkat Risiko

Risk rank	Deskripsi
17 – 25	*Extreme high risk* – risiko sangat tinggi
10 – 16	*High risk* – risiko tinggi
5 – 9	*Medium risk* – risiko sedang
1 – 4	*Low risk* – risiko rendah”

2. METODE

Rancangan penelitian

Penelitian ini menggabungkan “pendekatan kualitatif dan kuantitatif untuk menganalisis risiko dan biaya K3 pada proyek Pembangunan Gedung Kantor di Kabupaten Gianyar. Data dikumpulkan melalui observasi langsung dan wawancara dengan empat responden kunci (Site Manager, Safety Officer, Tenaga Ahli Struktur, dan Tenaga Ahli K3) untuk data primer, serta memanfaatkan dokumen proyek seperti RAB dan jadwal waktu untuk data sekunder”. Analisis mencakup identifikasi risiko kecelakaan kerja dan penilaian risiko dengan menggunakan standar AS/NZS 4360:2004, penentuan tindakan pengendalian, dan perhitungan biaya K3 berdasarkan Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019. Metode analisis mencakup analisis kualitatif untuk penilaian risiko dan kuantitatif untuk perhitungan biaya, dengan bantuan Microsoft Office dan Excel. Hasil akhir penelitian adalah persentase biaya K3 terhadap nilai kontrak proyek, memberikan gambaran komprehensif tentang aspek keselamatan dan kesehatan kerja dalam konteks finansial proyek.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi risiko

Hasil penelitian ini mengidentifikasi 106 risiko pada proyek pembangunan Gedung Kantor di Kabupaten Gianyar, yang diringkas menjadi 27 risiko utama berdasarkan jenis pekerjaan yang dilakukan.

Tabel 4. Identifikasi Bahaya

No	Identifikasi risiko
1	Tergelincir / Jatuh dan Longsoran
2	Terkena alat penggali/ excavator
3	Tertabrak alat pangkut material
4	Tertimpa Material angkutan
5	Tertimpa jatuhan dari pecahan tiang pancang
6	Tertimpa tiang pancang
7	Tergelincir ke lubang pile cap
8	Tangan terluka akibat pemotongan besi, kaki terluka terkena kawat/ pasangan pembesian
9	Tertimpa tanah dinding galian
10	Terkena adukan beton
11	Tertimpa material lainnya
12	Tangan terjepit saat pemasangan bekisting
13	Terjatuh dari ketinggian
14	Tangan terluka akibat alat pemotong material
15	Terbakar akibat pengelasan baja

16	Terkena penyakit mata karena pengelasan
17	Tertusuk limbah material yang tajam
18	Terhirup debu dari pemotongan material
19	Mata terkena debu atau serpihan dari pemotongan material kolom fasad
20	Terkena adukan mortar perekat hable serta campuran semen dengan pasir yang di gunakan pada plester dan acian
21	Terbakar karena api yang di timbulkan oleh percikan api yang terkena bahan mudah terbakar seperti tiner saat proses pengecatan
22	Tangan terluka akibat pahat
23	Tersengat arus listrik
24	Terpecik Aspal panas
25	Terpleset Aspal panas
26	Terhirup Bau Aspal / Debu
27	Terjepit/tertabrak alat berat”

Dalam menilai risiko, penelitian ini menggunakan metode AS/NZS 4360:2004, yaitu standar internasional untuk manajemen risiko. Standar ini menyediakan panduan untuk proses identifikasi, analisis, evaluasi, pengendalian, dan komunikasi risiko, yang sangat penting untuk mitigasi risiko dalam proyek konstruksi.

Penilaian risiko

Setelah dilakukannya wawancara serta pengamatan secara langsung di lapangan dan mendapatkan hasil identifikasi bahaya seperti pada Tabel 4. Pada penilaian risiko di lakukan dengan melakukan wawancara dengan Site Manager, Safety Officer, Tenaga Ahli Struktur, Dan Tenaga Ahli K3. Rekapan hasil penilaian risiko bisa di lihat pada tabel 5.

Tabel 5. Penilaian Risiko

No	Identifikasi resiko	Kemungkinan	Keparahan	Penilaian Risiko	Kategori
1	Tergelincir / Jatuh dan Longsoran	3	5	15	Risiko Tinggi
2	Terkena alat penggali/ excavator	3	4	12	Risiko Tinggi
3	Tertabrak alat pangkut material	3	5	15	Risiko Tinggi
4	Tertimpa Material angkutan	3	5	15	Risiko Tinggi
5	Tertimpa jatuhan dari pecahan tiang pancang	2	4	8	Risiko Sedang
6	Tertimpa tiang pancang	2	4	8	Risiko Sedang
7	Tergelincir ke lubang pile cap	3	3	9	Risiko Sedang
8	Tangan terluka akibat pemotongan besi, kaki terluka terkena kawat/ pasangan pembesian	4	2	8	Risiko Sedang
9	Tertimpa tanah dinding galian	3	5	15	Risiko Tinggi
10	Terkena adukan beton	2	2	4	Risiko Rendah
11	Tertimpa material lainnya	3	5	15	Risiko Tinggi
12	Tangan terjepit saat pemasangan bekisting	3	2	6	Risiko Sedang
13	Terjatuh dari ketinggian	4	5	20	Risiko Sangat Tinggi
14	Tangan terluka akibat alat pemotong material	4	4	16	Risiko Tinggi

15	Terbakar akibat pengelasan baja	4	4	16	Risiko Tinggi
16	Terkena penyakit mata karena pengelasan	4	4	16	Risiko Tinggi
17	Tertusuk limbah material yang tajam	4	3	12	Risiko Tinggi
18	Terhirup debu dari pemotongan material	3	4	12	Risiko Tinggi
19	Mata terkena debu atau serpihan dari pemotongan material kolom fasad	4	3	15	Risiko Tinggi
20	Terkena adukan mortar perekat hable serta campuran semen dengan pasir yang di gunakan pada plester dan acian	3	3	9	Risiko Sedang
21	Terbakar karena api yang di timbulkan terkena percikan api yang terkena bahan mudah terbakar seperti tiner saat proses pengecatan	3	5	15	Risiko Tinggi
22	Tangan terluka akibat pahat	4	2	8	Risiko Sedang
23	Tersengat arus listrik	4	5	20	Risiko Sangat Tinggi
24	Terpecik Aspal panas	3	4	12	Risiko Tinggi
25	Terpleset Aspal panas	3	4	12	Risiko Tinggi
26	Terhirup Bau Aspal / Debu	4	4	16	Risiko Tinggi
27	Terjepit/tertabrak alat berat	3	5	15	Risiko Tinggi”

Berdasarkan tabel pengendalian risiko, terdapat total 27 hasil identifikasi bahaya yang meliputi 1 risiko rendah, 7 risiko sedang, 17 risiko tinggi, dan 2 risiko sangat tinggi. Pengendalian awal yang dilakukan setelah identifikasi dan penilaian risiko meliputi kegiatan seperti Morning Briefing, inspeksi lokasi sebelum memulai pekerjaan, penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) dan Alat Pelindung Kerja (APK), serta pemasangan rambu, Safety Line atau pagar pembatas, dan perlengkapan K3 lainnya.

Tabel 6. Pengendalian Awal Risiko

Identifikasi resiko	Penilaian Risiko	Kategori	Pengendalian Awal
Tergelincir / Jatuh dan Longsoran	15	Risiko Tinggi	Melakukan inspeksi lokasi sebelum memulai pekerjaan dan melakukan Brefing morning Sebelum memulai pekerjaan agar semua tenaga kerja mengunakan APD yg lengkap khususnya sepatu *safety* dan juga memasang *safety line*
Terkena alat penggali/ excavator	12	Risiko Tinggi	Memastikan oprator alat berat memiliki ijin/sertifikat menggunakan alat berat dan menjaga jarak dengan alat berat saat di gunakan
Tertabrak alat pangkut material	10	Risiko Tinggi	Memperhatikan sekitar lingkungan proyek yang menjadi akses alat pengangkut material, memasang rambu
Tertimpa Material angkutan	20	Risiko Sangat Tinggi	Menjaga jarak saat pengangkutan maupun penurunan material dan selalu menggunakan APD lengkap
Tertimpa jatuhan dari pecahan tiang pancang	12	Risiko Tinggi	Menjaga jarak saat pengangkutan maupun penurunan material dan selalu menggunakan APD lengkap
Tertimpa tiang pancang	12	Risiko Tinggi	Mengecek kelayakan tali sling pada alat pengangkat yang tergabung pada unit HSPD serta menjaga jarak pada saat pengangkatan tiang pancang dan

			menggukan helm safety
Tergelincir ke lubang pile cap	6	Risiko Sedang	Melakukan inspeksi lokasi sebelum memulai pekerjaan dan menggukan APD lengkap khususnya sepatu *safety* dan memasang *safety line*
Tangan terluka akibat pemotongan besi, kaki terluka terkena kawat/ pasangan pembesian	6	Risiko Sedang	Menggukan sarung tangan *safety*
Tertimpa tanah dinding galian	15	Risiko Tinggi	Melakukan inspeksi lokasi sebelum memulai pekerjaan, melakukan pengawasan dalam pekerjaan galian
Terkena adukan beton	4	Risiko Rendah	Melakukan *brefing* sebelum Memulai Pekerjaan dan menyiapkan metode kerja yang tepat
Tertimpa material lainnya	15	Risiko Tinggi	Memperhatikan sekitar lingkungan proyek yang menjadi akses pengangkutan material dan menggunakan APD lengkap
Tangan terjepit saat pemasangan bekisting	4	Risiko Rendah	Menggukan sarung tangan *safety* dan sepatu *safety*
Terjatuh dari ketinggian	20	Risiko Sangat Tinggi	Melakukan inspeksi lokasi sebelum memulai pekerjaan dan mengunakan *body harness* serta menggukan APD lengkap serta memasang jaring pengaman
Tangan terluka akibat alat pemotong material	12	Risiko Tinggi	Menggunakan sarung tangan safety serta APD lengkap serta menggunakan metode kerja yang tepat
Terbakar akibat pengelasan baja	12	Risiko Tinggi	Menggunakan APD lengkap serta menggunakan metode kerja yang tepat
Terkena penyakit mata karena pengelasan	12	Risiko Tinggi	Menggunakan topeng las
Tertusuk limbah material yang tajam	9	Risiko Sedang	Menggukan sarung tangan *safety* dan sepatu *safety*
Terhirup debu dari pemotongan material	12	Risiko Tinggi	Menggunakan APD lengkap terutama masker perlindung pernafasan
Mata terkena debu atau serpihan dari pemotongan material kolom fasad	12	Risiko Tinggi	Menggunakan kacamata *safety*
Terkena adukan mortar perekat hable serta campuran semen dengan pasir yang di gunakan pada plester dan acian	9	Risiko Sedang	Menggunakan sarung tangan *safety* serta APD lengkap serta menggunakan metode kerja yang tepat
Terbakar karena api yang di timbulkan oleh percikan api yang terkena bahan mudah terbakar seperti tiner saat proses pengecatan	20	Risiko Sangat Tinggi	Melakukan inspeksi lokasi sebelum memulai pekerjaan dan *brefing morning* sebelum memulai pekerjaan, memasang rambu
Tangan terluka akibat pahat	6	Risiko Rendah	Menggunakan APD lengkap terutama sarung tangan *safety* serta menggunakan metode kerja yang tepat
Tersengat arus listrik	20	Risiko Sangat Tinggi	Melakukan pelatihan pekerja dan menggunakan APD lengkap terutama sarung tangan *safety* serta sepatu *safety*
Terpecik Aspal panas	12	Risiko Tinggi	Menggunakan alat pelindung diri lengkap dengan baik dan benar
Terpleset Aspal panas	12	Risiko Tinggi	Menggunakan APD lengkap terutama sepatu *safety* serta memasang *safety* line di area pekerjaan

Terhirup Bau Aspal / Debu	16	Risiko Tinggi	Menggunakan masker pernafasan
Terjepit/tertabrak alat berat	15	Risiko Tinggi	Menggunakan APD lengkap serta menjaga jarak saat pekerjaan yang menggunakan alat berat”

Setelah melakukan identifikasi risiko, penilaian risiko, dan pengendalian awal, langkah selanjutnya adalah perhitungan biaya keselamatan dan kesehatan kerja (K3). Perhitungan ini didasarkan pada acuan Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019 dan mengacu pada hasil identifikasi bahaya yang telah dilakukan sebelumnya.

Perhitungan Biaya Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3)

Perhitungan biaya keselamatan dan kesehatan kerja (K3) bertujuan untuk menghitung semua komponen biaya Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Konstruksi (SMKK) yang diperlukan dalam proyek konstruksi. Namun, tidak semua komponen SMKK yang tercantum dalam Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019 dimasukkan dalam perhitungan biaya K3, karena komponen yang dihitung disesuaikan dengan hasil identifikasi dan penilaian risiko. Dalam penelitian ini, volume dan harga komponen biaya K3 ditentukan berdasarkan wawancara dengan personel K3 di lapangan dan Site Manager, hasil survei beberapa peralatan K3 seperti Alat Pelindung Diri (APD), serta mengacu pada Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Daftar Survei Harga Bahan dan Peralatan K3 Tahun 2023

No.	Uraian	Satuan	Volume	Harga Satuan (Rp.)
1	2	3	4	5
1.	**“Penyiapan RKK terdiri atas:**			
	a. Pembuatan Manual, Prosedur, Instruksi Kerja, Ijin Kerja	Set	1,00	5.000.000,00
2.	**Sosialisasi dan Promosi K3 terdiri atas:**			
	a. Induksi K3 (*Safety Induction*); khusus untuk pekerja baru	Or	1,00	7.500,00
	b. Pengarahan K3 (*Safety Briefing*)	or	1,00	15.000,00
	c. *Tool Box Meeting*	or	1,00	15.000,00
	d. Simulasi K3	or	1,00	15.000,00
	e. Spanduk (banner); (6m2)	lb	1,00	145.000,00
	f. Poster; (2m2)	lb	1,00	27.000,00
	g. Papan Informasi K3.	bh	1,00	210.000,00
3.	**Alat Pelindung Kerja dan Alat pelindung diri**			
a	**Alat Pelindung Diri terdiri atas:**			
	a. Topi Pelindung (*Safety Helmet*);	Bh	1,00	27.000,00
	b. Pelindung Pernafasan Dan Mulut (Masker);	Bh	1,00	750,00
	c. Sepatu Keselamatan (*Safety Shoes*); untuk Staf	Psg	1,00	140.000,00
	d. Rompi Keselamatan (*Safety Vest*);	Bh	1,00	27.000,00
	e. Tameng Wajah Untuk Pekerjaan Las	Bh	1,00	145.000,00
	f. Sarung Tangan (*Safety Gloves*)	Lusin	1,00	15.000,00
b	**Alat Pelindung Kerja terdiri atas:**			
	a. Tali Keselamatan (*Life Line*);	Set	1,00	240.000,00
	b. Jaring Pengaman (*Safety Net*);	M2	1,00	5.300,00
	c. Pelindung Jatuh (*Fall Arrester*)	Bh	1,00	100.000,00
	d. Penunjang Seluruh Tubuh (*Full Body Harness*)	Bh	1,00	750.000,00
	e. Pagar Pengaman	M1	1,00	327.794,50
4.	**Asuransi Dan Perijinan terdiri atas:**			
	a. Asuransi *Construction All Risk*/ (CAR)	Ls	1,00	58.000.000,00
	b. Surat Ijin Kelayakan Alat	Lb	1,00	5.000.000,00
	c. Surat Ijin Oprator	Lb	1,00	8.000.000,00
	d. Surat Ijin Pengesahan Panitia Pembina Keselamatan dan Kesehatan Kerja	Ls	1,00	500.000,00

5.	**Personil K3 terdiri atas :**			
	a. Ahli K3	Ob	1,00	18.480.000,00
	b. *Safety Coordinator*	Ob	1,00	3.000.000,00
	c. *Safety Officer*	Ob	1,00	3.000.000,00
	d. Petugas PKD	Ob	1,00	3.000.000,00
	e. Petugas Pengatur Lalulintas (*Flag Man*)	Ob	1,00	3.000.000,00
6.	**Fasilitas sarana kesehatan;**			
	a. Peralatan P3K (Kotak P3K, Tandu, Tabung Oksigen, Obat Luka, Perban, dll)	Set	1,00	750.000,00
	b. Ruang P3K (Tempat Tidur Pasien, Stetoskop, Timbangan Berat Badan, Tensi Meter, dll);	Ls	1,00	1.850.000,00
7.	**Rambu rambu**			
	a. Rambu Petunjuk	Bh	1,00	75.000,00
	b. Rambu Peringatan	Bh	1,00	75.000,00
	c. Rambu Kewajiban	Bh	1,00	75.000,00
	d. Rambu Larangan	Bh	1,00	75.000,00
	e. Rambu Informasi	Bh	1,00	75.000,00
	f. Rambu Pekerjaan Sementara	Bh	1,00	75.000,00
	g. Tongkat Pengatur Lalulintas	Bh	1,00	30.000,00
	h. Kerucut Lalulintas	Bh	1,00	30.000,00
	i. Jalur Evakuasi	Ls	1,00	500.000,00
8.	**Konsultan dengan Ahli terkait Keselamatan Konstruksi :**			
	a. Ahli Struktur/mekanikal/ Elektrikal	Oj	1,00	70.000,00
9.	**Lain lain Terkait Dengan K3**			
	a. Alat Pemadam Api Ringan (APAR)	Bh	1,00	300.000,00
	b.Penyiapan Kartu Identitas Pekerja	Lb	1,00	5.000,00
	c. Bendera K3;	Bh	1,00	75.000,00
	d. Lampu Putar (*Rotary Lamp*) + Sirine	Bh	1,00	250.000,00”

Dalam penyusunan RAB K3 untuk proyek ini, kebutuhan komponen K3 disesuaikan dengan acuan dari Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019. Acuan ini digunakan untuk menentukan komponen SMKK yang akan diterapkan serta harga satuan yang relevan untuk menyusun anggaran biaya K3.

Namun tidak semua harga satuan dan komponen SMKK pada acuan tersebut dimasukan kedalam penyusunan Rencana Anggaran Biaya karena mengacu juga terhadap hasil dari identifikasi bahaya, penilaian risiko, pengendalian awal dan survey harga Alat Pelindung Diri (APD) yang di lakukan sebelumnya. Dalam penentuan volume tiap komponen SMKK menggunakan volume yang dihitung berdasarkan hasil observasi serta wawancara dilapangan. Setelah didapatkannya volume dari tiap komponen SMKK yang diperlukan dilanjutkan dengan menghitung total biaya dengan mengalikan volume dengan harga satuan yang sudah di dapat kemudian didapatkan nilai total biaya tiap tiap komponen SMKK yang dibutuhkan seperti yang bisa di lihat pada tabel Rencana Anggaran Biaya (RAB) K3 pada tabel 8.

Tabel 8. Rencana Anggaran Biaya SMKK Menurut Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019

NO.	URAIAN	SATUAN	VOLUME	HARGA SATUAN (Rp.)	JUMLAH HARGA (RP)
1	2	3	4	5	6
1.	**“Penyiapan RKK terdiri atas:**				
	a. Pembuatan Manual, Prosedur, Instruksi Kerja, Ijin Kerja	Set	1,00	5.000.000,00	5.000.000,00
					5.000.000,00
2.	**Sosialisasi dan Promosi K3 terdiri atas:**				

	a. Induksi K3 (*Safety Induction*); khusus untuk pekerja baru	Or	372,00	7.500,00	2.790.000,00
	b. Pengarahan K3 (*safety Briefing*)	Or	372,00	15.000,00	5.580.000,00
	c.*Tool Box Meeting*	Or	372,00	15.000,00	5.580.000,00
	d. Simulasi K3	Or	372,00	7.500,00	2.790.000,00
	e. Spanduk (banner); (6m2)	Lb	8,00	145.000,00	1.160.000,00
	f. Poster; (2m2)	Lb	8,00	27.000,00	216.000,00
	g. Papan Informasi K3.	Bh	10,00	210.000,00	2.100.000,00
					14.636.000,00
3.	**Alat Pelindung Kerja dan Alat pelindung diri**				
a	**Alat Pelindung Diri terdiri atas:**				
	a. Topi Pelindung (*Safety Helmet*);	Bh	400,00	27.000,00	10.800.000,00
	b. Pelindung Pernafasan Dan Mulut (Masker);	Bh	500,00	750,00	375.000,00
	c. Sepatu Keselamatan (*Safety Shoes*); untuk Staf	Psg	400,00	140.000,00	56.000.000,00
	d. Rompi Keselamatan (*Safety Vest*);	Bh	400,00	27.000,00	10.800.000,00
	e. Tameng Wajah Untuk Pekerjaan Las	Bh	4,00	145.000,00	580.000,00
	f. Sarung Tangan (*Safety Gloves*)	Lusin	19,00	15.000,00	285.000,00
					78.840.000,00
b	**Alat Pelindung Kerja terdiri atas:**				
	a. Tali Keselamatan (*Life Line*);	Set	3,00	240.000,00	720.000,00
	b. Jaring Pengaman (*Safety Net*);	M2	2.670	5.300,00	14.151.000,00
	c. Pelindung Jatuh (*Fall Arrester*)	Bh	3,00	100.000,00	300.000,00
	d. Penunjang Seluruh Tubuh (*Full Body Harness*)	Bh	3,00	750.000,00	2.250.000,00
	e. Pagar Pengaman	M1	264,50	327.794,50	86.701.645,25
					104.122.645,25
4.	**Asuransi Dan Perijinan terdiri atas:**				
	a. Asuransi *Construction All Risk*/ (CAR)	Ls	1,00	58.000.000,00	58.000.000,00
	b. Surat Ijin Kelayakan Alat	Lb	10,00	5.000.000,00	50.000.000,00
	c. Surat Ijin Oprator	Lb	5,00	8.000.000,00	40.000.000,00
	d. Surat Ijin Pengesahan Panitia Pembina Keselamatan dan Kesehatan Kerja	Ls	1,00	500.000,00	500.000,00
					148.500.000,00
5.	**Personil K3 terdiri atas :**				
	a. Ahli K3	Ob	1,00	18.480.000,00	129.360.000,00
	b. *Safety Coordinator*	Ob	1,00	3.000.000,00	21.000.000,00
	c. *Safety Officer*	Ob	2,00	3.000.000,00	42.000.000,00
	d. Petugas PKD	Ob	8,00	3.000.000,00	168.000.000,00
	e. Petugas Pengatur Lalulintas (*Flag Man*)	Ob	1,00	3.000.000,00	21.000.000,00
					381.360.000,00
6.	**Fasilitas sarana kesehatan;**				
	a. Peralatan P3K (Kotak P3K, Tandu, Tabung Oksigen, Obat Luka,	Set	2,00	750.000,00	1.500.000,00

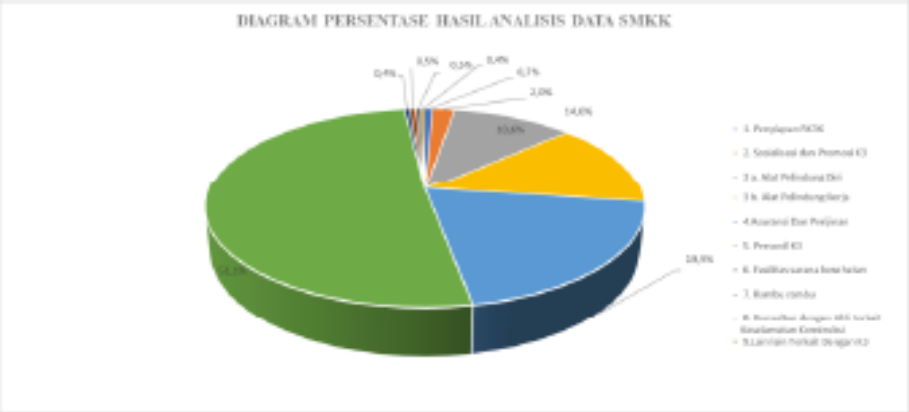
	Perban, dll)				
	b. Ruang P3K (Tempat Tidur Pasien, Stetoskop, Timbangan Berat Badan, Tensi Meter, dll);	Ls	1,00	1.850.000,00	1.850.000,00
					3.350.000,00
7.	**Rambu rambu**				
	a. Rambu Petunjuk	bh	4,00	75.000,00	300.000,00
	b. Rambu Peringatan	bh	4,00	75.000,00	300.000,00
	c. Rambu Kewajiban	bh	4,00	75.000,00	300.000,00
	d. Rambu Larangan	bh	4,00	75.000,00	300.000,00
	e. Rambu Informasi	bh	4,00	75.000,00	300.000,00
	f. Rambu Pekerjaan Sementara	bh	4,00	75.000,00	300.000,00
	g. Tongkat Pengatur Lalulintas	bh	4,00	30.000,00	120.000,00
	h. Kerucut Lalulintas	bh	10,00	30.000,00	300.000,00
	i. Jalur Evakuasi	Ls	3,00	500.000,00	1.500.000,00
					3.720.000,00
8.	**Konsultan dengan Ahli terkait Keselamatan Konstruksi :**				
	a. Ahli Struktur/mekanikal/ Elektrikal	Oj	49,00	70.000,00	3.430.000,00
					3.430.000,00
9.	**Lain lain Terkait Dengan K3**				
	a. Alat Pemadam Api Ringan (APAR)	Bh	7,00	300.000,00	2.100.000,00
	b.Penyiapan Kartu Identitas Pekerja	Lb	50,00	5.000,00	250.000,00
	c. Bendera K3;	Bh	1,00	75.000,00	75.000,00
	d. Lampu Putar (*Rotary Lamp*) + Sirine	Bh	1,00	250.000,00	250.000,00
					2.675.000,00
	Total				**745.633.645,25**
	PPN 11%				**82.019.700,98**
	Jumlah Termasuk PPN				**827.653.346,23**

Analisis Biaya K3 sangat penting di lakukan disebuah proyek konstruksi, karena dengan menganalisis biaya komponen K3 kita bisa tau berapa estimasi biaya yang diperlukan dalam penerapan SMKK pada sebuah proyek konstruksi.

Tabel 9. Analisis Komponen Biaya SMKK

No.	Uraian	Sub Total Harga	Persentase
1	2	3	4
1	"Pelaksanaan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Dalam Masa Konstruksi		
	1. Penyiapan RK3K	5.000.000,00	0,7%
	2. Sosialisasi dan Promosi K3	14.636.000,00	2,0%
	3 a. Alat Pelindung Diri	78.840.000,00	10,6%
	3 b. Alat Pelindung Kerja	104.122.645,25	14,0%
	4.Asuransi Dan Perijinan	148.500.000,00	19,9%
	5. Personil K3	381.360.000,00	51,1%
	6. Fasilitas sarana kesehatan	3.350.000,00	0,4%
	7. Rambu rambu	3.720.000,00	0,5%
	8. Konsultan dengan Ahli terkait Keselamatan Konstruksi	3.430.000,00	0,5%
	9.Lain lain Terkait Dengan K3	2.675.000,00	0,4%
	Total	745.633.645,25	100%
	PPN 11%	82.019.700,98	
	Jumlah Termasuk PPN	827.653.346,23	
	Nilai Kontrak Proyek	70.231.000.000,00	98,8%

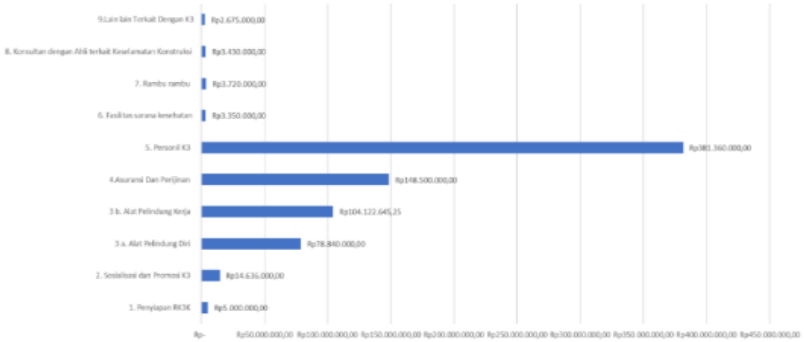
Nilai Persentase Penerapan Komponen Biaya K3 terhadap Nilai Kontrak Proyek	827.653.346,23	1,2%
Nilai Harga Penawaran Awal	172.990.000,00	0,002”



Gambar 1. Diagram Hasil Analisis Data SMKK

Diagram hasil analisis data SMKK menunjukkan bahwa dengan kontribusi sebesar 51,1%, ini diikuti oleh asuransi dan perizinan yang menyumbang 19,9%, alat pelindung kerja sebesar 14,0%, alat pelindung diri sebesar 10,6%, sosialisasi dan promosi K3 sebesar 2,0%, serta penyiapan RKK sebesar 0,7%.

Selanjutnya, persentase penerapan proyek adalah konsultan ahli terkait keselamatan konstruksi sebesar 0,5%, diikuti oleh pengadaan rambu-rambu sebesar 0,5%, fasilitas sarana kesehatan sebesar 0,4%, dan terakhir, kategori lain-lain terkait K3 sebesar 0,4%”.



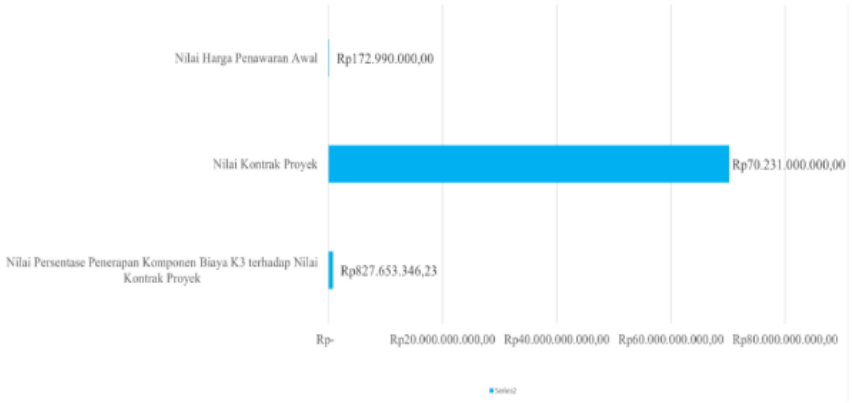
.

Gambar 2. Diagram Komponen Biaya SMKK

Berdasarkan analisis tabel dan diagram komponen biaya, terlihat bahwa biaya terbesar adalah untuk personil K3 sebesar Rp. 381.360.000,00. Selanjutnya, biaya terbesar adalah untuk asuransi dan perizinan sebesar Rp. 148.500.000,00, diikuti oleh alat pelindung kerja sebesar Rp. 104.122.645,25, dan alat pelindung diri sebesar Rp. 78.840.000,00. Sosialisasi dan promosi K3 menyumbang Rp. 14.636.000,00, sementara penyiapan RKK memerlukan Rp. 5.000.000,00. Biaya untuk konsultan ahli terkait keselamatan konstruksi adalah Rp. 3.430.000,00, pengadaan rambu-rambu sebesar Rp. 3.720.000,00, fasilitas sarana kesehatan sebesar Rp. 3.350.000,00, dan biaya lain-lain terkait K3 sebesar Rp. 2.675.000,00.

Perbandingan biaya komponen K3 dengan nilai kontrak

Untuk mengetahui berapa besar perbandingan biaya komponen K3 dengan nilai kontrak maka di lakukan juga perhitungan yang di perbandingan nilai kontrak dengan biaya komponen K3. Tujuan dari melakukan perbandingan adalah agar kita bisa tahu berapa persentase perbandingan nilai kontrak dengan biaya komponen K3 yang di gunakan untuk menunjang penerapan K3 di lapangan yang bertujuan untuk meminimalisir kecelakaan kerja yang terjadi yang dapat membahayakan keselamatan tenaga kerja serta mencegah terjadinya kerugian waktu atau biaya yang disebabkan oleh kecelakaan kerja tersebut.



Gambar 3. Diagram Komponen Biaya SMKK Terhadap Nilai Kontrak Proyek

"Berdasarkan analisis pada tabel dan diagram komponen biaya terhadap nilai kontrak proyek, persentase penerapan komponen biaya SMKK dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

- Nilai persentase penerapan komponen biaya SMKK = ((Rencana Anggaran Biaya SMKK / Nilai Kontrak Proyek)) x 100.
- Nilai persentase penawaran awal = ((Rp. 172.990.000,00 / Rp. 70.231.000.000,00) x 100) = 0,002 %
- Nilai presentase komponen biaya SMKK = ((Rp. 827.653.346,23 / Rp.70.231.000.000,00) x 100) = 1,2 %
- Perbandingan persentase komponen biaya SMKK dengan harga penawaran awal = 1,2 % - 0,002 % = 1,198%".

4. KESIMPULAN

Perencanaan anggaran biaya komponen Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi (SMKK) untuk Proyek Pembangunan Gedung Kantor Terpadu DPMPTSP, DISNAKER, DISKES, dan CAPIL di Kabupaten Gianyar telah mengacu pada Surat Edaran Menteri PUPR No. 11 Tahun 2019, namun belum memadai dalam realisasinya. Analisis risiko menunjukkan beberapa risiko terkategori risiko tinggi perlu ditambahkan komponen biaya SMKK. Eavaluasi komponen SMKK yang ditemukan mencapai Rp. 827.653.346,23, atau sekitar 1,2% lebih besar dari penawaran biaya SMKK yang tercantum pada kontrak.

DAFTAR PUSTAKA

Astari, L. A., & Ardyanto, D. (2019). Hubungan Media Komunikasi K3 Dengan Pengetahuan Dan Sikap Penggunaan Alat Pelindung Diri Pada Karyawan Bagian Produksi. Jph Recode, 2(2), 105–116.

Anwar, F.N., Farida, I. and Ismail, A. 2016. Analisis Manajemen Risiko Kesehatan Dan Keselamatan Kerja (K3) Pada Pekerjaan Upper Structure Gedung Bertingkat (Studi Kasus Proyek Skyland City – Jatinangor). Jurnal Konstruksi, 12(1).

Australian Standard/New Zealand Standard. (2004). Australian Standard/New Zealand Standar Risk Management 4360:2004. Sydney and Wellington:Author.

Ciptaningsih, F., & Kurniawan, B. (2014). Evaluasi Sistem Manajemen Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (Smk3) Di Perusahaan Industri Baja. 2(April), 259–266.

Destari, N., Widjasena, B., & Wahyun, I. (2017). Analisis Implementasi Promosi K3 Dalam Upaya Pencegahan Kecelakaan Kerja Di Pt X (Proyek Pembangunan Gedung Y Semarang). Jurnal Kesehatan Masyarakat, 5(13), 397–404.

Gultom, R. (2018). Analisis Penggunaan Alat Pelindung Diri (Apd) Dalam Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Proyek Kontruksi Di Pt. Eka Paksi Sejati. Studi Kasus: Proyek Kontruksi Untuk Pemboran Sumur Eksploirasititanum (Ttn-001) Daerah Aceh Tamiang. 3(1).

Harjono, A.J. 2018. Penilaian Risiko Pada Proses Pembuatan Shear Wall Pada Pembangungan Apartemen. The Indonesian Journal of Occupational Safety and Health, 6(3), p.352.

Hunta, J. F., Tjakra, J., & Walangitan, D. R. O. (2022). Pengaruh Penerapan Alat Pelindung Diri Terhadap Produktivitas Tenaga Kerja Pada Proyek (Konstruksi Pembangunan Gedung Rpk Polda Sulut). 20.

Kurnia, M. B. (2020). Faktor – Faktor Penyebab Rendahnya Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (Smk3) Pada. 2(2), 141–146.

Lumbangaol, P., Saragih, T., & Hasibuan, P. S. (2022). Keselamatan, Kesehatan Kerja Dan Lingkungan Hidup (K3lh) Pada Proyek Supermarket Jl. Sisingamangaraja Xii Km. 3,3 Partahi. Jurnal Visi Eksakta (Jvieks), 3(1), 59–69.

Mahapatni, I. A. P. S., Artana, I. W., & Putra, I. M. A. (2019). Pengaruh Budaya K3 Terhadap Keberhasilan Proyek

Konstruksi Gedung Di Kabupaten Badung. 12(1), 1–11.
Nalhadi, A. and Rizaal, A. 2015. Identifikasi Bahaya Dan Penilaian Risiko K3 Pada Tindakan Perawatan & Perbaikan Menggunakan Metode Hirarc (Hazard Identification And Risk Assesment Risk Control) Pada Pt. X, Seminar Nasional Riset Terapan.
Nuraini, D. A. (2020). Hubungan Lingkungan Kerja, Work Permit, Faktor Manusia, Dan Kecelakaan Kerja: Pendekatan Konseptual. Jurnal Ilmu Manajemen, 6(2015), 16–24.
Pangestika, E. Q. (2023). Implementasi Peraturan Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Proyek Pembangunan Perumahan Di Wilayah Diy. 9(1), 31–40.
PERMEN PUPR No. 10 Tahun 2021 Tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi.
Ramadhan, F. (2017). Analisis Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) Menggunakan Metode Hazard Identification Risk Assessment and Risk Control (HIRARC). Seminar Nasional Riset Terapan.
Ridha, M. Al. (2022). Hubungan Pengetahuan Dan Sikap Petugas Dengan Pencegahan Kecelakaan Kerja Di Puskesmas Muara Dua Kota Lhokseumawe Relationship Between Knowledge And Attitudes Of Officers And Work Accident Prevention At Muara Dua Health Center, Lhokseumawe City. 8(2), 1455–1466.
Saraswati, Y., Ridwan, A., & Candra, I. A. (2020). Analisis Penerapan Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Pembangunan Gedung Kuliah Bersama Kampus C Unair Surabaya. Jurmateks : Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil, 3(2), 248–260.
Setiawan, A., & Abdullah, R. (N.D.). Job Safety Analysis Dan Rencana Anggaran Biaya Dalam Rangka Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Dan. Jurnal Bina Tambang, 4(1), 287–296.
Simanjuntak, M. R. A., & Praditya, R. (2012). Identifikasi Penyebab Risiko Kecelakaan Kerja Pada Kegiatan Konstruksi Bangunan Gedung Di DKI Jakarta. Jurnal Ilmiah Media Engineering, 2(2), 85–99.

Analisis Waktu dan Biaya dengan Pendekatan *Time Cost Trade Off* pada Proyek *Repair* Struktur *Wheat Silo* dan *Pellet Silo* Tahap III di Surabaya

Maria Junita Klau[1], Hanie Teki Tjendani[2*], Sajiyo[3]
[1]*Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945, Jl. Semolowaru No. 45, Surabaya*
e-mail: mariajunitaklau76@gmail.com
[2*]*Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945, Jl. Semolowaru No. 45, Surabaya*
e-mail: hanie@untag-sby.ac.id
[3]*Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945, Jl. Semolowaru No. 45, Surabaya*
e-mail: sajiyo@untag-sby.ac.id

ABSTRAK

Proyek repair struktur wheat silo dan pellet silo tahap III di Surabaya memiliki signifikansi besar dalam industri pengolahan tepung terigu di Indonesia. PT. Indofood Sukses Makmur Tbk Divisi Bogasari Surabaya, sebagai salah satu produsen tepung terigu terkemuka, membutuhkan perbaikan struktur pada kedua silo tersebut untuk memastikan kelancaran operasi pabrik dan kualitas produk akhir. Dengan mengingat pentingnya waktu dan biaya dalam kesuksesan proyek ini, pendekatan yang efektif dalam manajemen waktu dan biaya sangatlah penting. Proyek ini membutuhkan manajemen proyek yang tepat untuk menghindari keterlambatan dan pembengkakan biaya, dengan anggaran sebesar Rp. 28.011.000.000 dan estimasi waktu 455 hari kalender. Penelitian ini menggunakan metode *Time Cost Trade Off* (TCTO) untuk menganalisis opsi percepatan waktu proyek dengan mempertimbangkan biaya tambahan yang mungkin timbul. Perangkat lunak *Microsoft Project* digunakan untuk mengidentifikasi lintasan kritis, yang memungkinkan manajer proyek fokus pada aktivitas-aktivitas yang memiliki dampak terbesar terhadap jadwal keseluruhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lintasan kritis proyek berada pada kegiatan mobilisasi dan demobilisasi, administrasi dan pelaporan, keselamatan kerja, dan perbaikan silo gandum lama. Dengan menggunakan TCTO, waktu penyelesaian proyek dapat dipercepat menjadi 359 hari dari 455 hari, mengurangi waktu sebesar 21,10% dengan biaya tambahan Rp. 739.351.125,00 atau 2,64% dari nilai proyek. Dengan penambahan jam lembur 1 jam per hari, biaya percepatan proyek sebesar Rp. 413.445.000,00 atau 1,48% dari nilai proyek, mengurangi waktu kerja menjadi 391 hari atau 14,07% dari waktu normal.

Kata kunci: percepatan, *wheat silo, pellet silo, ms project, time cost trade off*

1. PENDAHULUAN

Di Indonesia pembangunan infrastruktur dan perluasan industri konstruksi sedang meningkat. Ekspansi ini sebagian besar didorong oleh pesatnya ekspansi pasar *real estate* domestik, investasi swasta, dan belanja pemerintah untuk proyek-proyek infrastruktur. Proyek konstruksi merupakan rangkaian mekanisme pekerjaan yang sensitif, karena setiap aspek pada proyek mempengaruhi satu sama lain. Pada pelaksanaan proyek sering terjadi ketidaksesuaian jadwal pada saat di lapangan yang mengakibatkan pertambahan waktu dan pembengkakan biaya. Penyebab adanya keterlambatan yang sering terjadi adalah akibat perubahan desain, faktor cuaca, kurang memadai kebutuhan pekerja, material, ataupun peralatan, kesalahan perencana atau spesifikasi. Konsekuensi adanya percepatan pada penyelesaian pembangunan ini adalah adanya pertambahan biaya langsung (Vebiola & Waskito, 2020).

PT. Indofood Sukses Makmur Tbk. Divisi Bogasari Surabaya mulai beroperasi pada tanggal 10 Juli 1972, terletak di Jl. Nilam Timur No. 16 Tanjung Perak, Surabaya. Menempati area seluas ± 14 Ha. Dengan kapasitas giling 5.900 ton gandum/hari dan total produksi tepung yang dihasilkan 1.6 juta ton per tahun. Dalam pengadaan dan penyimpanan bahan baku berupa biji gandum sebelum diproses hingga menjadi tepung, maka perlu di simpan di sebuah tempat yang bernama silo, dan silo yang dimiliki Bogasari adalah silo beton. Silo yang dimiliki oleh Bogasari terbagi menjadi 2 jenis, yaitu wheat silo untuk menyimpan gandum dan pellet silo untuk menyimpan pellet yaitu sisa olahan kulit gandum yang sudah terbuang yang biasanya digunakan untuk campuran pakan ternak. di Bogasari terdapat 4 komplek, yaitu pellet silo lama berjumlah 18 buah dengan ketinggian 42 m, pellet silo baru berjumlah 24 buah dengan ketinggian 40 m, wheat silo lama berjumlah 36 buah dengan ketinggian 50 m, dan *wheat* silo baru berjumlah 48 buah dengan ketinggian 36,95 m. Bangunan Silo ini sangat dibutuhkan untuk keberlangsungan produksi, oleh karena itu perawatan bangunan ini dilakukan secara berkala 20 tahun sekali.

Proyek *repair* struktur *wheat* silo dan *pellet* silo tahap III di Surabaya menghadapi berbagai tantangan yang signifikan.

Berdasarkan laporan kemajuan proyek dan hasil wawancara dengan manajer proyek serta tim lapangan, teridentifikasi bahwa beberapa kegiatan utama mengalami keterlambatan. Kegiatan penggalian dan pemasangan pondasi mengalami kendala karena kondisi tanah yang tidak stabil dan cuaca buruk, yang menyebabkan penundaan pekerjaan. Selain itu, pemasangan struktur baja tertunda akibat keterlambatan pengiriman material dari pemasok. Pekerjaan pengecoran beton juga mengalami hambatan karena kekurangan tenaga kerja terampil, sementara instalasi sistem mekanikal dan elektrikal tertunda akibat perubahan desain yang mendadak. Masalah-masalah ini tidak hanya mengganggu jadwal proyek tetapi juga berpotensi menyebabkan pembengkakan biaya yang signifikan jika tidak ditangani dengan strategi manajemen yang efektif.

Untuk mengatasi masalah ini, penelitian ini menggunakan metode *Time Cost Trade Off* (TCTO). Metode TCTO digunakan untuk menganalisis opsi percepatan waktu proyek dengan memperhitungkan biaya tambahan yang mungkin timbul, membantu dalam mengidentifikasi langkah-langkah percepatan yang optimal dan perangkat lunak *Microsoft Project* digunakan untuk membantu dalam identifikasi lintasan kritis proyek. Lintasan kritis adalah serangkaian aktivitas yang menentukan durasi terpendek untuk menyelesaikan proyek. Dengan mengidentifikasi lintasan kritis, manajer proyek dapat fokus pada aktivitas-aktivitas yang memiliki dampak terbesar terhadap jadwal keseluruhan dan melakukan percepatan pada aktivitas tersebut untuk mengurangi durasi total proyek.

Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan rekomendasi praktis dan solusi optimal bagi manajer proyek dalam mengelola percepatan waktu dan biaya. Hasil yang diharapkan meliputi identifikasi lintasan kritis, analisis opsi percepatan waktu dan dampaknya terhadap biaya, serta rekomendasi strategi percepatan yang efektif dengan biaya tambahan yang minimal. Dengan menggunakan MS *Project*, penelitian ini juga menyediakan panduan praktis dalam perencanaan dan pengelolaan proyek. Melalui pendekatan komprehensif ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas manajemen proyek konstruksi, khususnya dalam konteks perbaikan struktur silo di Surabaya.

2. DASAR TEORI

Manajemen konstruksi adalah suatu cara atau metode yang dilakukan untuk mencapai suatu hasil dalam bentuk bangunan konstruksi atau infrastruktur yang dibatasi oleh waktu dengan menggunakan sumber daya yang ada secara efektif melalui tindakan-tindakan perencanaan (*planning*), pengorganisasian (*organizing*), pelaksanaan (*actuating*) dan pengawasan (*controlling*) (Zahir et al., 2022).

1. Perencanaan (*Planning*)
   Perencanaan adalah suatu proses yang mencoba meletakkan dasar tujuan dan sasaran termasuk menyiapkan segala sumber daya untuk mencapainya
2. Pengorganisasian (*Organizing*)
   Organisasi merupakan alat dalam pengendalian dan pelaksanaan proyek agar proses pelaksanaan tertata sesuai dengan yang diinginkan. Organisasi proyek dikatakan berhasil jika mampu mengendalikan tiga hal utama yaitu mutu, waktu dan biaya. Suatu organisasi mempunyai ciri-ciri adanya sekelompok orang yang bekerja sama atas dasar hak, kewajiban dan tanggung jawab masing-masing.
3. Pelaksanaan (*Actuating*)
   Kegiatan pelaksanaan meliputi kegiatan pelaksanaan pekerjaan di lapangan dalam rangka mewujudkan bangunan yang akan dibangun.
4. Pengawasan (*Controlling*)
   Kegiatan pengawasan dilaksanakan dengan tujuan agar hasil pelaksanaan pekerjaan bangunan sesuai dengan persyaratan yang telah ditetapkan.

Proyek konstruksi adalah suatu rangkaian kegiatan membuat suatu bangunan konstruksi yang dilaksanakan pada waktu tertentu. Suatu proyek konstruksi membutuhkan suatu perencanaan, penjadwalan dan pengendalian yang baik, dimana kondisinya dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain sumber daya yang baik kualitas maupun kuantitasnya, ketersediaan material, kondisi alam, letak geografis dan faktor-faktor lainnya yang berpengaruh pada kemajuan dari proyek tersebut. Proses mencapai tujuan dalam pelaksanaan proyek konstruksi ada batasan yang harus dipenuhi yaitu besarnya Biaya (*Cost*) yang dialokasikan, Waktu (*Time*) dan Ruang Lingkup (*Scope*) yang harus dipenuhi. Ketiga batasan diatas disebut sebagai batasan(*Triple Constraint*), (Waney & Ruitan, 2022) yaitu:

1. Biaya (*Cost*)
   Anggaran proyek yang perlu dikeluarkan dalam pelaksanaan pekerjaan proyek konstruksi dengan biaya yang sudah disepakati dari awal
2. Waktu (*Time*)
   Proyek harus dikerjakan dalam suatu kurun waktu yang ditentukan dan terbatas. Jika tidak, maka akan menimbulkan berbagai dampak negatif.
3. Ruang Lingkup (*Scope*)
   Dalam ruang lingkup mengacu pada semua tugas aktivitas pekerjaan dalam proyek konstruksi baik produk atau hasil kegiatan harus memenuhi spesifikasi dan kriteria yang dipersyaratkan yang berarti mampu memenuhi tugas yang dimaksudkan.



Gambar 1. Hubungan *Triple Constraint*

Microsoft Project adalah alat manajemen proyek yang membantu dalam merencanakan, melacak, dan mengelola proyek. Salah satu fitur penting dalam *Microsoft Project* adalah kemampuan untuk menemukan lintasan kritis (*critical path*), yang merupakan serangkaian tugas yang menentukan durasi total proyek. Lintasan kritis membantu manajer proyek mengidentifikasi tugas-tugas yang tidak boleh tertunda agar proyek selesai tepat waktu.

Metode *Time Cost Trade Off* merupakan sebuah metode analisis yang digunakan untuk mempercepat waktu penyelesaian proyek dengan cara memadatkan jadwal untuk mendapatkan proyek yang lebih menguntungkan dalam hal waktu (durasi) dan biaya. Upaya memprioritaskan aktivitas-aktivitas yang berada pada jalur kritis untuk mengurangi durasi proyek dengan menggunakan beberapa alternatif, seperti penambahan jam kerja (lembur), penambahan tenaga kerja, dan penambahan alat kerja (Ashari, 2023).

1. Proses Pengerjaan Waktu yang Optimal

Penambahan jam kerja (lembur) merupakan salah satu strategi yang biasanya dilakukan untuk mempercepat proses penyelesaian suatu proyek. Hal yang harus diperhatikan dan dipertimbangkan dalam menentukan jam lembur yaitu semakin besar penambahan jam lembur maka akan mengakibatkan produktivitas pekerja menurun. Berikut adalah rumus yang digunakan dalam perhitungan produktivitas kerja lembur (Sulistyo & Al Fikri, 2021).

1) Total Upah Normal Kerja Per Hari

$$T = N \times P \tag{1}$$

Ket : T = Total upah pekerja per hari
N = Jumlah tenaga kerja
P = Harga satuan

2) Produktivitas Harian

$$P_h = \frac{V}{T_n} \tag{2}$$

Ket : P_h = Produktivitas harian
V = Volume
T_n = Waktu normal

3) Produktivitas Per Jam

$$P_j = \frac{P_h}{J} \tag{3}$$

Ket : P_j = Produktivitas per jam
P_h = Produktivitas per jam
J = Jam kerja per hari

4) Produktivitas *Crashing*

$$P_c = (W \times P_j) + (a \times b \times P_j) \quad (4)$$

Ket : P_c = Produktivitas *crashing*
W = Jumlah kerja per hari
P_j = Produktivitas per jam
a = Lama penambahan jam kerja (lembur)
b = Koefisien penurunan produktivitas akibat penambahan jam (lembur)

5) *Crash Duration*

$$D_c = \frac{V}{P_c} \quad (5)$$

Ket : D_c = Durasi *crash*
V = Volume
P_c = Produktivitas *crashing*

2. Proses Pengerjaan Biaya yang Optimal

Dalam menambah jam lembur pekerja terdapat peraturan-peraturan pemerintah yang harus diikuti oleh kontraktor. Peraturan yang harus diikuti adalah peraturan keputusan Menteri Tenaga Kerja Nomor KEP.102/MEN/VI/2004 pasal 3, pasal 7 dan pasal 11 standar upah untuk lembur. yang berisi Pasal 3 berbunyi Waktu kerja lembur hanya dapat dilakukan paling banyak 3 (tiga) jam dalam 1 (satu) hari dan 14 (empat belas) jam dalam 1 (satu) minggu dan Ketentuan waktu kerja lembur sebagaimana dimaksud dalam ayat (1) tidak termasuk kerja lembur yang dilakukan pada waktu istirahat mingguan atau hari libur resmi.Pasal 7 Perusahaan yang mempekerjakan pekerja/buruh selama waktu kerja lembur berkewajiban membayar upah kerja lembur, memberi kesempatan untuk istirahat secukupnya dan memberikan makanan dan minuman sekurang-kurangnya 1.400 kalori apabila kerja lembur dilakukan selama 3 (tiga) jam atau lebih. Pasal 11 cara Perhitungan upah kerja lembur sebagai berikut : Apabila kerja lembur dilakukan pada hari kerja : untuk jam kerja lembur pertama harus dibayar upah Sebesar 1,5 (Satu setengah) kali upah sejam; untuk setiap jam kerja lembur berikutnya harus dibayar upah sebesar 2(dua) kali upah sejam. Pada penambahan waktu kerja satu jam pertama, pekerja mendapatkan tambahan upah 1,5 kali upah per jam waktu normal pada penambahan jam kerja 23 berikutnya maka pekerja akan mendapatkan 2 kali upah per jam waktu normal. Perhitungan untuk biaya dapat dirumuskan sebagai berikut:

1) Biaya Lembur Per Hari

$$B = N_{TK} \times 1{,}5 \times H \quad (6)$$

Ket : B = Biaya lembur per hari
N_{TK} = Jumlah tenaga kerja
H = Biaya normal per jam

2) Biaya Lembur untuk 2 Jam

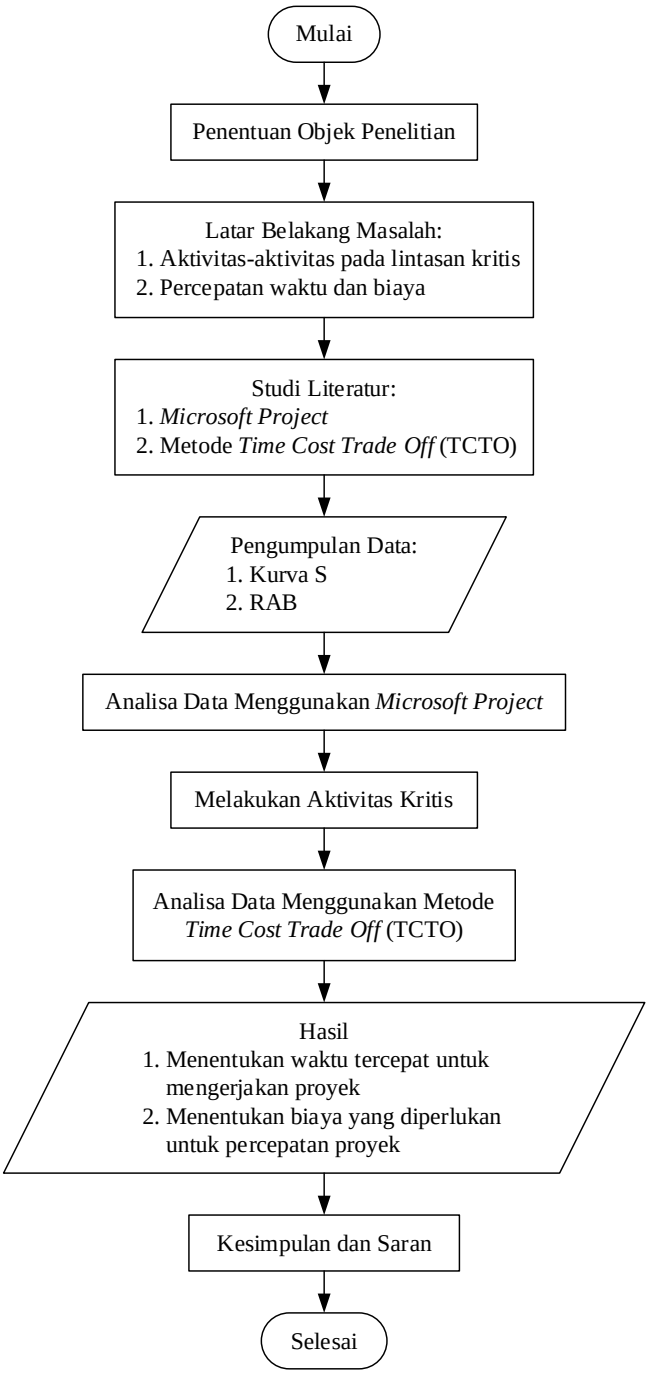
$$B = N_{TK} \times (1{,}5 \times H) + (2 \times 1 \times H) \quad (7)$$

Ket : B = Biaya lembur per hari
N_{TK} = Jumlah tenaga kerja
H = Biaya normal per jam

3. METODE PENELITIAN

Rancangan Penelitian

Penjelasan mengenai alur atau tahapan *Struktur Wheat* Silo dan *Pellet* Silo Tahap III di Surabaya dengan menggunakan Metode *Time Cost Trade Off* (TCTO) secara garis besar dapat dilihat pada bagan alir berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Lokasi Penelitian

Berikut merupakan lokasi penelitian Proyek *Repair* Struktur *Wheat* Silo dan *Pellet* Silo Tahap III PT. ISM Bogasari Surabaya, Jawa Timur.



Gambar 3. Lokasi Penelitian

Prosedur Pengumpulan Data

Pada penelitian ini menggunakan data sekunder diambil oleh penulis langsung di PT.Ting Tai Konstruksi Indonesia, data yang diambil merupakan data kurva S yaitu Informasi tentang jadwal proyek yang mencakup daftar lengkap aktivitas, estimasi waktu, dan urutan ketergantungan antar aktivitas. Data rencana dan anggaran biaya (RAB) proyek. Data ini mencakup estimasi biaya yang disediakan oleh tim proyek yang bertanggung jawab langsung atas pelaksanaan proyek. Data ini dibutuhkan untuk menghitung tambahan biaya kerja pada alternatif penambahan jam lembur pada pekerjaan yang mengalami lintasan kritis dan Upah Tenaga Kerja Normal per bulan untuk menghitung biaya percepatan dengan penambahan jam kerja (lembur). Dan data Sekunder adalah data pendukung yang berupa dari literatur-literatur yang berkaitan dengan penelitian penulis.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rekapitulasi Total Upah Pekerja Normal

Proyek pekerjaan *repair* struktur *wheat* silo dan *pellet* silo tahap III memiliki nilai kontrak untuk upah/gaji pekerja. Berikut rekapitulasi upah pekerja normal berdasarkan hasil perhitungan upah pekerja normal yang berada pada lintasan kritis proyek.

Tabel 1. Rekapitulasi Total Upah Pekerja Normal

Kode	Jumlah Pekerja	Total Upah/Hari (Rp)	Durasi Normal (Hari)	Total Upah Proyek (Rp)
2.1	13	1.820.000,00	18	32.760.000,00
2.2	13	1.800.000,00	18	32.400.000,00
2.3	23	3.000.000,00	38	114.000.000,00
2.4	22	2.900.000,00	150	435.000.000,00
2.5	10	1.440.000,00	38	54.720.000,00
2.6	13	1.820.000,00	38	69.160.000,00
2.7	10	1.460.000,00	38	55.480.000,00
2.8	22	2.880.000,00	150	432.000.000,00
2.9	16	2.160.000,00	150	324.000.000,00
2.10	13	1.800.000,00	150	270.000.000,00

Tabel 1. Rekapitulasi Total Upah Pekerja Normal (Lanjutan)

Kode	Jumlah Pekerja	Total Upah/Hari (Rp)	Durasi Normal (Hari)	Total Upah Proyek (Rp)
2.11	7	1.080.000,00	150	162.000.000,00
2.12	7	1.100.000,00	150	165.000.000,00
2.13	24	3.120.000,00	150	468.000.000,00
2.14	26	3.360.000,00	135	453.600.000,00
2.15	17	2.280.000,00	135	307.800.000,00
2.16	9	1.320.000,00	135	178.200.000,00
2.17	10	1.440.000,00	135	194.400.000,00
2.18	9	1.320.000,00	135	178.200.000,00
2.19	19	2.520.000,00	135	340.200.000,00
2.20	17	2.280.000,00	135	307.800.000,00
2.21	25	3.240.000,00	135	437.400.000,00
2.22	23	3.000.000,00	135	405.000.000,00
2.23	32	4.100.000,00	135	553.500.000,00

Jadi pada pelaksanaan proyek *repair* struktur *wheat* silo dan *pellet* silo Tahap III membutuhkan biaya upah tenaga kerja sebesar Rp. 5.970.620.000,00.

Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Crash Duration* Penambahan Jam Kerja (Waktu Lembur)

Pada saat penambahan jam kerja (lembur) produktivitas pekerja tiap jam nya berubah seperti pada saat penambahan jam kerja (lembur) 1 jam perhari diperhitungkan produktivitasnya sebesar 90%, 2 jam perhari produktivitasnya sebesar 80% untuk percepatan durasi kegiatan-kegiatan kritis dihitung berdasarkan penambahan jam kerja (lembur) dari durasi normal yang ada.

Tabel 2. Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Crash Duration* pada Penambahan 1 Jam Kerja

Kode	Durasi Normal (Hari)	Durasi *Crashing* (Hari)
2.1	18	16
2.2	18	16
2.3	38	34
2.4	150	135
2.5	38	34
2.6	38	34
2.7	38	34
2.8	150	135
2.9	150	135
2.10	150	135
2.11	150	135
2.12	150	135
2.13	18	135
2.14	18	121
2.15	38	121
2.16	150	121
2.17	135	121
2.18	135	121
2.19	135	121
2.20	135	121
2.21	135	121
2.22	135	121
2.23	135	121

Untuk silo gandum lama dimana pekerjaannya berupa perbaikan silo 1- silo 2 dengan durasi normal 150 hari setelah penambahan 1 jam lembur menjadi 135 hari Juga untuk pekerjaan silo 3 - silo 4 setelah durasi

normal 150 hari dengan penambahan 1 jam lembur menjadi 135 hari untuk pekerjaan silo 5- silo 6 dengan durasi 135 hari setelah penambahan 1 jam lembur menjadi 121 hari. Jadi, hasil perhitungan *Crash Duration* 1 jam untuk kegiatan yang berada pada lintasan kritis atau kegiatan perbaikan silo gandum lama yaitu dari waktu normal 455 setalah perhitungan *Crash Duration* 1 jam menjadi 391 hari.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Crash Duration* pada Penambahan 2 Jam Kerja

Kode	Durasi Normal (Hari)	Durasi *Crashing* (Hari)
2.1	18	15
2.2	18	15
2.3	38	31
2.4	150	124
2.5	38	31
2.6	38	31
2.7	38	31
2.8	150	124
2.9	150	124
2.10	150	124
2.11	150	124
2.12	150	124
2.13	18	124
2.14	18	111
2.15	38	111
2.16	150	111
2.17	135	111
2.18	135	111
2.19	135	111
2.20	135	111
2.21	135	111
2.22	135	111
2.23	135	111

Untuk *silo* gandum lama dimana pekerjaannya berupa perbaikan silo 1- silo 2 dengan durasi normal 150 hari setelah penambahan 2 jam lembur menjadi 124 hari Juga untuk pekerjaan silo 3 - silo 4 setelah durasi normal 150 hari dengan penambahan 2 jam lembur menjadi 124 hari untuk pekerjaan silo 5- silo 6 dengan durasi 135 hari setelah penambahan 2 jam lembur menjadi 111 hari. Jadi, hasil perhitungan *Crash Duration* 2 jam untuk kegiatan yang berada pada lintasan kritis atau kegiatan perbaikan silo gandum lama yaitu dari waktu normal 455 setalah perhitungan *Crash Duration* 1 jam menjadi 359 hari.

Rekapitulasi Hasil Perhitungan Upah Penambahan Jam Kerja (Waktu Lembur)

Pada tabel berikut diperoleh upah pada kegiatan jalur kritis ini meningkat karena adanya upah penambahan jam kerja (lembur) 1 jam menjadi Rp.6.384.065.000,00 dengan upah kondisi normal Rp.5.970.620.000,00, sehingga dibutuhkan upah penambahan 1 jam lembur sebesar Rp.413.445.000,00.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Upah Penambahan 1 Jam Kerja

Kode	Durasi Normal (Hari)	Durasi Setelah Penambahan 1 Jam Lembur (Hari)	Upah Penambahan 1 Jam Lembur (Rp)
2.1	18	15	34.160.000,00
2.2	18	15	34.200.000,00
2.3	38	31	121.125.000,00

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Upah Penambahan 1 Jam Kerja (Lanjutan)

Kode	Durasi Normal	Durasi Setelah Penambahan 1 Jam Lembur	Upah Penambahan 1 Jam Lembur

	(Hari)	(Hari)	(Rp)
2.4	150	124	464.906.250,00
2.5	38	31	58.140.000,00
2.6	38	31	73.482.500,00
2.7	38	31	68.892.500,00
2.8	150	124	462.206.250,00
2.9	150	124	346.275.000,00
2.10	150	124	288.562.500,00
2.11	150	124	176.175.000,00
2.12	150	124	182.418.750,00
2.13	18	124	503.718.750,00
2.14	18	111	485.966.250,00
2.15	38	111	330.783.750,00
2.16	150	111	189.667.500,00
2.17	135	111	206.910.000,00
2.18	135	111	184.222.500,00
2.19	135	111	362.092.500,00
2.20	135	111	327.607.500,00
2.21	135	111	465.547.500,00
2.22	135	111	431.062.500,00
2.23	135	111	585.942.500,00
Total Upah Penambahan 1 Jam Kerja			**6.384.065.000,00**

Pada tabel berikut diperoleh upah pada kegiatan jalur kritis ini meningkat karena adanya upah penambahan jam kerja (lembur) 2 jam, menjadi Rp 6.709.971.125,00 dengan upah kondisi normal Rp. 5.970.620.000,00 sehingga dibutuhkan upah penambahan 2 jam lembur sebesar Rp. 739.351.125,00.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Upah Penambahan 2 Jam Kerja

Kode	Durasi Normal	Durasi Setelah Penambahan 2 Jam Lembur	Upah Penambahan 2 Jam Lembur
	(Hari)	(Hari)	(Rp)
2.1	18	15	37.625.000,00
2.2	18	15	39.725.000,00
2.3	18	15	141.877.500,00
2.4	38	31	476.785.000,00
2.5	150	124	60.450.000,00
2.6	38	31	74.438.750,00
2.7	38	31	70.253.750,00
2.8	38	31	48.551.875,00
2.9	150	124	674.305.000,00
2.10	150	124	201.422.500,00
2.11	150	124	54.782.000,00
2.12	150	124	294.125.000,00
2.13	150	124	609.453.000,00
2.14	150	124	592.443.000,00
2.15	135	111	445.086.250,00
2.16	135	111	200.632.500,00
2.17	135	111	216.450.000,00
2.18	135	111	195.637.500,00

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Upah Penambahan 2 Jam Kerja (Lanjutan)

Kode	Durasi Normal	Durasi Setelah Penambahan 2 Jam Lembur	Upah Penambahan 2 Jam Lembur
	(Hari)	(Hari)	(Rp)

2.19	135	111	378.807.500,00
2.20	135	111	327.172.500,00
2.21	135	111	453.712.500,00
2.22	135	111	522.077.500,00
2.23	135	111	594.157.500,00
Total Upah Penambahan 2 Jam Kerja			**6.709.971.125,00**

5. KESIMPULAN

Dengan menggunakan perangkat lunak *microsoft project* pada proyek *repair* struktur *wheat* silo dan *pellet* sillo tahap III di Surabaya diketahui lintasan kritis berada pada kegiatan mobilisai dan demobilisasi, administrasi dan pelaporan, keselamatan kerja dan perbaikan silo gandum lama. Berdasarkan hasil perhitungan TCTO, pada proyek *repair* struktur *wheat* silo dan *pellet* silo tahap III di Surabaya didapat waktu selesai paling cepat dalam waktu 359 hari dari waktu normal 455 hari, terjadi penurunan waktu sebesar 21,10% dari waktu normal. Pengurangan waktu tersebut didapatakan dari penambahan jam kerja (lembur) 2 jam setiap hari dengan penambahan biaya sebesar Rp.739.351.125,00. atau 2,64% dari nilai proyek. Berdasarkan hasil perhitungan TCTO, maka didapatkan biaya percepatan proyek *repair* struktur *wheat* silo dan *pellet* silo tahap III di Surabaya adalah Rp.413.445.000,00 atau 1,48% dari nilai proyek, dengan penurunan waktu kerja dari 455 hari menjadi 391 hari berarti terjadi penurunan waktu sebesar 14,07% dari waktu normal, pengurangan waktu tersebut didapatkan melalui penambahan jam lembur 1 jam perhari.

DAFTAR PUSTAKA

Ashari, N. F. (2023). Analisis Optimasi Waktu Dan Biaya Proyek Dengan Metode Time Cost Trade Off Dan Fast Track Pada Pekerjaan Penanganan Longsor. *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, *6*(2), 21–29. https://doi.org/10.14710/potensi.2023.19321

Sulistyo, A. B., & Al Fikri, M. (2021). Analisis Optimalisasi Waktu Dan Biaya Proyek Konstruksi Menggunakan Metode Time Cost Trade Off (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan Gorda-Bandung). *Jurnal InTent*, *4*(1), 25–40.

Vebiola, N. E., & Waskito, J. P. H. (2020). ANALISIS OPTIMASI WAKTU DAN BIAYA DENGAN METODE TIME COST TRADE OFF (Studi Kasus : Proyek Pembangunan Basement Kawasan Balai Pemuda). *Axial : Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, *8*(2), 113. https://doi.org/10.30742/axial.v8i2.1032

Waney, E. V. Y., & Ruitan, S. (2022). Perencanaan Waktu dan Penjadwalan Pelaksanaan Proyek Pembangunan Rusun TNI di Minahasa Utara. *Prosiding Seminar Nasional Produk Terapan Unggulan Vokasi*, *1*(1).

Zahir, L. A., Nugroho, D. H., Beji, J. K., Boyoangu, K., Tulungagung, K., Beji, J. K., Boyoangu, K., Tulungagung, K., & Planning, P. (2022). *02*, 44–55.

KAJIAN BIAYA K3 PADA RUAS JALAN TOL X STA 26+950 – STA 50+677

Katarina Rini Ratnayanti[1], dan Laela Nuryanti[2]

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl.PH.H. Mustofa No.23, Bandung*
Email: rini@itenas.ac.id
[2]*Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl.PH.H. Mustofa No.23, Bandung*
Email: laelanuryanti0312@gmail.com

ABSTRAK

Biaya Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan komponen yang sangat penting dalam manajemen proyek untuk memastikan keselamatan pekerja dan mengurangi risiko kecelakaan. Perencanaan biaya K3 adalah langkah penting yang memastikan alokasi sumber daya yang memadai untuk mengimplementasikan program-program keselamatan di lapangan. Biaya ini mencakup berbagai elemen, seperti pelatihan keselamatan, alat pelindung diri (APD), pemantauan kesehatan, penerapan prosedur keselamatan, serta manajemen risiko dan audit K3. Selanjutnya, setiap komponen biaya diestimasi berdasarkan unit harga dan volume pekerjaan yang terlibat, di mana hasilnya diintegrasikan ke dalam total anggaran biaya. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan perencanaan biaya K3 berdasarkan Surat Edaran Menteri PUPR No.11/SE/M/2019 dengan biaya K3 yang dihitung dari nilai kontrak proyek dan biaya kerugian K3 serta hilangnya hari kerja akibat kecelakaan kerja. Metode yang digunakan meliputi observasi, wawancara lapangan, dan studi literatur. Dari hasil perhitungan dan analisis menunjukkan bahwa biaya K3 yang dihitung berdasarkan peraturan SE Menteri PUPR No.11/SE/M/2019 adalah Rp 19,701,414,256 atau sekitar 0,93% lebih besar dari nilai kontrak dengan selisih 0.13% dari total nilai kontrak sebesar Rp 16,960,000,000 atau sekitar 0,8%. Biaya kerugian langsung (*direct cost)* dengan 17.978 jam kerja hilang akibat kecelakaan kerja dari jumlah total 24 kecelakaan kerja ringan dan seluruh biaya pengobatan dari saat terjadi kecelakaan hingga sembuh ditanggung oleh BPJS ketenagakerjaan dan BPJS kesehatan.

Kata Kunci: Biaya K3, SE Menteri PUPR No.11/SE/M/2019, Kerugian Akibat Kecelakaan Kerja, BPJS Ketenagakerjaan dan Kesehatan.

1. PENDAHULUAN

Dalam proyek konstruksi biaya Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan komponen penting dalam manajemen proyek untuk memastikan keselamatan pekerja dan mengurangi risiko kecelakaan. Biaya ini mencakup berbagai elemen, seperti pelatihan keselamatan, peralatan perlindungan diri, pemantauan kesehatan, dan penerapan prosedur keselamatan. Untuk meningkatkan produktivitas pekerja, diperlukan pelaksanaan K3 yang baik dan terstruktur. Salah satu rencana umum manajemen perusahaan adalah mengelola bahaya yang terkait dengan aktivitasnya, untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman, efisien, dan produktif. Berdasarkan PP Nomor 50 Tahun 2012 Tentang Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3), perusahaan wajib untuk memiliki rencana manajemen yang komprehensif guna mengelola risiko yang terkait dengan aktivitas konstruksi, sehingga dapat menciptakan lingkungan kerja yang aman. Rumusan masalah penelitian ini adalah perencanaan biaya dan kerugian K3 pada Ruas Jalan Tol X STA 26+950 – STA 50+677. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya biaya dan kerugian K3 pada Ruas Jalan Tol X STA 26+950 – STA 50+677 berdasarkan peraturan SE Menteri PUPR No.11/SE/M/2019 dibandingkan dengan total biaya K3 berdasarkan total nilai kontrak serta hilangnya hari kerja akibat kecelakaan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3)

Kesehatan dan Keselamatan Kerja Konstruksi mengacu pada semua tindakan yang dilakukan untuk memastikan dan melindungi keselamatan dan kesehatan para tenaga kerja dalam sektor konstruksi. Hal ini dilakukan melalui langkah-langkah pencegahan terhadap kecelakaan kerja dan penyakit yang timbul akibat pekerjaan (SE Menteri PUPR No.11/SE/M/2019). Dalam buku ILO (*International Labour Organization*) K3 adalah upaya untuk memelihara dan meningkatkan derajat tertinggi seluruh pekerja baik secara fisik, mental dan kesejahteraan sosial pekerja.

Biaya K3

Biaya K3 mencakup aspek keamanan, kesehatan kerja, dan keselamatan konstruksi yang harus diperhitungkan dan dialokasikan oleh penyedia dan pengguna jasa. Rincian kegiatan dalam penyelenggaraan sistem manajemen keselamatan konstruksi meliputi:

a) Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK);
b) Sosialisasi, promosi dan pelatihan;
c) Alat pelindung Kerja (APK) dan Alat Pelindung Diri (APD);
d) Asuransi dan perizinan;
e) Personil K3 Konstruksi;
f) Fasilitas, sarana, prasarana, dan alat kesehatan;
g) Rambu- rambu K3;
h) Konsultasi ahli terkait Keselamatan Konstruksi; dan lain-lain terkait pengendalian risiko Keselamatan Konstruksi

Kerugian K3

Kecelakaan kerja dapat menimbulkan berbagai kerugian bagi individu, perusahaan, maupun masyarakat. Kerugian K3 dibagi ke dalam dua jenis yaitu :

1. Biaya Langsung (*Direct Cost*) merupakan biaya yang secara langsung dikeluarkan akibat kecelakaan kerja, biaya ini biasanya ditanggung oleh perusahaan/BPJS ketenagakerjaan biaya tersebut meliputi biaya pengobatan, santunan, kerusakan properti dan lainnya.
2. Biaya Tidak Langsung (*Indirect Cost*) yaitu biaya yang tidak secara langsung dikeluarkan akibat kecelakaan kerja, biaya ini umumnya ditanggung oleh perusahaan seperti kerugian hari kerja hilang/penurunan produktivitas, biaya perekrutan dan pelatihan dan lainnya.

Berdasarkan BPJS ketenagakerjaan santunan kecelakaan kerja yang mengalami cacat, tabel persentase cacat tetap sebagian dan cacat lainnya terdapat pada lampiran PP Nomor 44 Tahun 2015:

a) Cacat sebagian anatomis sebesar = % $sesuai\ tabel\ cacat\ x\ 80\ x\ upah\ sebulan$
b) Cacat sebagian fungsi sebesar = % $berkurangnya\ fungsi\ x\ \%\ sesuai\ tabel\ cacat\ x\ 80\ x\ upah\ sebulan$
c) Cacat total tetap sebesar = $70\%\ x\ 80\ x\ upah\ sebulan$
d) Santunan kematian sebesar = $60\%\ x\ 80\ x\ upah\ sebulan$
e) Biaya pemakaman sebesar Rp. 10.000.000, dan santunan berkala diberikan jika peserta mengalami cacat total tetap atau meninggal dunia akibat kecelakaan kerja atau penyakit akibat kerja dan dibayarkan sekaligus sebesar Rp. 12.000.000.
f) Tingkat keparahan (*saverity rate*) adalah suatu parameter yang digunakan untuk mengukur keparahan total hilangnya jam kerja yang hilang setiap sejuta jam kerja orang akibat kecelakaan kerja.

$$SR = \frac{Jumlah\ hari\ kerja\ yang\ hilang}{Jumlah\ jam\ kerja}\ x\ 1.000.000$$

Kecelakaan kerja umumnya di klasifikasikan berdasarkan tingkat keparahan dampaknya terhadap pekerja, antara lain sebagai berikut:

1. Kecelakaan kerja ringan
   Suatu insiden yang mengakibatkan cedera atau gangguan kesehatan yang tidak serius, di mana pekerja biasanya masih dapat bekerja setelah perawatan sederhana atau bahkan tanpa perawatan medis. Antara lain luka lecet, memar, luka kecil, atau tersandung tanpa jatuh dan lainnya.
2. Kecelakaan kerja sedang
   Insiden yang menyebabkan cedera atau gangguan kesehatan yang lebih serius daripada kecelakaan ringan, tetapi masih bisa ditangani dengan perawatan medis standar. Cedera ini biasanya menyebabkan pekerja harus mengambil cuti atau waktu pemulihan yang lebih lama. Antara lain patah tulang ringan, luka cukup dalam yang memerlukan jahitan, atau cedera otot yang menyebabkan ketidakmampuan sementara untuk bekerja dan lain-lain.
3. Kecelakaan kerja berat
   Insiden yang menyebabkan cedera serius atau fatal, yang sering kali memerlukan perawatan medis intensif, pembedahan, atau bahkan menyebabkan cacat permanen atau kematian. Antara lain amputasi, cedera kepala parah, luka bakar serius, jatuh dari ketinggian yang menyebabkan trauma berat, atau insiden yang menyebabkan kematian.

BPJS ketenagakerjaan

Untuk menghitung iuran BPJS Ketenagakerjaan, perlu mengetahui persentase iuran yang harus dibayarkan dan gaji pekerja yang menjadi dasar perhitungan. Berikut adalah rincian persentase untuk masing-masing program BPJS Ketenagakerjaan dan BPJS Kesehatan.

1. Jaminan Kecelakaan Kerja (JKK)
   Persentase Iuran antara 0,24% - 1,74% dari upah, tergantung pada tingkat risiko pekerjaan rumus:

$$Iuran\ JKK = Gaji\ Pokok\ x\ \%\ Iuran\ JKK$$

2. Jaminan Kematian (JKM)
   Persentase Iuran sekitar 0,3% dari upah.

$$Iuran\ JKM = Gaji\ Pokok\ x\ 0{,}3\%$$

3. Jaminan Hari Tua (JHT)
   Persentase Iuran sebesar 5,7% dari upah (3,7% dibayar oleh perusahaan, 2% dibayar oleh pekerja).

   Rumus Iuran Perusahaan:

$$Iuran\ JHT\ Perusahaan = Gaji\ Pokok\ x\ 3{,}7\%$$

   Rumus Iuran Pekerja:

$$Iuran\ JHT\ Pekerja = Gaji\ Pokok\ x\ 2\%$$

4. Jaminan Pensiun (JP)
   Persentase Iuran sebesar 3% dari upah (2% dibayar oleh perusahaan, 1% dibayar oleh pekerja).

   Rumus Iuran Perusahaan:

$$Iuran\ JP\ Perusahaan = Gaji\ Pokok\ x\ 2\%$$

   Rumus Iuran Pekerja:

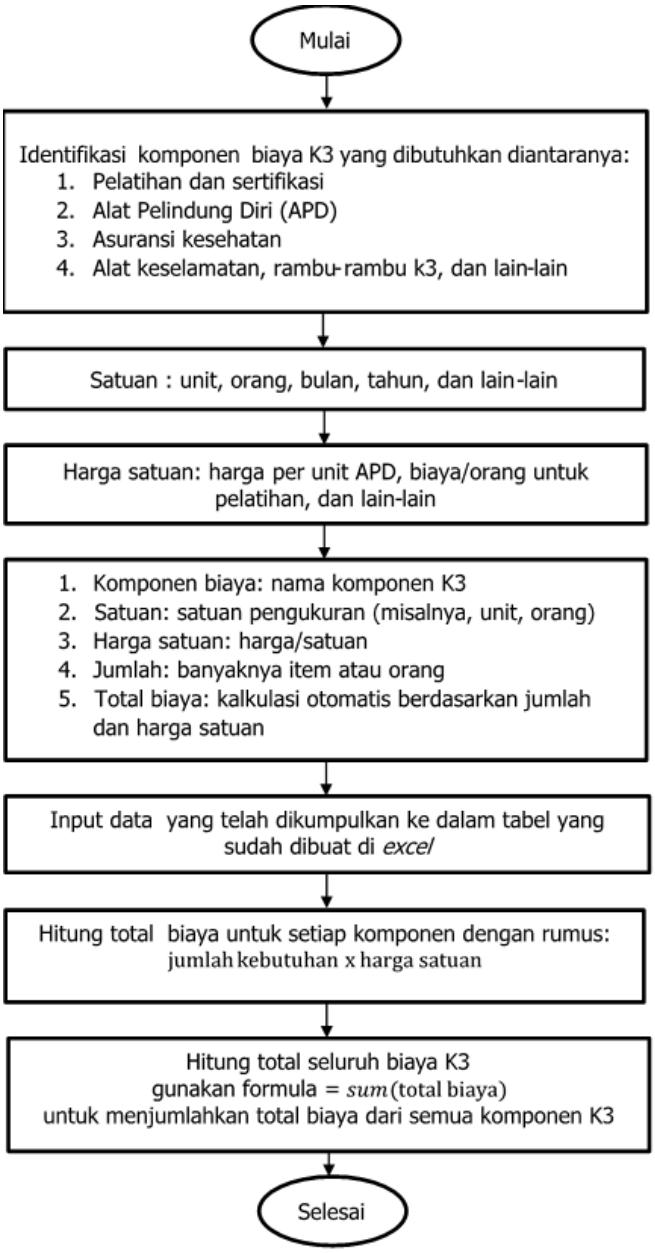
$$Iuran\ JP\ Pekerja = Gaji\ Pokok\ x\ 1\%$$

Berdasarkan Perpres No. 59 Tahun 2024, besaran iuran BPJS Kesehatan untuk pekerja belum mengalami perubahan dari aturan sebelumnya. Untuk pekerja penerima upah (PPU), iuran sebesar 5% dari penghasilan pekerja, di mana 4% dibayarkan oleh pemberi kerja, dan 1% dipotong dari gaji pekerja.

3. METODOLOGI

Objek dan subjek penelitian tahap

Metode penelitian dilaksanakan melalui survey, wawancara di lapangan serta studi literatur untuk memperoleh data yang sesuai dan mengetahui risiko bahaya yang mungkin terjadi selama masa pelaksanaan proyek. Terdapat 2 jenis sumber data penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder. Data primer dilakukan dengan wawancara bersama HSE *Officer* dan Tim Manajemen proyek dan data sekunder dilakukan melalui studi literatur. Pada metode pengumpulan data dan penelitian ini dilakukan seperti pada diagram alir pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1 *Flowchart* Perencanaan Anggaran Biaya K3

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perencanaan biaya

Pada Proyek Jalan Tol X jumlah pekerja lapangan dalam pelaksanaan proyek ini berjumlah 600 orang pekerja dan 68 orang staff. Nilai kontrak proyek sekitar 2,12 triliun dengan jenis kontrak *modified turn key* dan waktu pelaksanaan proyek 2 tahun 2 bulan. Berikut hasil perhitungan perencanaan anggaran biaya K3 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Anggaran Perencanaan Biaya K3

No	Uraian	Satuan	Kuantitas	Harta Satuan	Total
1	**Penyiapan RK3K terdiri atas:**				
a	Pembuatan Manual, Prosedur, Instruksi Kerja, Ijin Kerja	Set	1	Rp 50,000,000	Rp 50,000,000
b	Pembuatan Kartu Identitas Pekerja (KIP)	Lb	668	Rp 15,000	Rp 10,020,000
2	**Sosialisasi dan Promosi K3 terdiri dari :**				
a	Induksi K3 (*Safety Induction*);	Org	668	Rp 50,000	Rp 33,400,000
b	Pengarahan K3 (*safety briefing)* : Pertemuan Keselamatan (*Safety Talk* dan/atau *Tool Box Meeting*);	Kegiatan	720	Rp 200,000	Rp 144,000,000
c	Pelatihan K3;	Ls	1	Rp 20,000,000	Rp 20,000,000
d	Simulasi K3	Kegiatan	3	Rp 1,000,000	Rp 3,000,000
e	Spanduk (*banner)* ;	Lb	300	Rp 350,000	Rp 2,730,000,000
f	Poster;	Lb	300	Rp 150,000	Rp 1,170,000,000
g	Papan Informasi K3.	Bh	10	Rp 550,000	Rp 143,000,000
3	**Alat Pelindung Kerja terdiri atas:**				
a	Jaring Pengaman (*Safety Net);*	m2	3000	Rp 50,000	Rp 150,000,000
b	Tali Keselamatan (*Life Line*);	m'	1800	Rp 500,000	Rp 900,000,000
c	Penahan Jatuh *(Safety Deck);*	m2	60	Rp 500,000	Rp 30,000,000
d	Pagar Pengaman *(Guard Railling);*	m	300	Rp 300,000	Rp 90,000,000
e	Pembatas Area (*RestrictedArea*).	Roll	100	Rp 500,000	Rp 50,000,000
4	**Alat Pelindung Diri terdiri atas:**				
a	Helm Pelindung *(Safety Helmet)* ;	Bh	700	Rp 50,000	Rp 140,000,000
b	Pelindung Mata (*Goggles,Spectacles*);	Bh	600	Rp 75,000	Rp 180,000,000
d	Masker khusus	Bh	50	Rp 50,000	Rp 2,500,000
e	Pelindung Telinga *(EarPlug, EarMuff);*	Bh	30	Rp 50,000	Rp 1,500,000
f	Pelindung Pernafasan dan Mulut (Masker)	Bh	100	Rp 2,000	Rp 200,000
g	Sarung Tangan (*Safety Gloves*);	Psg	100	Rp 10,000	Rp 10,000,000
h	Sepatu Keselamatan (*Safety Shoes*) untuk Staf	Psg	100	Rp 300,000	Rp 120,000,000
i	Sepatu keselamatan (*Safety Shoes*)	Psg	650	Rp 120,000	Rp 624,000,000
j	Penunjang Seluruh Tubuh (*FullBody Harness*);	Bh	50	Rp 600,000	Rp 30,000,000
k	Rompi Keselamatan (*SafetyVest*);	Bh	700	Rp 35,000	Rp 24,500,000
l	Celemek (*Apron/Coveralls*);	Bh	30	Rp 150,000	Rp 4,500,000
m	Pelindung Jatuh (*Fall Arrester*);	Bh	30	Rp 500,000	Rp 15,000,000
n	Tameng wajah untuk pekerja las	Bh	50	Rp 60,000	Rp 3,000,000
5	**Asuransi Dan Perijinan terdiri atas:**				
a	BPJS Ketenagakerjaan				
	Manajer Proyek	Org/Bln	1	Rp 2,223,717	Rp 57,816,642
	Pelaksana Utama	Org/Bln	3	Rp 1,418,217	Rp 110,620,926
	Pelaksana	Org/Bln	3	Rp 1,203,417	Rp 93,866,526
	Surveyor	Org/Bln	16	Rp 773,817	Rp 321,907,872
	Quality Control	Org/Bln	4	Rp 666,417	Rp 69,307,368
	Engineering staff	Org/Bln	4	Rp 773,817	Rp 80,476,968
	Manajer SHE	Org/Bln	1	Rp 1,740,417	Rp 45,250,842
	QHSE	Org/Bln	9	Rp 881,217	Rp 206,204,778

Tabel 1 Anggaran Perencanaan Biaya K3 (Lanjutan)

No	Uraian	Satuan	Kuantitas	Harta Satuan		Total
	Staff	Org/Bln	10	Rp 827,517	Rp	215,154,420
	Drafter	Org/Bln	4	Rp 505,317	Rp	52,552,968
	Finance	Org/Bln	13	Rp 988,617	Rp	334,152,546
	Pekerja	Org/Bln	600	Rp 82,008	Rp	1,279,324,800
b	BPJS Kesehatan					
	Manajer Proyek	Org/Bln	1	Rp 828,200	Rp	21,533,200
	Pelaksana Utama	Org/Bln	3	Rp 528,200	Rp	41,199,600
	Pelaksana	Org/Bln	3	Rp 448,200	Rp	34,959,600
	Surveyor	Org/Bln	16	Rp 288,200	Rp	119,891,200
	Quality Control	Org/Bln	4	Rp 248,200	Rp	25,812,800
	Engineering staff	Org/Bln	4	Rp 288,200	Rp	29,972,800
	Manajer SHE	Org/Bln	1	Rp 648,200	Rp	16,853,200
	QHSE	Org/Bln	9	Rp 328,200	Rp	76,798,800
	Staff	Org/Bln	10	Rp 308,200	Rp	80,132,000
	Drafter	Org/Bln	4	Rp 188,200	Rp	19,572,800
	Finance	Org/Bln	13	Rp 368,200	Rp	124,451,600
	Pekerja	Org/Bln	600	Rp 160,800	Rp	2,508,480,000
c	Surat Ijin Kelaikan Alat;	Alat/Kend	50	Rp 300,000	Rp	15,000,000
d	Surat Ijin Operator;	Lb/alat	50	Rp 300,000	Rp	15,000,000
e	Surat Ijin Pengesahan Panitia Pembina Keselamatan dan Kesehatan Kerja	Ls	1	Rp 500,000	Rp	500,000
6	**Personil K3 terdiri atas:**					
a	Ahli K3	Org/Bln	1	Rp 15,000,000	Rp	390,000,000
b	Petugas K3	Org/Bln	6	Rp 7,000,000	Rp	1,092,000,000
c	Petugas Tanggap Darurat;	Org/Bln	3	Rp 5,000,000	Rp	390,000,000
d	Petugas Pengatur Lalu Lintas (*Flagman);*	Org/Bln	30	Rp 3,500,000	Rp	2,730,000,000
e	Petugas Medis.	Org/Bln	3	Rp 3,500,000	Rp	273,000,000
7	**Fasilitas sarana kesehatan;**					
a	Peralatan P3K(Kotak P3K, Tandu, Tabung Oksigen,Obat Luka,Perban)	Set	50	Rp 500,000	Rp	200,000,000
b	Ruang P3K (Tempat Tidur Pasien, *Stetoskop*,Timbangan Berat Badan)	Set	5	Rp 1,000,000	Rp	5,000,000
c	Peralatan Pengasapan (*Fogging*) ;	Unit	5	Rp 1,000,000	Rp	5,000,000
d	Obat Pengasapan.	Unit	5	Rp 600,000	Rp	3,000,000
e	Bak Sampah	Bh	50	Rp 75,000	Rp	3,750,000
8	**Rambu-Rambu terdiri atas:**					
a	Rambu Petunjuk;	Bh	300	Rp 40,000	Rp	312,000,000
b	Rambu Larangan	Bh	300	Rp 40,000	Rp	312,000,000
c	Rambu Peringatan;	Bh	300	Rp 40,000	Rp	312,000,000
d	Rambu Kewajiban;	Bh	300	Rp 40,000	Rp	312,000,000
e	Rambu Informasi;	Bh	300	Rp 40,000	Rp	312,000,000
f	Rambu Pekerjaan Sementara;	Unit	100	Rp 35,000	Rp	91,000,000
g	Tongkat Pengatur Lalu Lintas (*Warning Lights Stick*);	Bh	100	Rp 35,000	Rp	28,000,000

Tabel 1 Anggaran Perencanaan Biaya K3 (Lanjutan)

No	Uraian	Satuan	Kuantitas	Harta Satuan		Total
h	Kerucut Lalu Lintas (*Traffic Cone*) ;	Unit	200	Rp 60,000	Rp	96,000,000
i	Lampu Putar (*Rotary Lamp*);	Unit	100	Rp 50,000	Rp	40,000,000
j	Lampu Selang Lalu Lintas.	Roll	200	Rp 35,000	Rp	56,000,000
9	**Lain- Lain Terkait Pengendalian Risiko K3**					
a	Alat Pemadam Api Ringan (APAR);	Bh	50	Rp 200,000	Rp	10,000,000
b	Sirine;	Bh	5	Rp 50,000	Rp	250,000
c	Bendera K3;	Bh	10	Rp 50,000	Rp	500,000
d	Lampu Darurat (*Emergency Lamp*);	Unit	10	Rp 50,000	Rp	500,000
e	Program Inspeksi Dan Audit Internal;	Kegiatan	8	Rp 5,000,000	Rp	40,000,000
f	Pelaporan dan Penyelidikan Insiden.	Kegiatan	24	Rp 500,000	Rp	12,000,000
Total Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3)					**Rp**	**19,701,414,256**

Berdasarkan hasil perhitungan didapat total anggaran biaya K3 sebesar Rp 19,701,414,256 dan berdasarkan wawancara dengan HSE *officer* biaya K3 pada Proyek Jalan Tol X yang digunakan sekitar 0,8% dari nilai kontrak yaitu sebesar Rp 16,960,000,000 untuk *range* biaya K3 menurut peraturan bisa sampai 2%.

Biaya pengobatan termasuk kedalam kerugian atau biaya langsung di mana biaya tersebut dikeluarkan oleh perusahaan dan di tanggung oleh BPJS Ketenagakerjaan dan BPJS kesehatan untuk pekerja yang mengalami kecelakaan kerja dari awal kecelakaan sampai sembuh. Untuk pembayaran BPJS kesehatan menurut PERPRES Nomor 59 Tahun 2024 Tentang Jaminan Kesehatan sekitar 5% di mana 4% ditanggung oleh perusahaan dan 1% oleh pekerja. Pekerja yang mengalami kecelakaan kerja mendapatkan jaminan kecelakaan kerja dan santunan dari perusahaan di mana biaya tersebut sudah termasuk biaya pengobatan, biaya rawat inap, rotgen, konsultasi dokter, operasi, biaya perawatan puskesmas, rumah sakit. Menurut data yang didapat dari proyek terdapat 3 jenis kecelakaan kerja meliputi kecelakaan kerja ringan, sedang dan berat. Hasil data yang diperoleh dari lapangan seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Jenis Kecelakaan Kerja

No	Janis Kecelakaan	Ada	Tidak Ada
1	Kecelakaan Kerja Ringan	✓	
2	Kecelakaan kerja Sedang		✓
3	Kecelakaan Kerja Berat		✓

Menghitung analisis tingkat keparahan (*saverity rate)* kecelakaan kerja ringan pada proyek. Dalam buku profil K3 2022 menurut standar ILO Angka 1.000.000 jam kerja orang standar dengan perhitungan sesuai ILO (50 minggu dikalikan 40 jam untuk setiap 500 orang tenaga kerja) sedangkan untuk jumlah kurang dari sama dengan 100-200 pekerja bisa menggunakan angka 200.000 jam kerja.

1. Analisis Berat Kecelakaan Kerja (SR) Kecelakaan Kerja Ringan Periode 1 Tahun Adalah :
   1 hari : 8 Jam kerja
   1 minggu : 40 Jam kerja
   1 tahun : 48 Minggu
   Jumlah Kecelakaan : 24 Kali
   Jumlah Absen : 24 Hari
   Jumlah staff dan pekerja : 668 Orang
   Jumlah jam kerja dalam setahun : 256.512 Jam Kerja
   = Jumlah Tenaga Kerja x Hari Kerja dalam Setahun x 8
   = 668 x 48 x 8
   = 256.512 Jam Kerja
   Jumlah Absen = 24 hari
   = 24 x 8 jam
   = 192 jam

Total jumlah jam kerja = Jumlah jam kerja dalam setahun-jumlah absen
= 256.512 – 192
= 256.320 Jam Kerja

$$SR = \frac{Jumlah\ hari\ kerja\ yang\ hilang}{Jumlah\ Jam\ Kerja} x\ 1.000.000$$

$$SR = \frac{(24x192)}{256.320} x\ 1.000.000$$

$$SR = 17.978\ Jam$$

Jadi selama 1 tahun sekitar 17.978 jam yang hilang pada setiap satu juta jam kerja pekerja produktif untuk total biaya kecelakaan kerja ringan, sedang berat mulai dari pengobatan, biaya rawat inap, biaya operasi dan lainnya ditanggung oleh BPJS kesehatan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Ruas Jalan Tol X STA 26+950 – STA 50+677, Biaya K3 yang diperlukan pada Proyek Jalan Tol X berdasarkan harga satuan lapangan dan Peraturan SE Menteri PUPR No.11/SE/M/2019 adalah Rp 19,701,414,256 atau sekitar 0,93% lebih besar dari nilai kontrak dengan selisih 0.13% dari total nilai kontrak sebesar Rp 16,960,000,000 atau sekitar 0,8%. Serta biaya kerugian langsung (*direct cost*) dengan 17.978 jam kerja hilang akibat kecelakaan kerja dari jumlah total 24 kecelakaan kerja ringan dan seluruh biaya pengobatan dari saat terjadi kecelakaan hingga sembuh ditanggung oleh BPJS ketenagakerjaan dan BPJS kesehatan.

DAFTAR PUSTAKA

Arasid, Afrizal Yusuf. and Sajiyo. (2022). "Analisa Dampak Kecelakaan Kerja Terhadap Kerugian Finansial Perusahaan." JISO : *Journal of Industrial and Systems Optimization*, e-journal.umaha.ac.id/jiso/article/view/1783.

Eka, Asih. Seri Buku Saku 5 Paham JKK dan JKM Jaminan Kecelakaan Kerja dan Jaminan Kematian, Friedrich-Ebert-Stiftung, (2020). <https://anyflip.com/rnfla/ctiv/basic>

Ibrahim, Hasbi. "Strategi Penerapan Sistem Manajemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja." Berdasarkan OHSAS 18001 : 2007 dan Permenaker No 50/MEN/2012. Cetakan I 2013. Alauddin Universitas Press.

International Labour Organization (2013). Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Tempat Kerja Sarana Produktivitas Pedoman Pelatihan Untuk Manajer dan Pekerja Modul 5. Jakarta.

Informasi Kepesertaan Penerima Upah BPJS Ketenagakerjaan. www.bpjsketenagakerjaan.go.id/penerima-upah.html. Accessed 02 Aug. 2024.

Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 15 Tahun 2005 Tentang Jalan Tol.

Peraturan Pemerintah SMK3 PP 50 Tahun 2012 tentang sistem manejemen Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) : Sekertariat Negara.

Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2024 Perubahan Ketiga Atas Peraturan Presiden Nomor 82 Tahun 2018 Tentang Jaminan Kesehatan.

Profil Keselamatan dan Kesehatan Kerja Nasional Indonesia Tahun 2022. Direktorat jendral Pembinaan Pengawasan Ketenagakerjaan Dan Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Kementerian Ketenagakerjaan RI 2022.

PP No. 44 Tahun 2015 Tentang Penyelenggaraan Program Jaminan Kecelakaan Kerja dan Jaminan Kematian.

Pramesti, Tri Jata Ayu. "Hak Pekerja Yang Meninggal Dunia Akibat Kecelakaan Kerja." Pusat Produk dan Jasa Hukum Terpercaya Di Indonesia. <www.hukumonline.com/klinik/a/hak-pekerja-yang-meninggal-dunia-akibat-kecelakaan-kerja-lt52f9b0728ea48/>

Surat Edaran Menteri PUPR Nomor. 11/SE/M/2019 Tentang Petunjuk Teknis Biaya Penyelenggaraan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi.

Yuliana, Ni P. I., and Ni K. S, Ebtha Yuni. "Analisis Anggaran Biaya Keselamatan dan Kesehatan Kerja Proyek Konstruksi Gedung SMA N 2 Abiansemal." Paduraksa, vol. 9, no. 2, 2020, pp. 201-211, doi:10.22225/pd.9.2.1792.201-211.

KAJIAN RISIKO BENCANA DALAM PEMBANGUNAN INFRASTRUKTUR TURYAPADA TOWER , KABUPATEN BULELENG, BALI

Alvin Yesaya[1]*, I Putu Gustave Suryantara Pariartha[1],I Nyoman Sutarja[1], I Made Aryatirta Predana[1], Made Widya Jayantari[1],Anak Agung Diah Parami Dewi[1], Ni Putu Delima Yogeswari Saraswati[1], Made Dodiek Wirya Ardana[1], Anak Agung Gde Agung Yana[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran, Badung, Bali
*[*]**Corresponding author**: alvinyesaya@unud.ac.id*

ABSTRAK

Sektor pariwisata berkontribusi sangat besar terhadap perekonomian di Provinsi Bali. Infrastruktur pariwisata di Bali hanya berfokus di area selatan Bali yaitu Kabupaten Badung dan Kota Denpasar sehingga terjadinya fenomena *overtourism*. Pembangunan menara Turyapada dipersiapkan sebagai pemeretaan infrastruktur di area utara Bali sebagai sarana pengembangan jaringan telekomunikasi dan kawasan wisata baru. Akan tetapi, lokasi pembangunan Tower Turyapada di kecamatan Sukasada kabupaten Buleleng terletak di wilayah yang berpontesial terhadap bencana alam. Oleh karena itu perlu kajian risiko bencana yang komprehensif untuk menyiapkan infrastruktur kepariwisataan yang Tangguh bencana. Studi ini bertujuan untuk mengkaji risiko bencana dalam pembangunan infrastruktur menara, mengidentifikasi potensi bahaya, menganalisis kerentanan, serta merumuskan strategi mitigasi yang efektif. Metode penelitian dilakukan dengan melakukan pengumpulan data primer melalui observasi lapangan, wawancara dan *focus group discussion*. Data sekunder diambil dari studi literatur dan data historis kebencanaan yang pernah terjadi di lokasi tersebut. Setelah data dikumpulkan, maka dilakukan kajian analisis risiko bencana mencakup identifikasi bahaya, analisis kerentanan, dan evaluasi kapasitas tower Turyapada dari bencana alam. Hasil analisis risiko menjadi acuan untuk melakukan strategi mitigasi yang tepat secara struktural dan non-struktural.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi pembangunan Menara diidentifikasikan memiliki bahaya yang cukup tinggi untuk tanah longsor dan cuaca ekstrim. Kawasan ini juga memiliki kerentanan yang cukup tinggi terhadap gempa bumi, tanah longsor, dan cuaca ekstrim. Untuk kapasitas, pembangunan tower diasumsikan telah memenuhi kriteria desain yang telah dipakai sesuai dengan SNI sehingga dianggap memiliki kapasitas yang cukup baik. Analisis kajian risiko bencana diskoring berdasarkan skor bahaya, kerentanan, dan kapasitas sehingga didapatkan bencana tanah longsor merupakan level tinggi, cuaca ekstrim level sedang, dan gempa bumi, kebakaran hutan&lahan, dan letusan gunung api dalam level rendah. Strategi mitigasi struktural meliputi pembangunan dindin penahan tanah di sekitar tower untuk mengatasi tanah longsor dan pemasangan alat pendeteksi cuaca otomatis untuk memantau kondisi cuaca ekstrim. Mitigasi non-struktural mencakup pengembangan wisata sadar bencana dan penyusunan rencana jalur evakuasi.

Kata kunci: Identifikasi Bahaya, Kajian Risiko Bencana, Turyapada Tower, Mitigasi Struktural, Mitigasi Non-Struktural

1. PENDAHULUAN

Provinsi Bali merupakan destinasi utama dalam pariwisata yang berkontribusi sebesar 78% di tahun 2019 terhadap perekonomian di Bali dibandingkan dengan sektor lain (Purwahita, 2021). Akan tetapi, saat ini infrastruktur pariwisata Bali hanya berfokus di area Bali Selatan, yaitu Kabupaten Badung dan Kota Denpasar, sehinngga menyebabkan terjadinya fenomena *overtourism* akibat gentrifikasi pariwisata di kawasan Sanur, Kuta, dan Ubud (Suyadny, 2021). Kondisi ini juga menyebabkan terjadinya disparitas atau ketimpangan ekonomi seperti yang ditunjukkan oleh gini rasio antara kabupaten/kota di wilayah Bali Selatan (Badung & Denpasar) dibawah 0,3 dibandingkan dengan wilayah lain seperti di Bali Utara (Buleleng&Karangasem) dengan angka lebih besar dari 0,35 (Arditya,2023). Oleh karena itu pemerataan pembangunan infrastruktur untuk menunjang pariwisata diperlukan dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat khususnya di Kabupaten Buleleng. salah satunya adalah meningkatkan sarana dan prasarana kepariwisataan dengan menyediakan infrastruktur untuk jaringan telekomunikasi

Pembangunan Menara Turyapada merupakan jawaban untuk mengembangkan jaringan telekomunikasi di wilayah Bali Utara dan sebagai destinasi pariwisata baru. Lokasi Menara ini terletak di di Kecamatan Sukasada, diperkirakan

memiliki area pancaran yang optimal di wilayah Bali Utara karena ketinggian lokasinya. Selain itu lokasinya yang strategis di dekat area wisata Pura UlunDanu Bedugul membuat potensi untuk dikembangkan sebagai destinasi pariwisata teknologi terpadu berbasis kearifan lokal Bali, berupa Taman Teknologi Komunikasi Bali Smart. Hal ini akan menjadi pengungkit perekonomian Kecamatan Sukasada khususnya dan Bali pada umumnya, menjadi pusat pertumbuhan perekonomian baru, dan menyeimbangkan pembangunan antar wilayah.

Kabupaten Buleleng di Bali, yang merupakan lokasi pembangunan menara Turyapada, merupakan daerah yang memiliki potensi risiko bencana yang signifikan. Oleh karena itu, pembangunan infrastruktur harus melalui kajian risiko bencana yang mendalam dan komprehensif. Kabupaten Buleleng dikenal memiliki beberapa ancaman bencana alam seperti gempa bumi, letusan gunung berapi, banjir, tanah longsor, dll. Risiko-risiko ini harus dipertimbangkan dalam proses perencanaan dan pembangunan infrastruktur.

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kajian risiko bencana yang berpotensi terjadi di Kawasan Turyapada Tower Komunikasi Bali Smart 6.0 Kerthi Bali di Kabupaten Buleleng. Setelah menganalisis risiko, dilakukan langkah-langkah dan prosedur mitigasi untuk mengurangi risiko. Melalui kajian ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang komprehensif mengenai tingkat kerentanan serta kapasitas mitigasi di menara Turyapada. Dengan demikian nantinya menara Turyapada dapat menjadi wilayah wisata yang tangguh bencana.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu kajian potensi risiko bencana adala deskriptif dan ekploratorif dengan menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer yang dilakukan yaitu observasi lapangan, wawancara dengan warga, dan focus group discussion untuk mendapatkan masukan dari berbagai stakeholder terkait. Sumber data primer ini berbentuk data naratif yang merupakan hasil wawancara dengan informan yang terdiri dari pihak-pihak yang terlibat dalam pengembangan Kawasan Tower Turyapada dan desa di sekitarnya. Data sekunder adalah bentuk dokumen kajian baik kajian risiko bencana, analisis data kebijakan hukum terkait mitigasi bencana, studi kepustakaan dan lainnya. Data sekunder diambil dari kajian kerentanan dari berbagai sumber seperti website inarisk, BMKG, dokumen BPBD, dll

Data primer dan sekunder kemudian dianalisis dan ditriangulasi untuk menguji kevaliditasan data tersebut dengan hasil studi kepustakaan termasuk komparasi dengan temuan dan hasil wawancara (Sugiyono, 2021). Setelah data potensi risiko bencana terkumpul, kemudian dibuat analisis indeks kerentanan dengan mebobotkan masing-masing jenis bencana. Setelah menganalisis kajian risiko banana, strategi mitigasi bencana diusulkan menggunakan pendekatan secara struktural dan non-struktural. Kajian ini termasuk kajian kualitatif dengan pendekatan studi kasus pada Kawasan Tower Turyapada yang kemudian menghasilkan, mengolah dan menganalisa data dalam bentuk deskriptif.

2.1 Data Primer

Pengumpulan data terkait dengan potensi bencana dilakukan dengan cara langsung atau data primer serta data sekunder yaitu dengan melakukan studi literatur. Observasi lapangan ke wilayah pembangunan menara Turyadapa untuk untuk mengidentifikasi kondisi geografis, geologis, dan lingkungan sekitar.di kawasan yang menjadi tempat lokasi dibangunnya infrastruktur tersebut. : Melakukan survei langsung di lokasi pembangunan Menara Turyapada. Setelah itu dilakukan wawancara dan focus group discussion yaitu Melakukan wawancara dengan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah daerah, ahli geologi, dan masyarakat setempat untuk mendapatkan informasi mengenai potensi risiko bencana dan upaya mitigasi yang telah dilakukan. Gambar 1 menunjukkan kegiatan pengambilan data primer dengan melakukan *focus group discussion* (FGD) dan wawancara dengan berbagai pemangku kepentingan untuk mendapatkan masukan dan data historis di wilayah tersebut.



Gambar 1. Kegiatan *Focus Group Discussion* dan Wawancara Pemangku Kepentingan

2.2 Data Sekunder

Pengumpulan Data Sekunder Studi literatur: Mengumpulkan data dari berbagai sumber tertulis seperti jurnal ilmiah, laporan pemerintah, dan dokumen teknis yang berkaitan dengan risiko bencana di Kabupaten Buleleng. Data historis: Mengkaji data historis mengenai kejadian bencana alam di Kabupaten Buleleng, seperti gempa bumi, letusan gunung berapi, dan banjir. Data sekunder diakses melalui website *inarisk* dan dokumen kajian risiko bencana Kabupaten Buleleng (BPBD Buleleng, 2021)

2.3 Metode Pengkajian Risiko & Strategi Mitigasi Bencana

Analisis risiko bencana merupakan salah satu metode untuk mengetahui tingkat bencana yang terjadi di suatu wilayah tertentu yang bertujuan untuk memberikan informasi tingkat risiko dengan memperhatikan factor *hazard, vulnerability,* dan *capacity* (BNPB, 2021). Perhitungan potensi risiko dapat dihitung dengan persamaan (1) berikut

$$Risk = Hazard\ x\ \frac{Vulnerability}{Capacity} \quad (1)$$

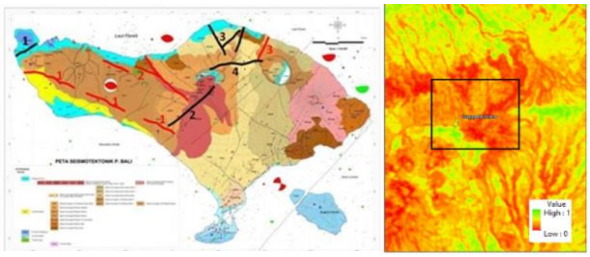
Langkah pertama dalam menghitung potensi risiko adalah mengidentifikasi jenis-jenis bencana alam yang berpotensi terjadi di lokasi pembangunan Menara Turyapada, seperti gempa bumi, letusan gunung berapi, cuaca ekstrim, dan tanah longsor, dan kebakaran hutan&lahan. Kemudian dilakukan analisis tingkat kerentanan infrastruktur dan wilayah sekitar kawasan Turyapada terhadap masing-masing jenis bencana alam yang telah diidentifikasi. Ini mencakup evaluasi struktur bangunan, area sekitar wilayah kawasan Tower, serta penduduk yang tinggal di area kawasan tersebut mencakup dampak fisik, ekonomi, sosial, dan lingkungan. Lalu langkah terakhir adalah menghitung kapasitas infrastruktur tower terhadap bahaya bencana tersebut

Strategi mitigasi bencana diperlukan untuk membuat resiliensi terhadap bencana. Strategi mitigasi bencana yang diusulkan meliputi secara komprehensif baik secara struktural maupun secara non-struktural sehingga mitigasi yang dilakukan dapat berjalan secara optimal (Novianti, 2022). Mitigasi struktural merupakan upaya dalam meminimalkan bencana dengan membangun berbagai prasarana fisik menggunakan teknologi dan rekayasa seperti membuat alat pendeteksi aktivitas gunung berapi, menciptakan early warning sistem untuk cuaca buruk, membuat bangunan tahan bencana sesuai dengan prosedur gempa, dan membuat bangunan penahan tanah dari longsor sehingga mampu bertahan dan tidak membahayakan para penghuninya jika bencana terjadi sewaktu-waktu. Mitigasi non struktural merupakan suatu upaya dalam mengurangi dampak bencana melalui kebijakan dan peraturan, seperti Undang-Undang Penanggulangan Bencana, pembuatan tata ruang kota, atau aktivitas lain yang berguna bagi penguatan kapasitas warga, penyusunan rencana evakuasi, peningkatan kesadaran dan kesiapsiagaan masyarakat, serta penguatan koordinasi antara berbagai pemangku kepentingan dalam menghadapi bencana.

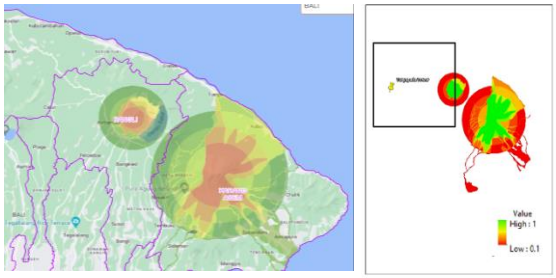
3. PEMBAHASAN DAN DISKUSI

3.1 Identifikasi Risiko Bencana Kawasan Tower Turyapada

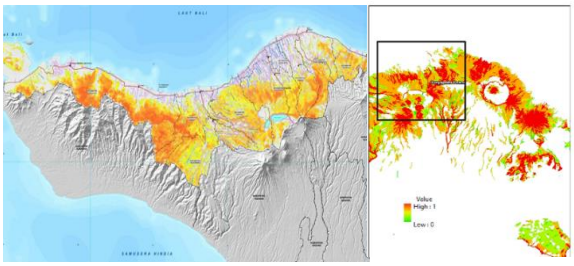
Identifikasi risiko bencana dibagi ke dalam beberapa bahaya yang mungkin terjadi di kawasan Tower Turyapada yang diidentifikasi dengan skor tingkat bahaya. Gambar 2 menunjukkan identifikasi bahaya potensi bencana yang dapat terjadi di wilayah Kawasan Turyapada tower. Berdasarkan analisis lokasi dan elevasi wilayah infrastruktur tower, bencana banjir bandang tidak di masukkan kedalam kajian karena lokasi Tower Turyapada terletak di elevasi yang cukup tinggi sehingga sedikit kemungkinan untuk mengalami banjir.



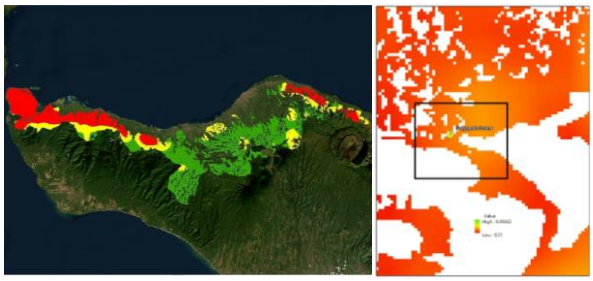
Identifikasi Bahaya Gempa Bumi



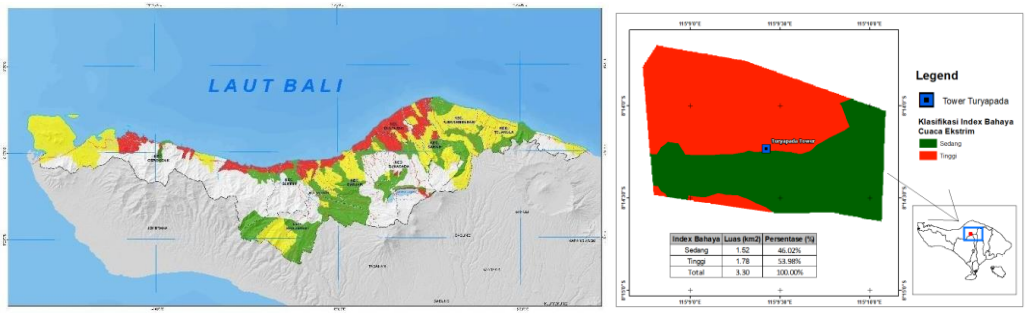
Identifikasi Bahaya Letusan Gunung Api



Identifikasi BahayaTanah Longsor



Identifikasi Bahaya Kebakaran Hutan dan Lahan



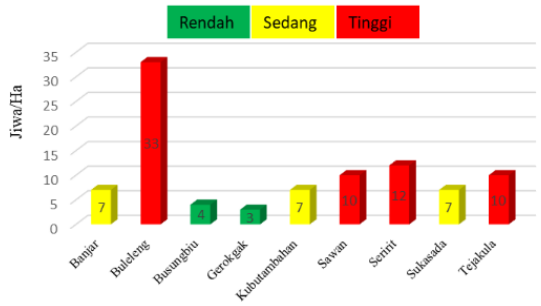
Identifikasi Bahaya Cuaca Ekstrim

Gambar 2. Identifikasi Risiko Bahaya di Kawasan Tower Turyapada (sumber: *https://inarisk.bnpb.go.id*)

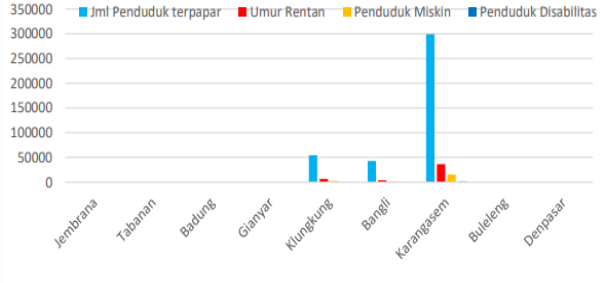
Berdasarkan hasil identifikasi risiko bahaya yang diambil dari website *inarisk*, kemudian dipetakan skor untuk mendapatkan nilai indeks bahaya pada masing-masing jenis bencana. Titik lokasi risiko diambil sesuai dengan titik lokasi pembangunan kawasan Turyapada Tower yang terletak di wilayah kecamatan Sukasada. Dari hasil kajian masing-masing bahaya, maka teridentifikasi untuk bahaya gempa bumi sebesar 0,28; bahaya letusan gunung api 0,2; bahaya tanah longsor 0,75; bahaya kebakaran hutan dan lahan 0,19; bahaya cuaca ekstrim sebesar 0,5.

3.2 Analisis Kerentanan Bencana Kawasan Tower Turyapada

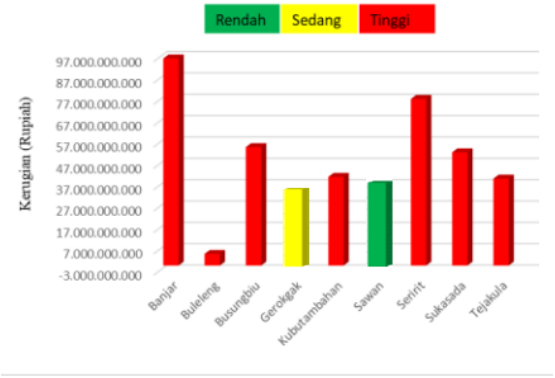
Analisis kerentanan bencana di kawasan Tower Turyapada diambil berdasarkan hasil dokumen Kajian Risiko Bencana (KRB) yang dikeluarkan oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Buleleng. Kajian kerentanan terlihat pada gambar 3 dibawah. Analisis kerentanan difokuskan kepada jumlah penduduk terpapar untuk bencana gempa bumi dan letusan gunung api. Hal ini karena kedua bencana tersebut merupakan bencana yang langsung berdampak dengan sedangkan untuk bencana tanah longsor dianggap sebagai kerugian dalam hitungan rupiah. Terkait kebakaran hutan, kerentanan dapat diidentifikasi dengan luasan area yang memiliki kerentanan terbakar di wilayah tersebut. Untuk cuaca ekstrim dianggap kerugian karena nantinya kawasan ini akan dijadikan objek wisata sehingga kondisi cuaca sangat memengaruhi pengunjung. Lokasi Kawasan Turypada di kecamatan Sukasada sehingga dilihat kerentanan di area tersebut. Didapatkan untuk gempa bumi indeks kerentanan sebesar 0,67; tanah longsor sebesar 0,67; letusan gunung api sebesar 0,3 ; kebakaran hutan dan lahan sebesar 0,34 ; dan cuaca ekstrim sebesar 0,67.



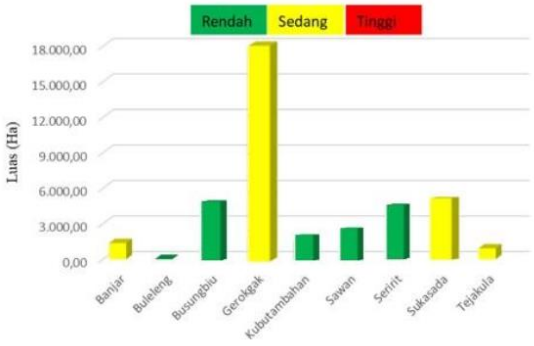
Kerentanan Gempa Bumi



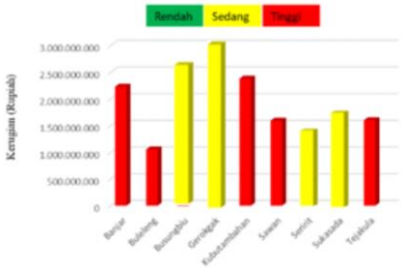
Kerentanan Letusan Gunung Api



Kerentanan Tanah Longsor



Kerentanan Kebakaran Hutan dan Lahan



Kerentanan Cuaca Ekstrim

Gambar 3. Identifikasi Kerentanan di Kawasan Tower Turyapada (sumber: Dokumen RPB Kab. Buleleng)

3.4 Analisis Tingkat Risiko Bencana Kawasan Tower Turyapada

Setelah mendapatkan nilai indeks bahaya dan kerentanan maka di evaluasi terkait dengan kapasitas Tower Turypada. Berdasarkan dokumen *feasibility study* perencana, pembangunan konstruksi Turyapada sudah memenuhi bahkan melebihi standar perencanaan untuk beban *ultimate* sehingga dapat diasumsukan indeks kapasitas untuk struktur Tower Turyapada diasumsikan mendapatkan nilai 0,7.

Setelah didapatkan nilai indeks bahaya, kerentanan, dan kapasitas maka dihitung tingkat risiko sesuai dengan persamaan (1) sehingga didapatkan nilai indeks risiko. Indeks risiko kemudian dibagi menjadi 3 level yaitu rendah, sedang, dan tinggi dengan nilai dibawah 0,33 adalah rendah, 0,34 – 0,66 adalah sedang, dan diatas 0,67 adalah tinggi. Masing-masing jenis bencana dihitung indeks risiko sehingga didapatkan level risiko seperti terlihat pada tabel 1 berikut yang merupakan ringkasan dari lima (5) jenis bencana di kawasan infrastruktur Tower Turyapada

Tabel 1. Ringkasan indeks bahaya, kerentanan, kapasitas dan risiko untuk berbagai jenis bencana

Jenis Bencana	Indeks Bahaya	Indeks Kerentanan	Indeks Kapasitas	Indeks Risiko	Level
Gempa Bumi	0,28	0,67	0,7	0,27	Rendah
Tanah Longsor	0,75	0,67	0,7	0,72	Tinggi

Letusan Gunung Api	0,20	0,3	0,5	0,12	Rendah
Kebakaran Hutan dan Lahan	0,19	0,34	0,7	0,09	Rendah
Cuaca Ekstrim	0,50	0,67	0,7	0,48	Sedang

3.5 Strategi Mitigasi Struktural & Non-Struktural Kawasan Tower Turyapada

Berdasarkan tabel 1 diatas, maka tingkat risiko yang cukup tinggi adalah bencana gempa bumi dan cuaca ekstrim. Oleh karena itu, mitigasi struktural yang dibuat di kawasan Turyapada Tower yaitu dengan membuat dinding penahan tanah dan perkuatan lereng untuk mencegah terjadinya tanah longsor serta memasang alat pendeteksi cuaca otomatis (*Automatic Weather Station*) untuk merekam data meteorologi secara real time dalam mengukur suhu, tekanan, curah hujan, dan angin seperti yang ditunjukkan gambar dibawah. Mitigasi struktural tanah longsor telah dibangun di kawasan Turyapada seperti terlihat pada gambar 4. Mitigasi ini diharapkan dapat meningkatkan kapasitas infrastruktur untuk menghadapi bencana.



Gambar 4. Mitigasi Struktural Tanah Longsor dan Cuaca Ekstrim

Mitigasi non-struktural yang dilakukan yaitu dengan melakukan pengembangan wisatawan sadar bencana dengan menanamkan perilaku wisatawan sadar bencana pada wisatawan, mengembangkannya melalui penguatan norma-norma sosial, mensosialisasikan dan mempromosikan konsep ini hingga menjadi hal yang membantu upaya mitigasi dan meningkatkan kesiapsiagaan dalam menghadapi bencana. Beberapa pengemabangan dan sosialisasinya antara lain

a. Pelaku/ pengelola tempat wisata mempromosikan wisatawan sadar bencana melalui brosur, poster, dan segala media informasi yang ditampilkan di Kawasan wisata.
b. Pengelola tempat wisata dan pemerintah bersama-sama mempersiapkan dan menyediakan fasilitas sarana prasarana guna mendukung wisatawan sadar bencana.
c. Peta mitigasi yang terintegrasi dalam peta Kawasan wisata yang dapat diakses atau diberikan langsung kepada pengunjung
d. Memberikan rambu-rambu peringatan, *call centre*, dan arah mitigasi bencana baik di dalam maupun di luar ruangan
e. Melakukan simulasi mitigasi bencana untuk kemudian disosialisasikan kepada wisatawan

Selain itu untuk mengakomodir jenis bencana Tabel 2 menunjukkan rangkuman strategi mitigasi struktural dan non-struktural yang dibuat di area Kawasan Tower Turyapada terhadap berbagai jenis bencana.

Tabel 2. Strategi mitigasi struktural dan non-struktural di kawasan tower Turyapada

Jenis Bencana	Mitigasi Struktural	Mitigasi Non-Struktural
Gempa Bumi	Perencanaan struktur beban spektrum gempa sesuai SNI yang berlaku (SNI 1726:2019 & SNI 8899:2020)	Membuat titik area kumpul dan jalur evakuasi
Tanah Longsor	Pembuatan struktur dinding penahan tanah di area yang lawan	Penyebaran informasi titik rawan longsor

Letusan Gunung Api	Pemasangan filter pada external intake sistem Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC)	Penutupan area kawasan tower sementara apabila abu vulkanik mencapai area
Kebakaran Hutan dan Lahan	Menggunakan kasa kawat yang tidak mudah terbakar pada ventilasi dengan bukaan ¼ inci atau 1/8 inci	Pembagian masker bagi para pengunjung
Cuaca Ekstrim	tower turyapada telah didesain dengan beban angin diatas standar yaitu 50 m/s dan beban angin serta hujan sesuai SNI 1727:2020	Membuat sistem peringatan dini dan informasi kondisi cuaca di dalam kawasan Tower

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis identifikasi bahaya, kerentanan, dan kapasitas, kawasan tower Turyapada memiliki indeks risiko bencana terbesar yaitu tanah longsor dengan besar indeks 0,72 dengan level tinggi serta cuaca ekstrim dengan besar indeks 0,48 dengan level sedang. Oleh karena itu disimpulkan bahwa mitigasi struktural yang tepat untuk mengatasi tanah longsor yaitu dengan membuat dinding penahan tanah di titik-titik lokasi rawan longsor di area kawasan Turyapada dan pemasangan alat pendeteksi cuaca otomatis untuk memitigasi cuaca ekstrim. Mitigasi non-struktural diperlukan untuk meningkatkan kapasitas pengunjung/wisatawan sadar bencana sehingga dapat mengurangi risiko yang signifikan saat terjadi bencana.

DAFTAR PUSTAKA

Arditya, I. M. C. ., & Utama, M. S. (2023). Determinan Kualitas SDM dan Disparitas Distribusi Pendapatan di Kabupaten/Kota Provinsi Bali. Ganaya : Jurnal Ilmu Sosial Dan Humaniora, 6(2), 454–468. https://doi.org/10.37329/ganaya.v6i2.2476

Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2021). Indeks risiko bencana Indonesia (IRBI) tahun 2020. Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 78.

Pemerintah Kabupaten Buleleng. (2023). “Dokumen Rencana Penanggulangan Bencana (RPB) Kabupaten Buleleng Tahun 2023-2027”.

Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation (PVMBG). (2019). “Volcanic Hazard Map of Bali”. Bandung: PVMBG.

Gunawan, H., & Sari, R. (2018). Analisis Kerentanan Bangunan terhadap Gempa Bumi di Bali. Jurnal Teknik Sipil, 15(2), 89-102.

Indonesian Meteorological, Climatological, and Geophysical Agency (BMKG). (2020). “Seismic Activity Report of Indonesia 2020”. Jakarta: BMKG.

Irsyad, M. (2019). “Kajian Risiko Bencana dalam Pembangunan Infrastruktur. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember”

Novianti, I. D. (2022). “Bencana Alam dan Mitigasi Bencana Alam”. Jakad Media Publishing

Sugiyono. (2018). “Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D”. Bandung: Alfabeta

Suyadnya, I Wayan (2021) "Tourism Gentrification in Bali, Indonesia: A Wake-up Call for Overtourism," Masyarakat: Jurnal Sosiologi: Vol. 26: No. 2, Article 3. DOI: 10.7454/MJS.v26i2.12930

Purwahita, A. R. M., Wardhana, P. B. W., Ardiasa, I. K., & Winia, I. M. (2021). Dampak Covid-19 terhadap Pariwisata Bali Ditinjau dari Sektor Sosial, Ekonomi, dan Lingkungan (Sebuah Tinjauan Pustaka). Jurnal Kajian Dan Terapan Pariwisata, 1(2), 68-80.

MANAJEMEN WASTE KONSTRUKSI: PENGGUNAAN RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT DALAM PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN

Elizar

[1*2]*Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Riau, Jl. Kaharuddin Nasution No. 13, Pekanbaru*
***e-mail**: elizar@eng.uir.ac.id*

ABSTRAK

Manajemen waste konstruksi merupakan tantangan signifikan dalam upaya mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Salah satu solusi yang muncul adalah penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), yang memungkinkan daur ulang material aspal dari proyek jalan yang telah lama. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan RAP dalam mengurangi waste konstruksi sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Metode penelitian yang digunakan melibatkan eksperimen laboratorium di mana RAP diuji dalam berbagai campuran aspal baru untuk menilai karakteristik mekaniknya. Campuran aspal dengan berbagai proporsi RAP diuji untuk menentukan kekuatan, daya tahan, dan stabilitas sesuai dengan standar nasional. Selain itu, penelitian ini juga melakukan analisis perbandingan antara kinerja campuran RAP dengan campuran aspal konvensional. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa campuran aspal dengan kandungan RAP hingga 30% memiliki kinerja yang setara, bahkan lebih baik dalam beberapa parameter dibandingkan dengan aspal konvensional. Penggunaan RAP terbukti mampu mengurangi kebutuhan material baru hingga 30%, sehingga mengurangi dampak lingkungan dari eksploitasi sumber daya alam. Penelitian ini menyimpulkan bahwa RAP merupakan solusi yang efektif untuk manajemen limbah konstruksi dan mendukung pembangunan berkelanjutan di Indonesia. Karakteristik Marshal yaitu VIM, VMA, VFA, Stabilitas, flow dan Marshall Quotient (MQ) memenuhi semua kriteria spesifikasi. Rekomendasi kebijakan termasuk peningkatan penggunaan RAP dalam proyek infrastruktur dan pengembangan teknologi yang lebih canggih untuk meningkatkan kualitas campuran RAP di masa depan.

Kata kunci: Manajemen, Waste, Konstruksi, RAP, Marshall

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur yang sangat pesat, sejalan dengan target Indonesia Emas 2045, telah meningkatkan produksi waste konstruksi secara signifikan. Waste yang terdiri dari material seperti beton, kayu, dan aspal, sering kali berakhir di tempat pembuangan akhir atau dibiarkan mencemari lingkungan. Dampak negatif dari waste konstruksi ini tidak hanya merusak ekosistem, tetapi juga menambah beban pada tempat pembuangan yang sudah over kapasitas dan mempercepat habisnya sumber daya alam yang digunakan untuk produksi material baru (Vol et al., 2000).

Salah satu material limbah yang dominan dalam proyek infrastruktur adalah aspal dari jalan-jalan yang sudah lama. Setiap tahun, ribuan ton aspal digali dan digantikan dengan material baru, menciptakan jumlah limbah yang besar dan menimbulkan tantangan lingkungan yang serius. Teknologi daur ulang aspal atau asphalt recycling adalah salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi masalah lingkungan dalam bidang transportasi (Mosawe et al., 2023). Dalam konteks ini, Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) muncul sebagai alternatif solusi yang memungkinkan daur ulang material aspal lama untuk digunakan kembali dalam proyek infrastruktur baru (Meilani & Kurnia, 2019). Aspal RAP telah mengalami penuaan secara signifikan pada saat diproduksi, pada saat memberikan pelayanan, dan akibat pengaruh lingkungan saat menjadi lapisan atau struktur perkerasan. Penggunaan material RAP merupakan suatu green technology dalam konstruksi jalan, dengan cara memanfaatkan limbah jalan. Selain itu, penggunaan RAP menghemat material aspal dan agregat yang digunakan dalam konstruksi jalan(Pasayu et al., 2023).

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) adalah material yang diperoleh dari aspal jalan raya yang telah lama dan kemudian didaur ulang untuk digunakan dalam pembuatan jalan baru. Penggunaan RAP bukan hanya mengurangi jumlah waste konstruksi, tetapi juga mengurangi kebutuhan akan material aspal baru, yang pada waktu tertentu mengurangi eksploitasi sumber daya alam dan emisi karbon dari proses produksi aspal baru (Farooq et al., 2018). Dengan demikian, RAP menawarkan solusi ganda: pengurangan waste dan pengurangan dampak lingkungan dari proyek infrastruktur. Studi terbaru menyoroti keserbagunaan RAP, menunjukkan integrasi efektifnya dengan berbagai bahan, seperti minyak limbah dan aspal campuran hangat, untuk meningkatkan karakteristik kinerja seperti kekakuan dan ketahanan lelah (Kumar & Aggarwal, 2023). Temuan eksperimental menunjukkan bahwa penggunaan RAP yang optimal dapat meningkatkan stabilitas suhu tinggi sambil berpotensi membahayakan kinerja suhu rendah dan stabilitas air, tergantung pada kandungan RAP dan kondisi pemanasan awal (Xiao et al., 2023). Selain itu, dimasukkannya RAP dalam campuran aspal hangat telah terbukti meningkatkan kekuatan ikatan dan stabilitas

keseluruhan, terutama pada rasio penggantian spesifik (Toth et al., 2023). Dengan demikian, penggunaan strategis RAP dalam campuran aspal baru mendukung praktik konstruksi berkelanjutan sambil mempertahankan standar kinerja jalan

Metode penelitian ini dengan cara eksperimen yaitu menguji berbagai proporsi RAP dalam campuran aspal baru untuk menilai karakteristik mekanisnya, seperti kekuatan, stabilitas, dan daya tahan. Dengan demikian, penelitian ini akan memberikan data empiris yang diperlukan untuk mendukung adopsi RAP dalam proyek-proyek infrastruktur di Indonesia.

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan di Indonesia, dengan menunjukkan bahwa penggunaan RAP tidak hanya merupakan solusi untuk manajemen waste konstruksi, tetapi juga langkah penting menuju pembangunan infrastruktur yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan adopsi RAP yang lebih luas, Indonesia dapat bergerak lebih dekat menuju visinya sebagai negara maju pada tahun 2045, dengan infrastruktur yang dibangun secara berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Daur ulang perkerasan yaitu pemakaian ulang dari scarified permukaan jalan atau lapisan jalan yang kasar dengan cara me- rotavating-nya sampai kedalaman 20 cm (8 inci) dan mencampurnya dengan bahan pengikat bitumen yang panas atau dingin, sering kali akan seperti semen (Meilani & Kurnia, 2019). Reclamed Asphalt Pavement (RAP) adalah sumber daya berharga dalam konstruksi jalan raya, yang berasal dari penggilingan atau penggalian permukaan aspal yang terdegradasi(Hariz Akrom et al., 2020). Daur ulang RAP tidak hanya mengurangi masalah lingkungan yang terkait dengan pembuangan TPA tetapi juga menghemat sumber daya alam dan mengurangi biaya konstruksi (Rif'an & Sunarjono, 2016). Secara teknis, RAP terdiri dari agregat (seperti kerikil, pasir, dan filler) yang telah tercampur dengan aspal sebagai bahan pengikat. Material ini masih memiliki karakteristik yang cukup baik untuk digunakan kembali, asalkan diolah dengan benar. Ketika dicampur dengan aspal baru, RAP dapat meningkatkan kinerja campuran aspal melalui peningkatan kekuatan, stabilitas, dan daya tahan terhadap deformasi (Afdal et al., 2019).

Karakteristik Marshal

Marshall Test adalah metode pengujian laboratorium yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas dan kinerja campuran aspal dalam konstruksi perkerasan jalan (Hasriana et al., 2020). Pengujian ini dikembangkan pada tahun 1939 oleh Bruce Marshall dari Mississippi Highway Department dan kemudian diadopsi serta dimodifikasi oleh U.S. Army Corps of Engineers untuk digunakan dalam proyek-proyek perkerasan jalan (Twidi et al., 2018). Marshall Test menjadi salah satu metode paling umum yang digunakan untuk mengukur stabilitas dan aliran campuran aspal, yang keduanya merupakan indikator penting dari daya tahan dan performa perkerasan di bawah beban lalu lintas(Farooq et al., 2018). Campuran yang di gunakan pada pengujian Marshall harus memenuhi beberapa persyaratan dalam pengujiannya. Persyaratan campuran untuk laston dapat dilihat pada 1.

Tabel 1. Spesifikasi Campuran Laston (AC) (Bina Marga, 2018)

Karakteristik	***Spesifikasi***	***Satuan***
Void in Mix (VIM)	3,0 – 5,0	%
Void Material Aggregate (VMA)	Min 15	%
Void in Fill Aggregate (VFA)	Min 65	%
Stabilitas	Min 800	kg
Pelelehan (Flow)	Min 2	mm
Marshall Quotient (MQ)	250	kg/mm

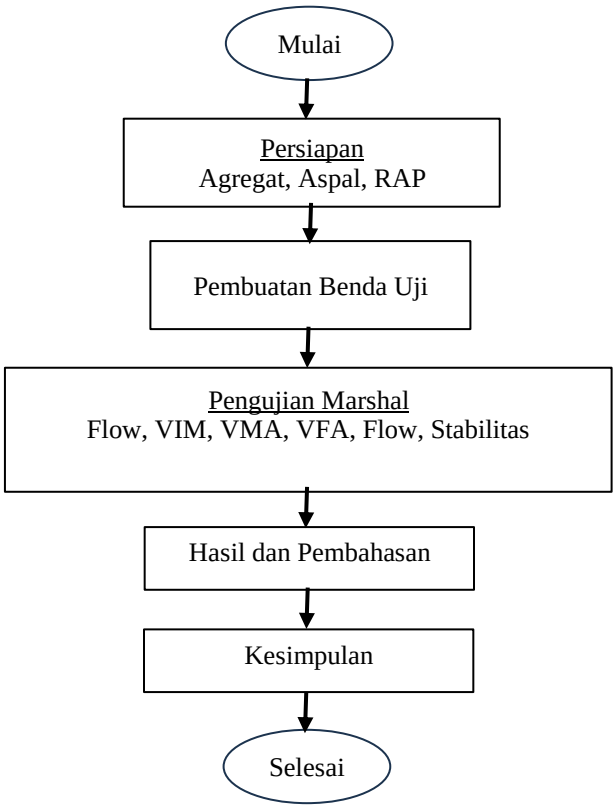
Hasil dari Marshall Test memberikan data penting yang digunakan untuk mengoptimalkan desain campuran aspal, memastikan bahwa perkerasan jalan yang dihasilkan dapat bertahan lama dan berkinerja baik di bawah berbagai kondisi lalu lintas dan lingkungan(Fakhri & Amoosoltani, 2017). Dengan memberikan data yang akurat tentang stabilitas, aliran, dan karakteristik fisik lainnya dari campuran aspal, Marshall Test membantu dalam memilih dan merancang campuran yang optimal untuk kondisi lalu lintas dan lingkungan yang spesifik (Vol et al., 2000).

Marshall Test merupakan alat penting dalam desain dan pengendalian kualitas campuran aspal untuk perkerasan jalan. Dengan memberikan data yang akurat tentang stabilitas, aliran, dan karakteristik fisik lainnya dari campuran aspal, Marshall Test membantu insinyur dan pembuat keputusan dalam memilih dan merancang campuran yang optimal untuk kondisi lalu lintas dan lingkungan yang spesifik. Penggunaan Marshall Test memastikan bahwa perkerasan jalan yang dihasilkan tidak hanya memenuhi standar teknis tetapi juga dapat bertahan lama dan memberikan kinerja yang andal selama masa pakainya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi kinerja teknis Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dalam campuran aspal baru. Eksperimen ini bertujuan untuk menilai karakteristik Marshal dari berbagai proporsi RAP, sehingga dapat ditentukan proporsi optimal yang dapat digunakan dalam proyek infrastruktur tanpa mengorbankan kualitas dan daya tahan aspal. Penggunaan metode eksperimen memungkinkan untuk mendapatkan data empiris yang dapat diandalkan dalam menilai potensi RAP sebagai solusi untuk manajemen waste konstruksi.

Penelitian ini dilaksanakan dengan melalui beberapa tahap, yaitu mulai dari literatur, persiapan bahan, pemeriksaan bahan/material yang berupa agregat, aspal dan RAP, pembuatan benda uji, pengujian dengan alat Marshall serta analisis hitungan nilai struktural. Bagan alir penelitian seperti Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

Sampel RAP diperoleh dari proyek jalan raya yang telah selesai dilakukan penggantian aspal di beberapa lokasi di Indonesia. Setelah itu, sampel ini dibawa ke laboratorium untuk diuji dan diproses lebih lanjut. Proses awal melibatkan pemurnian dan pengolahan RAP untuk memastikan bahwa material yang digunakan dalam eksperimen bebas dari kontaminan yang dapat mempengaruhi hasil uji. RAP kemudian dicampur dengan material aspal baru 100% dan 70% untuk menghasilkan campuran aspal yang akan diuji.

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) adalah material aspal yang diambil dari lapisan permukaan jalan raya yang sudah usang dan kemudian didaur ulang untuk digunakan kembali dalam proyek konstruksi baru.Pembongkaran aspal lama seperti Gambar 2.





(a) (b)

Gambar 2. Bongkaran Aspal Lama

Gambar 2 menunjukkan bongkaran aspal lama, proses ini selanjutnya dilakukan penggilingan atau penggalian lapisan aspal yang telah mengalami degradasi, kemudian material tersebut diolah kembali sehingga dapat dicampur dengan aspal baru untuk membuat lapisan jalan yang baru.

RAP menjadi semakin populer dalam industri konstruksi karena mampu mengurangi kebutuhan material baru dan menawarkan potensi penghematan biaya yang signifikan. Selain itu, penggunaan RAP juga sejalan dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan, karena membantu mengurangi limbah konstruksi dan emisi karbon dari proses produksi aspal baru.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah menjadi solusi yang semakin populer untuk mengatasi tantangan dalam manajemen limbah konstruksi. Dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur dan rehabilitasi jalan, volume aspal yang dihasilkan dari proyek perbaikan jalan semakin tinggi. RAP menawarkan pendekatan yang berkelanjutan dengan mendaur ulang material yang sudah ada, sehingga mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, penggunaan RAP membantu mengurangi dampak lingkungan dengan menurunkan konsumsi energi, emisi karbon, dan waste konstruksi.

RAP terdiri dari agregat dan aspal yang telah digunakan sebelumnya dalam konstruksi jalan. Kualitas dan karakteristik RAP dapat bervariasi tergantung pada umur jalan yang diperbaiki, metode penggilingan, dan jenis aspal yang digunakan. Karakteristik fisik seperti ukuran partikel, kelekatan aspal, dan stabilitas termal memainkan peran penting dalam menentukan kinerja RAP ketika digunakan kembali dalam campuran aspal baru. Analisis laboratorium terhadap sampel RAP sangat penting untuk memastikan bahwa material ini masih layak digunakan dan dapat memenuhi standar kualitas yang diperlukan.

Karakteristik Marshall, yang meliputi stabilitas, aliran (flow), kerapatan (density), dan rongga udara (air voids), merupakan indikator utama dalam menilai kualitas dan kinerja campuran aspal. Stabilitas Marshall mengukur kemampuan campuran untuk menahan beban maksimum sebelum mengalami deformasi, sementara aliran mengukur besarnya deformasi yang terjadi pada saat beban maksimum diterapkan. Kerapatan dan rongga udara memberikan gambaran tentang tingkat pemadatan campuran dan kemampuannya untuk menahan infiltrasi air serta perubahan suhu. Dalam konteks penggunaan RAP, karakteristik-karakteristik ini menjadi semakin penting karena RAP memiliki sifat-sifat yang berbeda dari material aspal baru.

Dari hasil pengujian laboratorium campuran AC – BC dengan campuran full fresh aggregate dan dengan campuran +30% RAP, didapatkan perhitungan dan analisa karakteristik marshall. Adapun nilai – nilai yang diperoleh dari hasil pengujian marshall adalah, Stabilitas (Stability), Pelelehan (Flow), Rongga dalam Agregat (VMA), Rongga dalam Campuran, Rongga Terisi Aspal (VFB), dan Marshall Quotient (MQ). Hasil karakteristik Marshal seperti Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Marshal

Karakteristik	*RAP (0%)*	*RAP (30%)*	*Spesifikasi*	*Satuan*	*Keterangan*
Void in Mix (VIM)	4,10	4,30	3,0 – 5,0	%	memenuhi
Void Material Aggregate (VMA)	16,20	14,50	Min 14	%	memenuhi
Void in Fill Aggregate (VFA)	83	86	Min 65	%	memenuhi
Stabilitas	1800	2080	Min 800	kg	memenuhi
Pelelehan (Flow)	3,8	3,8	Min 2	mm	memenuhi
Marshall Quotient (MQ)	440	535	250	kg/mm	memenuhi

Tabel 2 menunjukkan semua variasi campuran pada penelitian ini memenuhi syarat yang ditentukan dalam Spesifikasi Teknis 2018 Revisi 2. Dapat dikatakan bahwa campuran dengan pemanfaatan 30% RAP dapat digunakan sebagai lapis antara (AC – BC). Penggunaan RAP dalam campuran aspal dapat meningkatkan stabilitas Marshall, terutama pada proporsi rendah hingga sedang. Ini terjadi karena RAP biasanya mengandung agregat yang sudah dipadatkan dan aspal yang telah mengalami proses penuaan, yang keduanya cenderung memiliki sifat yang lebih keras dan kaku. Akibatnya, campuran yang mengandung RAP cenderung lebih stabil dan mampu menahan beban lalu lintas lebih baik dibandingkan campuran aspal konvensional. Namun, pada proporsi RAP yang terlalu tinggi, stabilitas mungkin mulai menurun jika campuran tidak terikat dengan baik atau jika agregat dalam RAP tidak cukup homogen.

Kerapatan dan rongga udara dalam campuran aspal sangat dipengaruhi oleh penggunaan RAP. Karena RAP terdiri dari material yang telah dipadatkan sebelumnya, campuran aspal dengan RAP seringkali memiliki kerapatan yang lebih tinggi. Namun, jika proses pencampuran dan pemadatan tidak dilakukan dengan benar, campuran tersebut bisa saja memiliki rongga udara yang lebih besar, yang dapat mengurangi daya tahan dan ketahanan campuran terhadap infiltrasi air dan siklus pembekuan-pencairan. Pengendalian kualitas yang ketat diperlukan untuk memastikan bahwa campuran RAP memenuhi standar kerapatan dan rongga udara yang optimal.

Salah satu aspek kunci dalam penggunaan RAP adalah menentukan proporsi optimal dalam campuran aspal baru. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam jumlah tertentu dapat meningkatkan stabilitas dan kekuatan campuran, namun ada batasan terhadap berapa banyak RAP yang dapat ditambahkan tanpa mengorbankan kualitas. Studi eksperimental biasanya menguji berbagai proporsi RAP, mulai dari 10% hingga 50%, untuk mengevaluasi bagaimana perubahan dalam komposisi mempengaruhi karakteristik stabilitas Marshall. Hasil penelitian terdahulu dengan penggunaan RAP yang optimum seperti pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Penelitian Terdahulu Penggunaan RAP Optimum

Penelitian Terdahulu	***RAP (%)***	***Spesifikasi***
Mosawe (2023)	30	Iraq
Toth, et al (2023)	20	Hungary
Masri, et al (2023)	20	Indonesia
Xiao, et al (2023)	30	China
Tarsi, et al (2020)	30	Bologna
Harsiana, et al (2020)	30	Indonesia
Meilani dan Kurnia (2019)	20	Indonesia
Bethary, et al (2018)	20 – 25	Indonesia
Farooq, et al (2018)	20	India
Fakhri and Amoosoltani (2017)	50	Iran

Tabel 2 dapat dilihat penelitian terdahulu dari berbagai negara telah melakukan penelitian dengan menggunakan RAP. Hasil menunjukkan bahwa pemakaian RAP rata-rata antara 20% hingga 50% yang mengidentifikasikan campuran memberikan stabilitas yang sangat baik dan aliran yang memadai, serta potensi untuk penggunaan yang lebih luas dalam proyek perkerasan jalan. Penelitian terdahulu mengenai Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah memberikan landasan penting dalam memahami potensi penggunaan material daur ulang ini dalam konstruksi perkerasan jalan. Studi-studi sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek dari penggunaan RAP, termasuk stabilitas mekanis karaktersitik Marshal. Banyak dari penelitian ini menekankan bahwa RAP, ketika digunakan dengan benar, dapat menggantikan sebagian bahan baku baru dalam campuran aspal tanpa mengorbankan kualitas atau kinerja. Penelitian-penelitian ini memberikan bukti awal yang mendukung adopsi RAP sebagai bagian dari strategi pembangunan berkelanjutan.

Dari perspektif lingkungan, penelitian sebelumnya secara konsisten menunjukkan bahwa penggunaan RAP dapat mengurangi jejak karbon proyek konstruksi jalan. Penelitian oleh Xiao, et al (2023) mengindikasikan bahwa penggunaan RAP dapat mengurangi kebutuhan energi dan emisi yang terkait dengan produksi aspal baru dan ekstraksi agregat. Selain itu, dengan mengurangi jumlah limbah konstruksi yang dikirim ke tempat pembuangan akhir, RAP membantu mengurangi dampak lingkungan secara keseluruhan. Penelitian ini mendukung argumen bahwa RAP bukan hanya pilihan yang ekonomis, tetapi juga solusi yang lebih ramah lingkungan.

Hubungan antara karakteristik Marshall dan penggunaan RAP memiliki implikasi penting bagi desain dan konstruksi jalan. Dengan memahami bagaimana RAP mempengaruhi stabilitas, aliran, kerapatan, dan rongga udara, dapat membuat keputusan yang lebih informasi tentang bagaimana dan kapan menggunakan RAP dalam proyek-proyek perkerasan. Hal ini tidak hanya meningkatkan kualitas dan daya tahan jalan, tetapi juga berkontribusi pada upaya keberlanjutan dengan mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru dan meminimalkan waste konstruksi. Dalam jangka panjang, penggunaan RAP yang dioptimalkan berdasarkan hasil pengujian Marshall dapat membantu mencapai tujuan pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan dan efisien.

Meskipun banyak penelitian terdahulu menunjukkan potensi besar RAP, ada juga keterbatasan yang perlu diatasi. Salah satu tantangan utama yang diidentifikasi adalah variabilitas dalam kualitas RAP, yang dapat mempengaruhi konsistensi hasil campuran aspal. Selain itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan proporsi RAP dan mengembangkan teknologi yang lebih baik untuk pengolahan dan pencampuran RAP. Dengan mengatasi tantangan ini, penelitian masa depan dapat membuka peluang baru untuk memperluas penggunaan RAP dalam berbagai aplikasi infrastruktur, membantu mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan yang lebih luas.

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) telah menjadi solusi yang semakin populer untuk mengatasi tantangan dalam manajemen limbah konstruksi. Dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur dan rehabilitasi jalan, volume aspal yang dihasilkan dari proyek perbaikan jalan semakin tinggi. RAP menawarkan pendekatan yang berkelanjutan dengan

mendaur ulang material yang sudah ada, sehingga mengurangi kebutuhan akan bahan baku baru. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, penggunaan RAP membantu mengurangi dampak lingkungan dengan menurunkan konsumsi energi, emisi karbon, dan limbah konstruksi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan diperoleh bahwa penggunaan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) dalam campuran aspal terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas dan kekuatan campuran, terutama pada proporsi yang lebih rendah (10-20%). Hasil pengujian menunjukkan bahwa RAP dapat digunakan sebagai bahan daur ulang yang memenuhi atau bahkan melampaui performa campuran aspal konvensional, memberikan solusi yang berkelanjutan dalam manajemen limbah konstruksi. Meskipun RAP menawarkan banyak manfaat, tantangan dalam hal variabilitas kualitas material, pengujian yang baik dan kesesuaian produksi dengan standart tetap ada. Selain itu, untuk memaksimalkan penggunaan RAP, diperlukan optimasi yang cermat dalam formulasi campuran dan penanganan material, serta dukungan regulasi dan kebijakan yang kuat untuk memastikan penerapan yang luas dan berkualitas. RAP berkontribusi signifikan terhadap pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi kebutuhan bahan baku baru, menurunkan emisi karbon, dan mengurangi volume limbah konstruksi. Penggunaan RAP tidak hanya mendukung inisiatif lingkungan, tetapi juga menawarkan manfaat ekonomi dengan mengurangi biaya material dan pengelolaan limbah, menjadikan komponen penting dalam strategi pembangunan infrastruktur menuju Indonesia Emas 2045.

Referensi

Afdal, A., Wibisono, G., & Muhardi, M. (2019). Pengaruh Pemakaian Peremaja Anti Rayap Dan Aspal Pen 60/70 Terhadap Kinerja Rap (Reclaimed Asphalt Pavement) Ac-Wc Gradasi Halus Berdasarkan Uji Marshall. Jurnal Sains Dan Teknologi, 17(1), 1. https://doi.org/10.31258/jst.v17.n1.p1-8

Fakhri, M., & Amoosoltani, E. (2017). The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. Construction and Building Materials, 137, 470–484. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136

Farooq, M. A., Mir, M. S., & Sharma, A. (2018). Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator. Construction and Building Materials, 168, 61–72. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.079

Hariz Akrom, F., Putra, S., & Herianto, D. (2020). Stabilitas Campuran Aspal Berbahan Dasar Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). 8(3), 599–608.

Hasriana, Datu, I. T., & Nabi, A. (2020). Studi Evaluasi Pemanfaatan Limbah Reclaimed Asphalt Pavement (Rap) Dengan Penambahan Pasir Sebagai Bahan Subgrade Jalan. Prosiding 4th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat 2020, 93–96.

Kumar, V., & Aggarwal, P. (2023). Characteristics of Waste Oil-rejuvenated RAP Bitumen: An Experimental Study. Jordan Journal of Civil Engineering, 17(3), 443–456. https://doi.org/10.14525/JJCE.v17i3.07

Meilani, M., & Kurnia, R. (2019). Kajian Parameter Marshall Campuran Hangat Lataston (HRS-WC) Menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP).(Hal. 120-131). RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil, 5(4), 6–33. https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/3397

Pasayu, D., Arliansyah, J., & Kadarsa, E. (2023). Pemanfaatan Recycling Asphalt untuk Lapisan AC-WC dengan Penambahan Material Bottom Ash pada Perkerasan Lentur. Cantilever: Jurnal Penelitian Dan Kajian Bidang Teknik Sipil, 12(1), 29–40. https://doi.org/10.35139/cantilever.v12i1.182

Pavement, R. A., Tensile, I., & Test, S. (2023). 168–153), 7(29. ريودت داعملا داوم مادختسا ريثات ةسا رد.

Rif'an, A., & Sunarjono, S. (2016). Pengembangan Campuran Split Mastic Asphalt menggunakan Bahan Reclaimed Asphalt Pavement dan Ijuk. The 3rd University Research Coloqium, 123–130.

Toth, C., Petho, L., & Rosta, S. (2023). Rheological characterisation of bituminous binder blends for the design of asphalt mixes containing high recycled asphalt content. Acta Technica Jaurinensis, 16(2), 62–74. https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00694

Twidi, R., Program Doktor, B., Sugeng, B., Program Doktor, S., Rahman, H., & Doktor, P. (2018). Campuran Beraspal Menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement Dan Agregat Slag Baja. Agustus, 18(2), 117–126.

Vol, J. S., Penambahan, P., Terhadap, A., & Ambon, K. (2000). MARSHALL PADA MATERIAL RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT. 13(1), 683–689.

Xiao, J., Wang, T., Hong, J., Ruan, C., Zhang, Y., Yuan, D., & Wu, W. (2023). Experimental Study of Permeable Asphalt Mixture Containing Reclaimed Asphalt Pavement. Sustainability

(Switzerland), 15(13). https://doi.org/10.3390/su151310676

MANFAAT PENERAPAN *LEAN CONSTRUCTION* PADA PROYEK KONSTRUKSI: *SYSTEMATIC REVIEW*

Maria Putri Lolomsait [1*] dan Harijanto Setiawan [1]

*[*1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta*
e-mail: 225119187@students.uajy.ac.id
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta
*corresponding author: **e-mail**: harijanto.setiawan@uajy.ac.id*

ABSTRAK

Efisiensi dalam manajemen proyek merupakan salah satu faktor kunci yang mempengaruhi keberhasilan suatu proyek konstruksi, yang mencakup penghematan biaya, optimalisasi sumber daya, dan penyelesaian proyek sesuai dengan waktu yang direncanakan. Dalam menghadapi tantangan industri konstruksi yang semakin kompleks, metode *lean construction* (LC) muncul sebagai metode inovatif yang menawarkan berbagai keunggulan dalam pengelolaan proyek konstruksi, terutama dalam hal pengurangan pemborosan dan peningkatan nilai bagi pelanggan. Meskipun potensi manfaat LC dalam industri konstruksi telah diketahui secara luas, sebagian besar penelitian yang ada saat ini cenderung hanya berfokus pada aspek ekonomi dan optimalisasi, dan mengabaikan aspek-aspek lainnya. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi secara rinci manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi, menggunakan *systematic literature review*. Penelitian ini terdiri atas beberapa tahap, yakni perencanaan tinjauan, pendefinisian kriteria seleksi, pengumpulan data, seleksi data, *quality assessment*, ekstraksi data, dan sintesis data. Pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan basis data Scopus dan Google Scholar. Setelah melalui seluruh tahapan penelitian, diperoleh 14 artikel untuk ditinjau lebih lanjut. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa terdapat 11 manfaat dari penerapan LC pada proyek konstruksi, antara lain pengurangan biaya, efisiensi penggunaan material, penghematan waktu, peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja, peningkatan keandalan perencanaan, manajemen risiko yang lebih baik, peningkatan kualitas dan produktivitas, peningkatan kepuasan pelanggan, peningkatan komunikasi dan transparansi, pengurangan dampak lingkungan, serta pengurangan variabilitas alur kerja. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi pengembangan strategi implementasi *lean construction* yang lebih komprehensif, serta mendorong dilakukannya penelitian lebih lanjut untuk mengatasi hambatan dalam penerapannya di berbagai konteks industri konstruksi.

Kata kunci: *lean construction*, *systematic review*, proyek konstruksi

1. PENDAHULUAN

Manajemen proyek merupakan proses yang mengintegrasikan berbagai metode dan prinsip untuk merencanakan, melaksanakan, memantau dan mengevaluasi perkembangan kegiatan pada suatu proyek. Setiap proyek mempunyai karakteristik tertentu yang membedakannya dengan kegiatan lain, baik dalam hal organisasi, manajemen, pemanfaatan sumber daya, waktu maupun kompleksitasnya. Maka dari itu, penerapan metode manajemen proyek yang tepat sangat penting untuk mencapai efisiensi biaya, sumber daya, dan waktu, serta memungkinkan dilakukannya pengendalian proyek yang lebih baik dan tetap sesuai dengan lingkup yang telah ditetapkan (Arifin, 2020). Seiring dengan berkembangnya teknologi dan dinamika industri, manajemen proyek terus mengalami inovasi. Salah satu metode yang saat ini banyak diterapkan adalah *lean construction* (Widyastuty, 2005). *Lean construction* merupakan adaptasi dari *lean production*, sebuah metode yang dikembangkan oleh Taichi Ohno, insinyur Toyota, untuk mengoptimalkan sistem produksi dengan meminimalkan pemborosan, baik dalam hal waktu, material, maupun sumber daya lainnya, dan meningkatkan nilai yang diberikan kepada pelanggan (Pramata Laurens, 2015; Gaspersz dan Fontana, 2017).

Meskipun *lean construction* telah diakui mampu memberikan berbagai manfaat dalam industri konstruksi, sebagian besar penelitian yang ada hingga saat ini cenderung berfokus pada aspek ekonomi dan optimalisasi, dan sering kali mengabaikan aspek-aspek lainnya. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi secara lebih rinci berbagai manfaat penerapan *lean construction* dalam proyek konstruksi menggunakan pendekatan *systematic literature review*. Dengan pendekatan ini, diharapkan penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai manfaat dari penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi secara keseluruhan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai penerapan *lean construction* di industri konstruksi telah banyak dilakukan di banyak negara dengan pendekatan penelitian yang beragam. Penelitian terkait dengan topik ini menjadi semakin penting karena potensinya dalam meningkatkan efisiensi, kualitas, keberlanjutan, serta keselamatan pada sektor konstruksi, yang pada akhirnya memberikan manfaat besar bagi perusahaan konstruksi, pemilik proyek, dan masyarakat. *Lean construction*,

yang merupakan adaptasi dari pendekatan manajemen produksi Toyota, merupakan sebuah pendekatan yang berfokus pada pengurangan pemborosan dan peningkatan nilai tambah (Maitimu & Pattiapon, 2021).

Studi yang dilakukan oleh Garcés dan Peña (2023) menunjukkan bahwa *lean construction* menawarkan model manajemen proyek yang lebih efektif dibandingkan dengan paradigma konstruksi konvensional. Selain pengoptimalan proses, *lean construction* juga memberikan pendekatan yang lebih holistik terhadap manajemen proyek konstruksi yang mengutamakan efisiensi dan keberlanjutan. Bajjou et al. (2017) dalam studinya menyelidiki hubungan antara penggunaan alat *lean construction* dan konsep keberlanjutan dalam industri konstruksi. Hasil penelitiannya menemukan bahwa alat-alat *lean construction* seperti prefabrikasi, *value stream mapping*, *poka yoke*, manajemen visual, dan konsep 5S sangat mendukung prinsip-prinsip keberlanjutan, termasuk efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, dan dampak lingkungan yang lebih rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa *lean construction* tidak hanya berkontribusi terhadap nilai ekonomi, tetapi juga mengatasi tantangan lingkungan dan sosial.

Lebih lanjut, Carvajal-Arango et al. (2019) dalam penelitiannya menemukan bahwa penerapan *lean construction* memberikan dampak positif pada tiga dimensi keberlanjutan, yaitu ekonomi, sosial, dan lingkungan. Salem et al. (2006) juga menyatakan bahwa manfaat penerapan *lean construction* sangat jelas, di mana proyek menjadi lebih ekonomis dan selesai lebih cepat dari jadwal yang direncanakan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa nilai rata-rata *percentage plan completed (PPC)* mencapai 76%, mengalami peningkatan 20 poin dibandingkan sebelumnya, yang mencerminkan peningkatan efisiensi proyek, yang disertai dengan berkurangnya tingkat kecelakaan kerja dan cedera serius.

Penelitian yang dilakukan oleh Kololu dan Camerling (2017) pada proyek konstruksi Pesona Alam Estate menemukan bahwa penerapan *lean construction* sangat penting untuk meningkatkan efisiensi pekerjaan konstruksi, menurut pandangan kontraktor, pengawas, dan pemasok. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Bajjou dan Chafi (2018) pada industri konstruksi Maroko, yang menunjukkan kesadaran para profesional konstruksi di Maroko mengenai pentingnya *lean construction* dalam mencapai hasil yang lebih baik, terutama dalam aspek non-keuangan, seperti peningkatan kualitas, keselamatan, dan dampak lingkungan.

Berdasarkan tinjauan terhadap beberapa penelitian terdahulu, dapat dilihat bahwa penerapan *lean construction* memberikan berbagai manfaat, tidak hanya dalam hal ekonomi, tetapi juga dalam berbagai aspek lainnya. Maka dari itu, penelitian mengenai manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi penting untuk dilakukan, agar dapat mengeksplorasi manfaat penerapannya pada seluruh aspek yang ada. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang manfaat *lean construction*, industri konstruksi dapat diarahkan menuju operasi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan sukses, serta membawa dampak positif bagi seluruh pemangku kepentingan yang terlibat.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian terkait dengan penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi telah dilakukan di banyak negara dengan pendekatan penelitian yang beragam. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi secara rinci manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi. Oleh karena itu, pendekatan *systematic literature review* (SLR) digunakan untuk mengumpulkan dan merangkum berbagai penelitian yang ada, untuk memberikan pemahaman secara menyeluruh terkait dengan manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi, dengan menggunakan panduan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis* (PRISMA). Adapun tahapan dalam *systematic literature review* ini diuraikan sebagai berikut:

Perencanaan tinjauan

Tahapan pertama yang dilakukan untuk mencapai tujuan dari penelitian ini yaitu melakukan perencanaan tinjauan untuk mendefinisikan ruang lingkup dari topik yang akan diteliti, menggunakan kerangka kerja PICo. Kerangka kerja PICo merupakan singkatan dari *Population* (populasi), *phenomenon of Interest* (fenomena yang menarik), dan *Context* (konteks), yang bertujuan untuk menggambarkan secara rinci kelompok sasaran penelitian (populasi), aspek-aspek yang diteliti (*phenomenon of interest*), dan menetapkan wilayah penelitian (*context*). Adapun uraian dari kerangka kerja PICo yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kerangka PICo

Kriteria	Deskripsi
Population	Proyek konstruksi
Phenomenon of Interest	Penerapan *lean construction*
Context	Proyek konstruksi yang menerapkan *lean construction*

Pendefinisian Kriteria Seleksi

Kriteria seleksi berperan penting dalam peninjauan artikel, di mana kriteria ini digunakan untuk memandu pemilihan awal artikel. Kriteria seleksi dibuat untuk memasukkan dan mengeluarkan artikel. Artikel akan dimasukkan jika

memenuhi kriteria yang telah ditetapkan. Adapun kriteria inklusi dalam penelitian ini antara lain:

1. Artikel diterbitkan dalam 10 tahun terakhir (2013 – 2023),
2. Artikel bertujuan untuk mengidentifikasi manfaat penerapan *lean construction*,
3. Artikel ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris,
4. Artikel merupakan makalah penelitian (*research articles*).

Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan kata kunci yang terkait dengan topik penelitian. Operator *Boolean* "OR" digunakan untuk memasukkan sinonim dari kata kunci yang terkait, dan "AND" digunakan untuk menggabungkan beberapa kata kunci. Kata kunci yang digunakan pada *systematic literature review* ini adalah: "*lean in construction OR lean construction,* AND *effect OR impact of lean construction*". Pengumpulan data ini dilakukan dengan menggunakan basis data Scopus dan Google Scholar.

Seleksi data (*Screening*)

Data yang terkumpul dari seluruh sumber, selanjutnya diimpor ke *software* EndNote untuk membantu proses seleksi data. Sebelum memulai proses seleksi, dilakukan penghapusan duplikasi, jika terdapat artikel yang duplikat, yang dilakukan secara otomatis menggunakan *software* EndNote. Selanjutnya, dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, terkait dengan relevansinya dengan tujuan penelitian. Kemudian, penyaringan artikel secara keseluruhan (*full text*) dilakukan pada artikel-artikel yang lolos penyaringan judul dan abstrak, dengan tujuan untuk memilih artikel-artikel yang mampu menjawab pertanyaan penelitian. Artikel-artikel yang tidak lolos masing-masing tahap penyaringan akan dikecualikan. Jumlah artikel yang tersaring pada masing-masing tahapan akan dimasukkan ke dalam diagram PRISMA.

Quality assessment

Penilaian kualitas (*quality assessment*) bertujuan untuk melakukan analisis terhadap desain penelitian, validitas temuan dari studi tersebut, kemungkinan bias, dan relevansi hasil keseluruhan dengan penelitian lain yang ada. Pada penelitian ini, artikel yang memenuhi kriteria seleksi dinilai menggunakan kriteria yang ditetapkan oleh *Critical Appraisal Skills Programme* (CASP). Kriteria penilaian kualitas ini terdiri atas 10 pertanyaan, yaitu sebagai berikut:

Q1: Apakah ada pernyataan yang jelas mengenai tujuan penelitian?

Q2: Apakah metode penelitian yang digunakan sudah tepat?

Q3: Apakah desain penelitian sudah tepat untuk menjawab tujuan penelitian?

Q4: Apakah strategi rekrutmen sudah sesuai dengan tujuan penelitian?

Q5: Apakah pengumpulan data dilakukan dengan cara yang sesuai dengan masalah penelitian?

Q6: Apakah hubungan antara peneliti dan partisipan telah dipertimbangkan secara memadai?

Q7: Apakah aspek etika telah dipetimbangkan?

Q8: Apakah analisis data telah dilakukan dengan baik?

Q9: Apakah ada pernyataan yang jelas tentang temuan?

Q10: Apakah hasil penelitian ini bermanfaat?

Masing-masing artikel akan dinilai berdasarkan 10 pertanyaan di atas, terdapat tiga (3) opsi jawaban untuk masing-masing pertanyaan tersebut, yaitu "*no*" yang memiliki skor 1, "*can't tell*" yang memiliki skor 2, dan "*yes*" yang memiliki skor 3. Artikel yang memperoleh jumlah nilai (*score*) sebesar 15 atau lebih, dinyatakan memenuhi syarat penilaian kualitas, dan akan dilanjutkan ke tahapan ekstraksi data.

Ekstraksi data

Artikel-artikel yang memenuhi syarat penilaian kualitas, selanjutnya diekstraksi untuk mengumpulkan informasi yang relevan secara terstruktur. Data yang diperoleh dari setiap artikel dikumpulkan dalam sebuah formulir ekstraksi data yang berisi rincian tentang penulis, tahun terbit, metode penelitian, lokasi penelitian, tujuan serta kesimpulan dari artikel tersebut.dari masing-masing artikel. Tujuan utamanya adalah untuk menyusun dan mengorganisir data yang diperlukan untuk menjawab pertanyaan penelitian.

Sintesis data

Pada tahapan ini, data yang terkumpul akan dianalisis, dan berdasarkan data tersebut pertanyaan penelitian akan dijawab. Tahapan ini diawali dengan membaca dan memahami setiap artikel yang ada, kemudian memberi tanda (*highlight*) pada informasi yang berkaitan dengan tujuan penelitian. Selanjutnya, dilakukan proses *coding* dengan membuat *node* sesuai dengan informasi yang ditemukan pada setiap artikel. Setelah melakukan *coding* awal, yang menghasilkan terbentuknya beberapa *node*, selanjutnya dilakukan pengelompokan pada *node-node* tersebut. Masing-masing kategori atau kelompok akan berisi satu *node* atau lebih. Pengelompokan *node* ini diawali dengan membuat *node* baru dan diberikan nama sesuai dengan kategori yang akan dibuat. Akhirnya, berdasarkan serangkaian *node* yang terbentuk, pola dan hubungan dalam data tersebut dianalisis. Selain menyajikan data secara deskriptif, hasil analisis *Nvivo* juga dapat disajikan dalam bentuk diagram atau grafik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelusuran literatur

Proses penelusuran literatur diawali dengan melakukan pengumpulan data. Data dikumpulkan melalui basis data Scopus, dan dilengkapi dengan pencarian pada Google Scholar. Hasil pencarian pada basis data Scopus menghasilkan 1.216 artikel, ditambah dengan 20 artikel yang diperoleh melalui Google Scholar, dengan menggunakan kata kunci seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Syntax* pencarian

Basis data	Tanggal pencarian	Jumlah artikel	Syntax
Scopus	25/12/2023	1.216 artikel	TITLE-ABS-KEY (lean AND in AND construction OR lean AND construction) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Lean Construction")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")), TITLE-ABS-KEY (effect OR impact AND of AND lean AND construction) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD , "Lean Construction")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))
Google Scholar	26/01/2024	20 artikel	Lean* in* construction* AND effect* OR impact* of lean* construction* Rentang tahun (2013-2023)

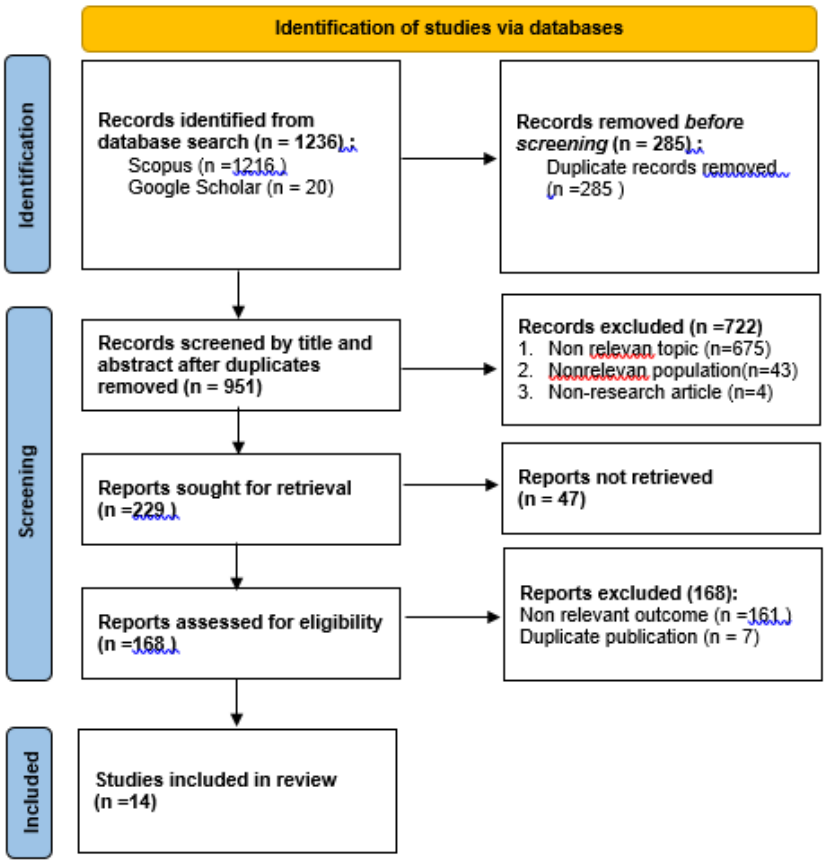
Setelah semua data terkumpul, selanjutnya dilakukan seleksi data (*screening*). Tahapan ini diawali dengan melakukan penghapusan duplikat. Berdasarkan seluruh artikel yang diperoleh dari basis data Scopus dan Google Scholar, ditemukan 285 artikel yang duplikat dan kemudian dikecualikan, menyisakan 951 artikel berdasarkan judul dan abstrak. Sebanyak 722 artikel dikecualikan dalam tahapan penyaringan ini, dan menyisakan sebanyak 229 artikel. Sebanyak 47 artikel tidak dapat diakses secara lengkap (*full text*), sehingga hanya terdapat 182 artikel untuk disaring secara keseluruhan (*full text*). Dalam penyaringan secara *full text*, sebanyak 168 artikel dikecualikan, sehingga diperoleh sebanyak 14 artikel yang lolos seleksi data. Jumlah artikel yang tersaring pada masing-masing tahapan dimasukkan ke dalam diagram PRISMA, seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.

Artikel-artikel yang dinyatakan memenuhi kriteria pada tahapan seleksi data, kemudian dievaluasi berdasarkan kriteria penilaian kualitas. Berdasarkan penilaian kualitas pada 14 artikel, seluruh artikel memperoleh skor lebih besar dari 15, sehingga dinyatakan memenuhi syarat penilaian kualitas. Hasil penilaian kualitas masing-masing artikel ditampilkan pada Tabel 3. Artikel-artikel yang memenuhi syarat penilaian kualitas, selanjutnya diekstraksi untuk mengumpulkan informasi yang relevan secara terstruktur. Data yang diperoleh dari setiap artikel dikumpulkan dalam sebuah formulir ekstraksi data yang berisi rincian tentang penulis, tahun terbit, metode penelitian, lokasi penelitian, tujuan serta kesimpulan dari artikel tersebut dari masing-masing artikel.

Tabel 3. Hasil *quality assessment*

No	Penulis, Tahun Terbit	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Score	Terpilih
1	(Ahmed et al., 2021)	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	28	ya
2	(Akinradewo et al., 2018)	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	28	ya
3	(George et al., 2016)	3	3	2	2	3	2	1	3	3	3	25	ya
4	(Castillo et al., 2015)	3	3	3	2	3	2	1	3	3	3	26	ya
5	(Erol et al., 2017)	3	3	3	2	3	2	1	3	3	3	26	ya

6	(Fuenzalida et al., 2016)	3	3	2	3	3	2	1	3	3	3	26	ya
7	(Gambatese et al., 2017)	3	3	3	3	3	2	1	3	3	3	27	ya
8	(Ghosh et al., 2014)	3	3	2	3	2	2	1	3	3	3	25	ya
9	(Martinez et al., 2019)	3	3	3	2	3	2	1	3	3	3	26	ya
10	(Oguntona et al., 2019)	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	28	ya
11	(Osorio-Gómez et al., 2020)	3	3	3	2	3	2	1	3	3	3	26	ya
12	(Ramani & KSD, 2021)	3	3	3	3	3	2	1	3	3	3	27	ya
13	(Sarhan et al., 2017)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	ya
14	(Shaqour, 2022)	3	3	3	3	3	2	1	3	3	3	27	ya

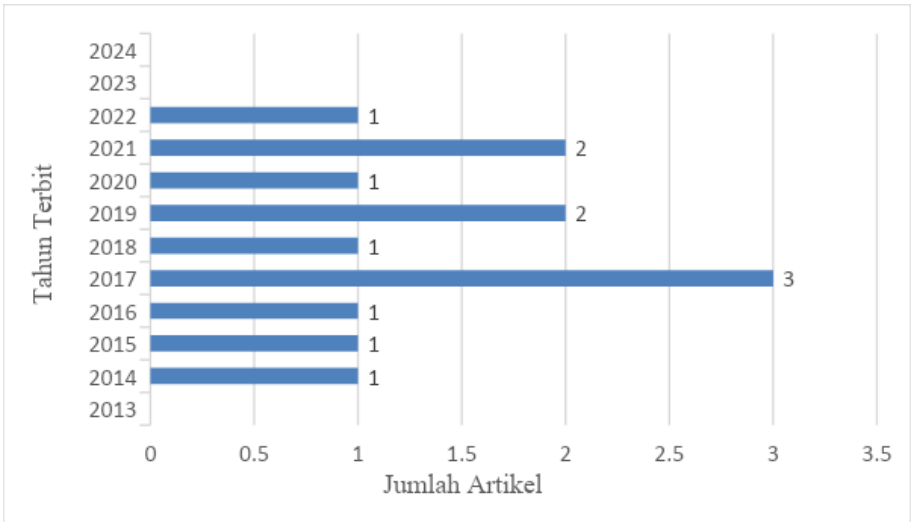


Gambar 1. Diagram PRISMA

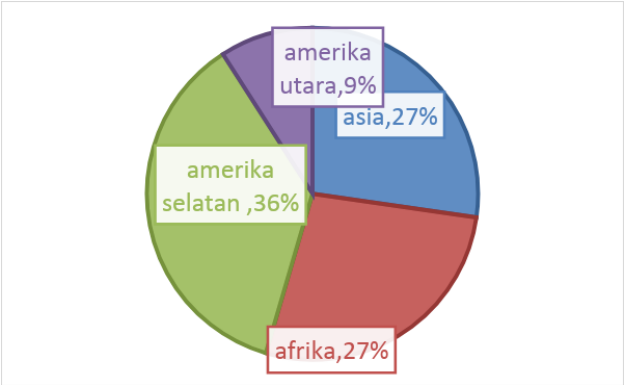
Gambaran umum artikel yang terpilih

Systematic literature review ini meninjau 14 artikel penelitian yang diterbitkan selama 10 tahun belakangan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Dari sejumlah artikel tersebut, diketahui bahwa sebaran artikel terkait dengan manfaat penerapan *lean construction* paling banyak pada tahun 2017, yaitu sebanyak 3 artikel.

Sementara itu, berdasarkan lokasi penelitiannya, penelitian terkait manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi paling banyak dilakukan di Benua Amerika Selatan (Brasil, Chili, Ekuador, dan Kolombia) dengan persentase sebesar 37%, diikuti oleh Benua Asia (Bangladesh, Turki, Arab Saudi) dan Afrika (Afrika Selatan dan Mesir) dengan persentase masing-masing sebesar 27%, kemudian di posisi terakhir yaitu Benua Amerika Utara (Gilbert dan Arizona) dengan persentase sebesar 9%, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Sebaran jumlah artikel yang diterbitkan tiap tahun



Gambar 3. Sebaran jumlah artikel berdasarkan lokasi penelitiannya

Manfaat penerapan *lean construction*

Berdasarkan analisis terhadap 14 artikel, hasilnya menunjukkan bahwa penerapan *lean construction* memiliki sebelas (11) manfaat, antara lain: pengurangan biaya, efisiensi penggunaan material, penghematan waktu, peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja, peningkatan keandalan perencanaan, manajemen risiko yang lebih baik, peningkatan kualitas dan produktivitas, peningkatan kepuasan pelanggan, peningkatan komunikasi dan transparansi, pengurangan dampak lingkungan, serta pengurangan variabilitas alur kerja. Berbagai manfaat penerapan *lean construction* tersebut secara ringkas divisualisasikan dalam bagan yang ditampilkan pada Gambar 4. Adapun uraian masing-masing manfaat penerapan *lean construction* beserta sumber referensinya ditampilkan pada Tabel 5.

Efisiensi dalam manajemen proyek sangat erat kaitannya dengan aspek ekonomi dalam proyek tersebut. Ini berarti bahwa proyek yang dikelola dengan efisien cenderung memiliki pengendalian biaya yang lebih baik, sehingga dapat mengurangi pemborosan dan meningkatkan keuntungan. *Lean construction* merupakan metode yang efektif untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya, sehingga dapat mengurangi pemborosan dan mengurangi kebutuhan akan biaya tambahan. Salah satu contohnya yaitu terkait dengan efisiensi penggunaan material. Penerapan LC berpotensi mengurangi jumlah sumber daya yang dibutuhkan untuk berbagai kegiatan, serta meningkatkan pengelolaan penyimpanan material, termasuk akses dan inventarisasi. Penerapan LC membantu administrasi material menjadi lebih efisien. Oleh karena itu, penerapan *lean construction* mampu menurunkan biaya tenaga kerja, material dan peralatan. Dengan menerapkan *lean construction*, ada peluang besar untuk mengatasi biaya dan tantangan pembangunan.

Selain dari segi biaya, berdasarkan Tabel 5, dapat dilihat bahwa manfaat penerapan *lean construction* banyak dijumpai terkait dengan peningkatan produktivitas dan kualitas, penghematan waktu, dan pengurangan dampak lingkungan. Penerapan prinsip *lean* dalam proyek konstruksi memberikan keuntungan tambahan berupa peningkatan kualitas dan produktivitas. Dengan menggunakan prinsip *lean*, pekerjaan dapat dilakukan dengan lebih baik dan lebih efisien. Alat *lean* membantu meningkatkan produktivitas dengan membuat alur kerja yang lebih terstruktur, mengurangi variasi dan kebutuhan untuk melakukan pekerjaan ulang, sehingga pekerjaan bisa lebih cepat selesai dan dengan lebih sedikit

kesalahan.

Tabel 5. Manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi

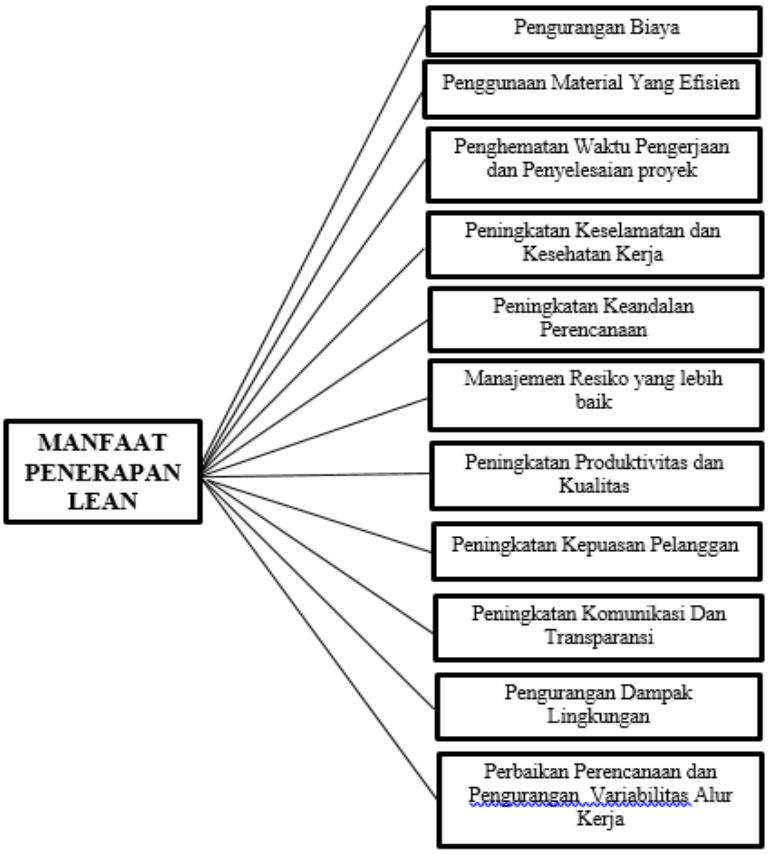
Manfaat	Sumber	Jumlah Artikel
Pengurangan Biaya	(Shaqour, 2022) ; (Martinez et al., 2019) ; (Oguntona et al., 2019) ; (Akinradewo et al., 2018) ; (Ahmed et al., 2021).	5
Penggunaan Material Yang Efisien	(Akinradewo et al., 2018) ; (Ghosh et al., 2014) ; (Shaqour, 2022) ; (Martinez et al., 2019)	4
Penghematan Waktu Pengerjaan dan Penyelesaian proyek	(Erol et al., 2017) ; (Ramani & KSD, 2021) ; (Shaqour, 2022) ; (Martinez et al., 2019) ; (Oguntona et al., 2019) ; (Akinradewo et al., 2018) ; (Ahmed et al., 2021).	7
Peningkatan Keselamatan dan Kesehatan Kerja	(Akinradewo et al., 2018) ; (Ahmed et al., 2021) ; (Gambatese et al., 2017); (Oguntona et al., 2019) ; (Osorio-Gómez et al., 2020) ; (Shaqour, 2022).	6
Peningkatan Keandalan Perencanaan	(George et al., 2016) ; (Ghosh et al., 2014).	2
Manajemen Risiko yang lebih baik	(Akinradewo et al., 2018) ; (Oguntona et al., 2019) ; (Shaqour, 2022).	3
Peningkatan Produktivitas dan Kualitas	(Ahmed et al., 2021) ; (Akinradewo et al., 2018) ; (George et al., 2016) ; (Castillo et al., 2015) ; (Fuenzalida et al., 2016) ; (Oguntona et al., 2019) ; (Sarhan et al., 2017) ; (Shaqour, 2022).	8
Peningkatan Kepuasan Pelanggan	(Ahmed et al., 2021) ; (Akinradewo et al., 2018) ; (Fuenzalida et al., 2016) ; (Oguntona et al., 2019) ; (Sarhan et al., 2017).	6
Peningkatan Komunikasi Dan Transparansi	(Akinradewo et al., 2018) ; (George et al., 2016) ; (Oguntona et al., 2019) ; (Shaqour, 2022).	5
Pengurangan Dampak Lingkungan	(Ahmed et al., 2021) ; (Akinradewo et al., 2018) ; (Fuenzalida et al., 2016) ; (Oguntona et al., 2019) ; (Osorio-Gómez et al., 2020) ; (Shaqour, 2022)	7
Perbaikan Perencanaan dan Pengurangan Variabilitas Alur Kerja	(Oguntona et al., 2019) ; (Erol et al., 2017)	2

Penerapan *lean construction* juga membawa manfaat signifikan dalam penghematan waktu pengerjaan dan penyelesaian proyek. LC berpotensi mengurangi pemborosan, seperti waktu tunggu dan transportasi yang tidak efisien, guna mempercepat durasi proyek. Dengan menyederhanakan proses dan meningkatkan aliran kerja, tim proyek dapat menyelesaikan tugas dengan lebih cepat. LC juga mengandalkan metode *Just-In-Time* (JIT) untuk memastikan material dan sumber daya tiba tepat waktu, sehingga mengurangi waktu penyelesaian proyek. Lebih lanjut, salah satu tujuan penerapan *lean construction* adalah mengurangi dampak lingkungan proyek konstruksi dengan menerapkan konsep pembangunan berkelanjutan. Ini mencakup pengurangan limbah, efisiensi material, pengurangan konsumsi energi, serta perbaikan berkelanjutan, pencegahan polusi, dan pengurangan emisi CO_2. Dengan demikian, *lean construction* tidak hanya meningkatkan efisiensi konstruksi tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan.

Manfaat lain yang dihadirkan LC adalah peningkatan keselamatan dan kesehatan kerja. Melalui penyederhanaan dan standarisasi proses kerja, penerapan LC berpotensi mengurangi berkontribusi risiko kecelakaan sehingga meningkatkan keselamatan di tempat kerja. Pengelolaan alat dan bahan yang lebih baik serta pemantauan di lokasi kerja yang ketat juga meningkatkan kesadaran akan keselamatan. Lingkungan kerja yang rapi dan penyimpanan alat yang tepat dapat mengurangi risiko kecelakaan akibat barang yang berserakan, sementara alur kerja yang efisien dan jelas akan mengurangi kebingungan dan kesalahan, serta mendukung kepatuhan terhadap prosedur keselamatan.

Implementasi *lean construction* juga meningkatkan manajemen risiko, sehingga mengurangi kemungkinan terjadi masalah besar di lapangan. Penerapan *lean construction* memungkinkan para pemangku kepentingan proyek menciptakan *platform* yang memfasilitasi kerjasama terstruktur antara manajer, pekerja, dan pihak lain yang terkait. Transparansi dan komunikasi yang baik merupakan elemen penting untuk meningkatkan efisiensi dan keberhasilan proyek. Transparansi memastikan bahwa informasi proyek disampaikan secara jelas, mencegah kesalahpahaman, dan mempercepat proses pengambilan keputusan. Sementara itu, komunikasi yang berkualitas memastikan bahwa informasi disampaikan dengan jelas dan tepat waktu, memperkuat kerjasama tim, dan meningkatkan efektivitas proyek. Hal ini akan meningkatkan keandalan perencanaan, mengurangi ambiguitas lintas bidang, serta memungkinkan analisis dan identifikasi kendala sejak awal. Metode ini membuat sistem manajemen risiko lebih

efektif dan terintegrasi, serta meningkatkan kemampuan tim proyek dalam memperkirakan risiko secara akurat melalui analisis mendalam dan proses sistematis.



Gambar 4. Bagan manfaat penerapan *lean construction*

Dalam proyek konstruksi, menerapkan prinsip *lean construction* secara konsisten akan meningkatkan kepuasan pelanggan, yaitu dengan mempercepat penyelesaian proyek, menurunkan biaya, dan meningkatkan kualitas hasil. Kepuasan pelanggan yang tinggi akan meningkatkan reputasi perusahaan dan mendukung keberlanjutan bisnis, karena pemilik yang puas lebih mungkin untuk memilih kembali dan merekomendasikan perusahaan tersebut.

5. KESIMPULAN

Penelitian mengenai penerapan *lean construction* di industri konstruksi telah banyak dilakukan di banyak negara dengan pendekatan penelitian yang beragam. Oleh karena itu, pendekatan *systematic literature review* digunakan untuk mengumpulkan dan merangkum berbagai penelitian yang telah ada untuk memahami secara menyeluruh manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi. Setelah melalui seluruh tahapan tinjauan sistematis, diperoleh 14 artikel untuk ditinjau lebih lanjut. Berdasarkan hasil tinjauan pada 14 artikel, ditemukan bahwa manfaat penerapan *lean construction* pada proyek konstruksi mencakup berbagai aspek seperti biaya, waktu, mutu yang merupakan tiga kendala utama keberhasilan proyek konstruksi. Selain itu memberi manfaat pula untuk kesehatan dan keselamatan kerja, manajemen risiko, produktivitas, kepuasan pelanggan dan lingkungan. Penerapan *lean construction* menawarkan berbagai manfaat seperti telah dijelaskan di atas. Temuan penelitian ini, dapat menjadi dasar untuk penelitian lanjutan pada berbagai topik terkait antara lain kendala yang dihadapi kontraktor dalam menerapkan *lean construction*, juga faktor-faktor yang mendukung tercapainya manfaat *lean construction* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, S., Hossain, M. M., & Haq, I. (2021). Implementation of lean construction in the construction industry in Bangladesh: awareness, benefits and challenges. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, *39*(2), 368–406. https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2019-0037

Ahmed, S., Hossain, M. M., & Haq, I. (2021). Implementation of lean construction in the construction industry in Bangladesh: awareness, benefits and challenges. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, *39*(2), 368–406. https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2019-0037

Akinradewo, O. I., Oke, A. E., Aigbavboa, C. O., & Ndalamba, M. (2018). Benefits of adopting lean construction technique in the South African construction industry. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, *2018*(NOV), 1271–1277. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27044.01927

Arifin, Z. (2020). Pengantar Manajemen Proyek. *Pendidikan*, 9–10.

Bajjou, M. S., & Chafi, A. (2018). Lean construction implementation in the Moroccan construction industry: Awareness, benefits and barriers. *Journal of Engineering, Design and Technology*, *16*(4), 533–556. https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2018-0031

Bajjou, M. S., Chafi, A., Ennadi, A., & El Hammoumi, M. (2017). The practical relationships between lean construction tools and sustainable development: A literature review. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, *10*(4), 170–177. https://doi.org/10.25103/jestr.104.20

Carvajal-Arango, D., Bahamón-Jaramillo, S., Aristizábal-Monsalve, P., Vásquez-Hernández, A., & Botero, L. F. B. (2019). Relationships between lean and sustainable construction: Positive impacts of lean practices over sustainability during construction phase. *Journal of Cleaner Production*, *234*, 1322–1337. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.216

Castillo, G., Alarcón, L. F., & González, V. A. (2015). Implementing Lean Production in Copper Mining Development Projects: Case Study. *Journal of Construction Engineering and Management*, *141*(1). https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0000917

Erol, H., Dikmen, I., & Birgonul, M. T. (2017). Measuring the impact of lean construction practices on project duration and variability: A simulation-based study on residential buildings. *Journal of Civil Engineering and Management*, *23*(2), 241–251. https://doi.org/10.3846/13923730.2015.1068846

Fuenzalida, C., Fischer, B., Arroyo, P., & Salvatierra, J. L. (2016). Evaluating environmental impacts of construction operation before and after the implementation of lean tools. *IGLC 2016 - 24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, *January*, 3–12.

Gambatese, J. A., Pestana, C., & Lee, H. W. (2017). Alignment between Lean Principles and Practices and Worker Safety Behavior. *Journal of Construction Engineering and Management*, *143*(1). https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001209

Garcés, G., & Peña, C. (2023). A Review on Lean Construction for Construction Project Management. *Revista Ingenieria de Construccion*, *38*(1), 43–60. https://doi.org/10.7764/RIC.00051.21

Gaspersz and Fontana., (2017). Lean Six Sigma for Manufacturing and Service Industries, Vinchristo Publication.

George, B., Fabíola, A., Clarissa, B. and, & Bruno, M. (2016). Implementing Lean Construction Effectively in a Year in a Construction. *SIIPRO, Lean and BIM Consultancy Publication*, *May*.

Ghosh, S., Bhattacharjee, S., Pishdad-Bozorgi, P., & Ganapathy, R. (2014). A case study to examine environmental benefits of lean construction. *22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Understanding and Improving Project Based Production, IGLC 2014*, *January*, 133–144.

Kololu, W., & Camerling, B. J. (2017). TINJAUAN PENGGUNAAN METODE LEAN CONSTRUCTION PADA PROYEK KONSTRUKSI (Studi Kasus Pada Pesona Alam Estate). *Arika*, *11*(2), 109–118. https://doi.org/10.30598/arika.2017.11.2.109

Maitimu, N. E., & Pattiapon, M. L. (2021). Penerapan Lean Construction Pada Proyek PT. Pesona Graha Mandiri Ambon Guna Mereduksi Non Added Value Activity. *ALE Proceeding*, *1*(April), 168–175. https://doi.org/10.30598/ale.1.2018.168-175

Martinez, E., Reid, C. K., & Tommelein, I. D. (2019). Lean construction for affordable housing: a case study in Latin America. *Construction Innovation*, *19*(4), 570–593. https://doi.org/10.1108/CI-02-2019-0015

Oguntona, O. A., Aigbavboa, C. O., & Mulongo, G. N. (2019). An assessment of lean construction practices in the construction industry. In *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 788, Issue January 2019). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-94199-8_51

Osorio-Gómez, C. C., León-Daza, W. M., Moggio-Bessolo, A. F., Ospina-Alvarado, A., & Ponz-Tienda, J. L. (2020). Lean Construction Impact on the Environmental Footprint of a Construction Project in Colombia: A Case Study. *Construction Research Congress 2020: Project Management and Controls, Materials, and Contracts - Selected Papers from the Construction Research Congress 2020*, *November*, 379–387. https://doi.org/10.1061/9780784482889.040

PRAMATA LAURENS, I. (2015). *Analisis Keberhasilan Proyek Terhadap Efektivitas Waktu, Biaya, Dan Mutu Dalam Penerapan Teknik Lean Construction Pada Proyek Konstruksi*.

Ramani, P. V., & KSD, L. K. L. (2021). Application of lean in construction using value stream mapping. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *28*(1), 216–228. https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2018-0572

Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., & Minkarah, I. (2006). Lean Construction: From Theory to Implementation. *Journal of Management in Engineering*, *22*(4), 168–175. https://doi.org/10.1061/(asce)0742-597x(2006)22:4(168)

Sarhan, J. G., Xia, B., Fawzia, S., & Karim, A. (2017). Lean construction implementation in the Saudi Arabian construction industry. *Construction Economics and Building*, *17*(1), 46–69. https://doi.org/10.5130/AJCEB.v17i1.5098

Shaqour, E. N. (2022). The impact of adopting lean construction in Egypt: Level of knowledge, application, and benefits. *Ain Shams Engineering Journal*, *13*(2). https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.07.005

Widyastuty, D. (2005). *Studi Persepsi Kontraktor Terhadap Lean Construction*. 1–43.

MAPPING PERMASALAHAN HASIL AUDIT INVESTIGASI BANGUNAN PUBLIK DI INDONESIA

Ferry Hermawan[1], Bagus Abrar Ahimsa[2] dan Rayhan Muhammad[3]

[1] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang*
***e-mail**: ferry.hermawan@live.undip.ac.id*

[2] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang*
***e-mail**: bagusabrar43@gmail.com*

[3] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto, SH, Semarang*
***e-mail**: rayhanmuha20@gmail.com*

ABSTRAK

Bangunan publik menghadapi masalah fisik yang dapat mempengaruhi fungsinya sebagai penyedia layanan esensial seperti kesehatan, pendidikan, hingga pemerintahan. Hal tersebut disebabkan oleh usia, bencana alam, dan kualitas konstruksi. Penelitian ini mengkaji pola permasalahan bangunan publik di Indonesia dengan mengidentifikasi hubungan antara permasalahan fisik dengan manajemen bangunan publik, serta mengidentifikasi pengendalian permasalahan bangunan publik di Indonesia. Jurnal internasional dan dokumen audit bangunan publik digunakan menjadi data sekunder, yang diolah menjadi *mindmap* dan matriks untuk mengidentifikasi hubungan antara permasalahan. Hasil analisis menunjukkan bahwa permasalahan yang paling banyak dari kajian pustaka adalah keretakan non struktural. Hal tersebut mengindikasikan audit pada ranah global dilakukan dengan cukup reaktif. Sedangkan pada studi kasus, audit dilakukan pada saat terjadi sengketa konstruksi. Masalah bangunan sering terjadi pada tahap *Operation and Maintenance*. Pada tiga studi kasus, ditemukan bahwa perizinan lahan dan kegagalan bangunan memiliki dampak yang cukup serius. Sebanyak 34 permasalahan bangunan publik pada kajian pustaka dan studi kasus memiliki persamaan yang menunjukkan bahwa masalah bangunan tidak hanya terjadi di Indonesia. Perbedaannya adalah pendeteksian dan penanganan dari masalah yang terjadi. Masalah bangunan sebenarnya dapat terjadi pada seluruh tahap dari fase *Project Life*-Cycle. Oleh karena itu, deteksi dan penanganan masalah yang cepat serta efektif dibutuhkan untuk mencegah masalah berkelanjutan.

Kata kunci: bangunan, publik, pola permasalahan, audit, investigasi

1. PENDAHULUAN

Bangunan publik menjadi tulang punggung dalam menyediakan layanan esensial bagi masyarakat seperti fasilitas kesehatan, pendidikan, hingga pemerintahan. Bangunan publik dimiliki, dioperasikan, dan dikelola oleh pemerintahan yang difungsikan untuk kepentingan masyarakat secara umum (Permen PUPR No. 16 Tahun 2010). Bangunan publik juga menjadi salah satu poros dalam menggerakan roda ekonomi suatu negara dengan cara memberikan ruang untuk masyarakat berproduktivitas.

Bangunan publik menghadapi tantangan dan permasalahan pada kondisi fisik yang dapat berdampak pada fungsi dasarnya. Dalam jangka waktu yang panjang, kondisi fisik bangunan akan berkurang secara perlahan akibat umur dan pemakaian (Faqih et al., 2022). Hal tersebut dapat diperburuk oleh kualitas konstruksi yang kurang baik (Chan & Hung, 2015). Kondisi suatu bangunan juga dapat berkurang secara drastis dalam waktu yang singkat akibat bencana alam, seperti pada kasus bangunan rumah yang hancur total akibat gempa di Kumamoto, Jepang (Naito et al., 2017). Selain kualitas konstruksi yang buruk, pelaksanaan pemeliharaan yang kurang baik juga dapat memperburuk kondisi fisik suatu bangunan (Chan & Hung, 2015; Faqih et al., 2022)

Masalah-masalah tersebut menyebabkan berkurangnya fungsi bangunan publik yang ditujukan pada kegiatan masyarakat dan mengancam keselamatan masyarakat sebagai pengguna bangunan publik. Pada agenda pembangunan dalam rangka pemenuhan sasaran utama RPJPN Indonesia Emas 2045 juga disebutkan bahwa perwujudan sarana dan prasarana yang berkualitas hingga pembangunan yang berkesinambungan dengan melakukan pembangunan yang efektif merupakan salah satu pilar pendukung pemenuhan agenda transformasi sosial, ekonomi, dan tata kelola. Maka dari itu penelitian ini dilakukan untuk melihat pola permasalahan pada bangunan publik yang dapat menimbulkan kerugian dan mengancam keselamatan masyarakat umum sebagai pengguna bangunan publik serta pihak pemerintah sebagai pengelola bangunan publik.

Penelitian ini dilakukan dengan maksud untuk melihat pola permasalahan audit investigasi bangunan publik di Indonesia. Selain itu penelitian ini memiliki dua tujuan. Pertama, mengidentifikasi hubungan antara permasalahan

fisik bangunan dengan manajemen bangunan publik. Kedua, mengidentifikasi pengendalian permasalahan bangunan publik di Indonesia.

2. METODE

Strategi menjawab tujuan penelitian dilakukan dengan pendekatan secara kualitatif deskriptif. Metode kualitatif merupakan pendekatan yang memotret kenyataan di lapangan tanpa menggunakan dasar kerja statistik. Dilakukan studi literatur dalam pengumpulan data dari jurnal terpublikasi serta empat dokumen hasil audit investigasi yang dipilih dari database yang dipunyai secara historis oleh peneliti dua puluh tahun terakhir. Selain itu dilakukan wawancara dengan tiga praktisi ahli yang mempunyai pengalaman audit bangunan publik minimal satu dekade sebagai justifikasi analisis penelitian. Sedangkan, penelitian deskriptif merupakan metode untuk menguraikan hasil dari penelitian. Hasil analisis metode kualitatif disajikan dalam bentuk *mindmap* dan *matriks* untuk menganalisa hubungan antara permasalahan fisik dengan manajemen bangunan publik. Mindmap dan matrik dielaborasi dari dua perspektif, menurut tahapan PLC/ siklus hidup proyek dan komponen bangunan. Sedangkan, hasil dari analisis deskriptif merupakan penjelasan mengenai pengendalian permasalahan bangunan publik di Indonesia.

3. PEMBAHASAN

Permasalahan bangunan publik berdasarkan kajian pustaka

Permasalahan bangunan publik yang terjadi mencerminkan kualitas manajemen bangunan publik. Dari permasalahan bangunan yang terjadi pada setiap jurnal menunjukkan perbedaan perilaku dalam menghadapi permasalahan tersebut. Hal ini didasarkan dari karakteristik jenis bangunan itu sendiri dengan perilaku sosial pada suatu negara. Pengidentifikasian masalah dari masing-masing jurnal menghasilkan 109 permasalahan bangunan publik meliputi masalah teknis dan non-teknis, Masing-masing masalah bangunan diidentifikasi kata kunci permasalahannya agar diketahui inti permasalahan. Data diolah lebih lanjut dengan pengidentifikasian 2 kategori dari masing-masing masalah bangunan, yaitu bagian bangunan yang bermasalah dan kapan masalah tersebut terjadi jika dilihat berdasarkan fase *Project Life-Cycle* (PLC). Hasil identifikasi permasalahan bangunan beserta kata kunci, bagian bangunan, dan fase *Project Life-Cycle* diolah lebih lanjut agar pola permasalahan bangunan publik dapat terlihat. Pengolahan dilakukan dengan cara pembuatan matriks dan *mindmap* permasalahan bangunan publik di dunia seperti pada Tabel 1 dan Tabel 2 serta Gambar 1. Masing-masing masalah bangunan dikelompokkan berdasarkan kata kunci permasalahan yang sudah dibuat, sehingga setiap kata kunci mengandung berbagai jenis masalah dengan inti permasalahan yang sama.

Tabel 1. Matriks permasalahan bangunan publik berdasarkan p*roject life cycle*

No.	Permasalahan	Referensi	PLC			
			A	B	C	D
1	Kesalahan Desain	(Atkinson, 2002; Faqih et al., 2022; Jiao et al., 2017; Josephson & Hammarlund, 1999; Lazarova-Molnar & Mohamed, 2016; Silva et al., 2017; Tripura & Sangma, 2019; Yazdani Mehr & Wilkinson, 2018)	●			
2	Perubahan Tak Terkontrol	(Atkinson, 1999, 2002; Pheng & Wee, 2001)	●		●	
3	Tanggung jawab Terpecah	(Atkinson, 1999)			●	
4	Manajemen Situs Buruk	(Josephson & Hammarlund, 1999)			●	
5	Kurangnya Manajemen Kesalahan	(Love & Smith, 2016)			●	
6	Kesalahan Supervisi	(Atkinson, 1999)			●	
7	Biaya Tinggi	(Chan & Hung, 2015; Einizinab et al., 2023; Ogbeifun et al., 2018; Shan et al., 2022)				●
8	Kurangnya Acuan dan Regulasi	(Einizinab et al., 2023; Riggio et al., 2018)				●
9	Keselamatan Publik dan Keselamatan Kerja Auditor	(Einizinab et al., 2023; Shelton et al., 2013)				●
10	Proses Design and Build	(Mohd Isa et al., 2011)	●	●	●	

No.	Permasalahan	Referensi	PLC			
			A	B	C	D
11	Kesalahan Spesifikasi Material	(Atkinson, 2002; Josephson & Hammarlund, 1999; Mohd Isa et al., 2011; Tripura & Sangma, 2019)		●		
12	Budaya Organisasi yang Kurang Baik	(Atkinson, 1999; Jingmond & Ågren, 2015; Love & Smith, 2016)	●	●	●	
13	Tekanan Sosial	(Atkinson, 1999, 2002)	●	●	●	
14	Kurangnya Pengetahuan dan Kelalaian Personil	(Atkinson, 1999, 2002; Chan & Hung, 2015; Lazarova-Molnar & Mohamed, 2016; Lesanmi et al., 2023; Lombillo et al., 2015; Sandanayake et al., 2022; Shan et al., 2022; Shelbourn et al., 2000; Silva et al., 2017; Tripura & Sangma, 2019; Yazdani Mehr & Wilkinson, 2018; Zalejska Jonsson & Hungria Gunnelin, 2019)	●	●	●	●
15	Keterlambatan Waktu Kerja	(Atkinson, 2002; Josephson & Hammarlund, 1999; Ogbeifun et al., 2018)			●	●
16	Dokumentasi Proyek dan Operasional yang Buruk	(Dejaco et al., 2017; Napolitano et al., 2020; Ogbeifun et al., 2018; Pheng & Wee, 2001)	●		●	●
17	Komunikasi Buruk	(Atkinson, 1999, 2002; Chan Associate Professor et al., 2014; Chan & Choi, 2015; Pheng & Wee, 2001)			●	●
18	Perselisihan antar Stakeholders	(Chan & Choi, 2015)				●

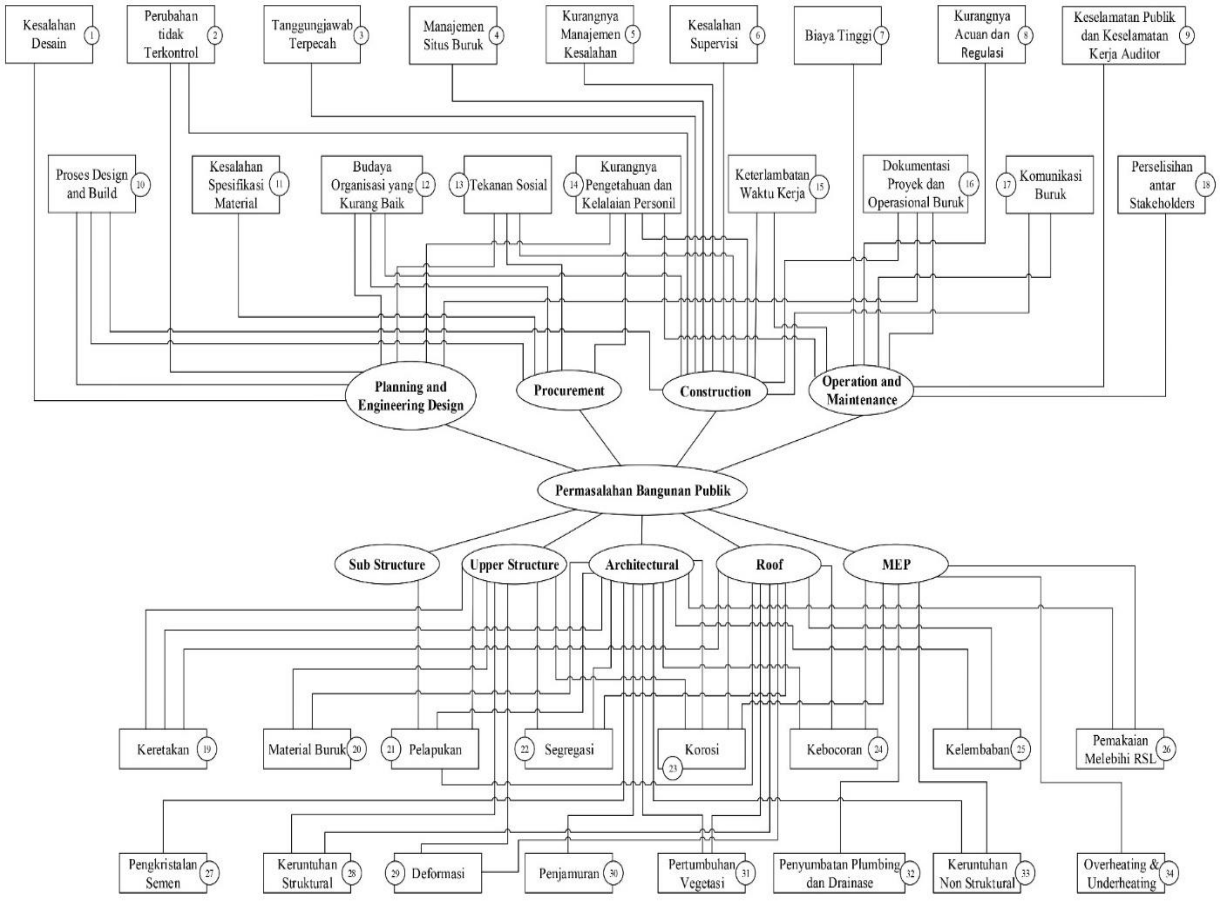
A: *Planning and Engineering Design*; B: *Procurement*; C: *Construction*; D: *Operational and Maintenance*

Tabel 2. Matriks permasalahan bangunan publik berdasarkan bagian bangunan

No.	Permasalahan	Referensi	Bagian Bangunan				
			A	B	C	D	E
19	Keretakan	(Chan & Hung, 2015; Ebrahimiyan et al., 2017; Fox et al., 2015; Jesus et al., 2023; Kian, 2001; Lesanmi et al., 2023; Molnárka, 2001; Napolitano et al., 2019, 2020; Olajumoke et al., 2009; Resende et al., 2022; Silva Junior & Santos, 2023; Tavukçuoğlu, 2018; Tripura & Sangma, 2019; Wang et al., 2021)		●	●		●
20	Material Buruk	(Olajumoke et al., 2009; Sanrı Karapınar et al., 2021)		●	●		
21	Pelapukan	(Chan & Hung, 2015; Jiao et al., 2017; Lesanmi et al., 2023; Wang et al., 2021)	●	●	●		●
22	Segregasi	(Esteves et al., 2018; Faqih et al., 2022; Jesus et al., 2023; Liu et al., 2021; Resende et al., 2022; Tripura & Sangma, 2019)		●	●		●
23	Korosi	(Angelis et al., 2023; Bortolini & Forcada, 2018; Esteves et al., 2018; Faqih et al., 2022; Kian, 2001; Lesanmi et al., 2023; Pereira et al., 2021)		●	●	●	●
24	Kebocoran	(Carretero-Ayuso et al., 2021; Chan & Hung, 2015; Fox et al., 2015; Jesus et al., 2023; Kian, 2001; Lesanmi et al., 2023; Milion et al., 2017; Perez et al., 2019; Zalejska Jonsson & Hungria Gunnelin, 2019)			●	●	●
25	Kelembaban	(Carretero-Ayuso et al., 2021; Ebrahimiyan et al., 2017; Fox et al., 2015; Jesus et al., 2023; Kian, 2001; Lesanmi et al., 2023; Perez et al., 2019; Rogage et al., 2020)			●		●
26	Pemakaian Melebihi RSL	(Carlos Dos Santos Júnior et al., 2023; Dejaco et al., 2017)			●	●	
27	Pengkristalan Semen	(Abdou et al., 2016; Kian, 2001)			●		
28	Keruntuhan Struktural	(Naito et al., 2017)		●			●

No.	Permasalahan	Referensi	Bagian Bangunan				
			A	B	C	D	E
29	Deformasi	(Kian, 2001; Lesanmi et al., 2023; Olajumoke et al., 2009; Sanrı Karapınar et al., 2021)		●			●
30	Penjamuran	(Lesanmi et al., 2023; Molnárka, 2000)			●		
31	Pertumbuhan Vegetasi	(Jesus et al., 2023; Pereira et al., 2021)			●		●
32	Penyumbatan Plumbing dan Drainase	(Liu et al., 2021; Milion et al., 2017; Napolitano et al., 2019)				●	
33	Keruntuhan Non Struktural	(Josephson & Hammarlund, 1999; Milion et al., 2017; Naito et al., 2017; Tripura & Sangma, 2019)			●	●	
34	Overheating dan Underheating	(Rogage et al., 2020)				●	

A: *Sub Structure*; B: *Upper Structure*; C: *Architectural*; D: MEP; E: *Roof*



Gambar 1. *Mindmap p*ermasalahan bangunan publik berdasarkan kajian pustaka

Berdasarkan *mindmap* dan matriks permasalahan bangunan publik pada kajian pustaka, masalah fisik bangunan yang paling sering terjadi adalah keretakan non-struktural. Hal tersebut menunjukkan bahwa audit investigasi yang dilakukan cukup reaktif. Selain itu juga teridentifikasi bahwa permasalahan paling sering terjadi pada tahap *Operation and Maintenance*. Hal tersebut menunjukkan bahwa pelaksanaan manajemen bangunan publik masih kurang baik

Permasalahan bangunan publik berdasarkan dokumen audit investigasi

Terdapat tiga dokumen audit yang dijadikan studi kasus dalam pembahasan kali ini. Seluruh kasus ini terjadi pada Indonesia dan menggunakan APBD dalam pelaksanaan konstruksinya. Pemilihan kasus ini mempertimbangkan tingkat kerumitan dan kelengkapan data yang ada di dalamnya.

1. Pembangunan Saluran Drainase Ruas Jalan Mojo – Sumur

Permasalahan pertama yaitu yang paling berdampak adalah terjadinya perbedaan volume pekerjaan. Perbedaan volume terdapat dalam pekerjaan saluran U-Ditch dan tebal lantai kerja bawah saluran beton. Selain itu, terjadi juga kesalahan spesifikasi material yang menyebabkan volume pekerjaan juga menjadi tidak sesuai. Jika dilihat secara keseluruhan perbedaan volume kerjaan, kejadian ini menimbulkan perbedaan biaya antara pelaksanaan dengan adendum kontrak yaitu sebesar Rp. 192.031.000.

Masalah kedua yang ditemukan pada dokumen audit adalah keterlambatan waktu pengerjaan proyek. Pekerjaan mencapai 100% pada tanggal 3 November 2019 yang seharusnya tercapai pada tanggal 9 Oktober 2019. Jika dilihat dari sisi administrasi proyek, keterlambatan ini tidak dilengkapi dengan adendum, surat teguran, dan surat perpanjangan waktu masa pelaksanaan. Berdasarkan batas waktu kontrak, Kontraktor pelaksana dikenakan denda keterlambatan dengan perhitungan terlambat 26 hari.

Masalah ketiga yang ditemukan pada dokumen audit adalah pengarsipan dokumen proyek yang buruk. Pengarsipan yang buruk dapat mempersulit pihak auditor dalam mengaudit bangunan. Dampaknya adalah audit bisa terhambat atau tidak dapat dilakukan dengan sangat rinci.

2. Pembangunan Gedung SMPN 1 Wates, Kab. Kulon Progo

Permasalahan yang paling signifikan ialah terjadinya perbedaan volume antara kontrak seletah semua addendum (MC-100) dengan kondisi eksisting. Perbedaan volume dan material terdapat pada volume urugan tanah, pekerjaan sloof, pelat lantai, tangga, dan rangka atap. Perbedaan volume pekerjaan ini berpengaruh pada perbedaan biaya sebesar Rp. 106.229.000,00.

Selain itu, pada masa pembangunan terdapat item pekerjaan yang belum dihitung pada RAB pembangunan ini yaitu biaya angkur besi pada pondasi menerus. Meskipun sudah diperhatikan selama proyek dan stakeholder dapat melakukan addendum kontrak, kelalaian ini tetap tidak bisa diabaikan. Pihak pengelola dan perencana harus dapat memperhatikan hal sekecil apapun untuk meminimalisir terjadinya kesalahan dan perubahan pada masa pelaksanaan konstruksi.

Permasalahan lainnya muncul ketika pelaksanaan audit investigasi. Dalam proses pemeriksaan terdapat pemeriksaan teknis dan pemeriksaan kelengkapan dan kesesuaian dokumen. Dokumen pada proyek ini tidak lengkap mulai dari tahap perencanaan, pelaksanaan, dan pemeliharaan. Tidak terdapat dokumen Rencana Kerja Syarat (RKS), *Bill of Quantity* (BOQ), dokumen kontrak, *shop drawing*, *as-built drawing*, dan dokumen pengawasan pekerjaan. Dokumentasi yang buruk ini dapat berdampak besar jika ingin dilakukan pemeliharaan dan perbaikan hingga investigasi jika terjadi sengketa konstruksi.

3. Pekerjaan Peningkatan Jalan Gamblok – Luragung

Permasalahan besar terjadi pada awal proyek, yaitu penghentian pekerjaan sementara. Hal ini disebabkan proyek dilaksanakan sebelum mendapatkan izin pemilik lahan (Perum Perhutani). Hal ini cukup berakibat fatal terhadap waktu pelaksanaan proyek, bahkan hingga mendapat penambahan waktu selama 74 hari. Pejabat Pembuat Komitmen (PPK) dinilai tidak profesional karena permasalahan tersebut.

Pembangunan Peningkatan Jalan Gamblok – Luragung ini mengalami kegagalan bangunan. Kegagalan bangunan ini berupa bangunan jembatan dengan jalan tidak menyatu. Hal ini dapat mengancam keselamatan dan keamanan masyarakat sebagai pengguna jalan tersebut. Hal ini disebabkan karena kurangnya sinkronisasi antara perencanaan dengan pelaksanaan konstruksi. Permasalahan tersebut menunjukkan kurangnya pengawasan pembangunan oleh Bina Marga Dinas PUPR Kabupaten Pekalongan, yang bertanggung jawab mencegah kegagalan bangunan dan kerugian masyarakat, terutama karena pembangunan ini didanai oleh APBD Kabupaten Pekalongan.

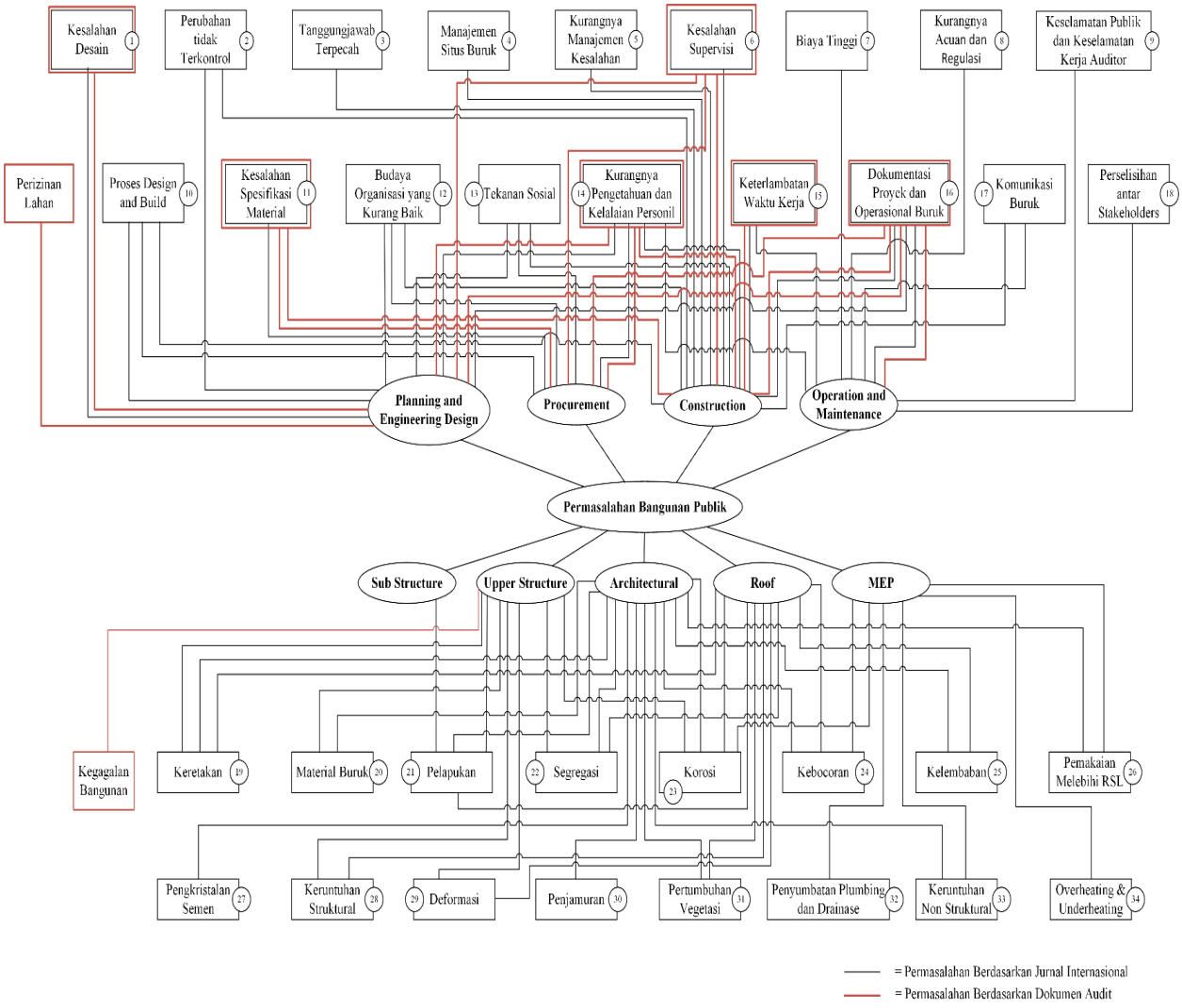
Permasalahan lainnya terdapat kurangnya item pekerjaan pada kontrak awal sehingga dilakukan addendum kontrak berupa penambahan pekerjaan. Walaupun perubahan tersebut sudah dilaksanakan addendum kontrak, ada baiknya jika item tersebut sudah diperhitungkan dalam RAB pada kontrak kerja, terlebih lagi proyek ini menggunakan jenis kontrak *Fixed Price.*

Selain itu, dalam dokumen audit tercantum bahwa adanya perbedaan volume pekerjaan yang berpengaruh juga pada total biaya yang digunakan sebesar Rp. 273.297.000,00. Hal ini cukup disayangkan karena nilai tersebut belum dikalkulasikan dengan kegagalan bangunan yang terjadi pada pembangunan ini. Permasalahan ini dapat disebabkan secara disengaja maupun tidak disengaja. Hal ini menandakan terdapat kurangnya pengetahuan dari personil proyek.

Perbandingan permasalahan bangunan publik berdasarkan kajian pustaka dan dokumen audit investigasi

Pengidentifikasian masalah pada tiga dokumen audit investigasi bangunan menunjukkan beberapa persamaan dan perbedaan dengan *mindmap* berdasarkan kajian pustaka. Permasalahan seperti kesalahan desain, kesalahan supervisi, kesalahan spesifikasi material, kurangnya pengetahuan dan kelalaian personil proyek, keterlambatan waktu kerja, dan

dokumentasi proyek yang buruk juga menjadi permasalahan yang dialami pada bangunan di negara lain. Namun, terdapat permasalahan yang hanya ditemukan pada dokumen audit investigasi bangunan publik di Indonesia, yaitu masalah terkait perizinan lahan dan kegagalan bangunan. Kenyataannya, perizinan lahan dan kegagalan bangunan dapat menjadi suatu permasalahan yang serius pada dunia konstruksi. Masalah yang ditemukan pada 3 studi kasus menjadi pelengkap dalam *mindmap* penelitian. Selain itu, hal yang menjadi pembeda antara masalah bangunan publik di Indonesia dengan negara lain adalah perilaku tenaga kerja konstruksi dalam menghadapi permasalahan tersebut. Hal ini mungkin dipengaruhi oleh kondisi ekonomi dan sosial, regulasi terkait, pendidikan tenaga kerja konstruksi, hingga budaya organisasi. *Mindmap* gabungan antara permasalahan bangunan publik pada kajian pustaka dan dokumen audit investigasi bangunan publik di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Mindmap gabungan permasalahan bangunan publik berdasarkan jurnal internasional dan dokumen audit investigasi bangunan publik di Indonesia.

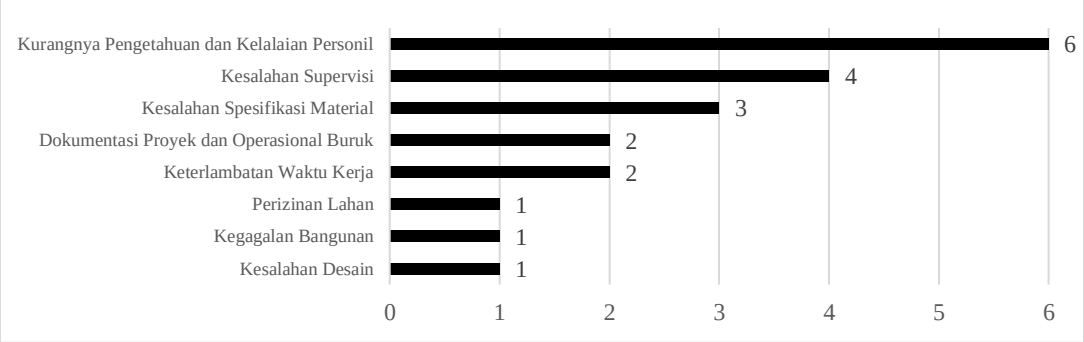
Pengendalian permasalahan bangunan publik di Indonesia

Berdasarkan analisis terhadap tiga dokumen audit investigasi bangunan publik di Indonesia, teridentifikasi sepuluh masalah utama, dengan tiga yang paling sering terjadi seperti pada Gambar 3. Masalah pertama adalah kurangnya pengetahuan dan kelalaian tenaga kerja konstruksi, yang mencakup kontraktor, pengguna jasa, perencana, dan pengawas. Permasalahan kelalaian dan kurangnya pengetahuan tenaga kerja konstruksi dapat menjadi akar dari banyak permasalahan yang terjadi, seperti kesalahan pelaksanaan, ketidaksesuaian spesifikasi, dan pengawasan yang buruk, yang berujung pada kualitas pekerjaan yang tidak sesuai rencana dan berpotensi membahayakan keselamatan. Peningkatan kompetensi dan pengetahuan tenaga kerja sangat penting untuk mengatasi masalah ini.

Masalah kedua adalah kesalahan spesifikasi, khususnya perbedaan kuantitas pekerjaan dengan kontrak, yang sering disebabkan oleh kelalaian pihak kontraktor pelaksana dan kelalaian dalam pengawasan. Menurut Pasal 52 dan 54 Undang-Undang No. 2 Tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi, penyedia jasa harus bekerja sesuai kontrak dan

menyerahkan hasil sesuai biaya, mutu, dan waktu. Ketidaksesuaian ini dapat menyebabkan kerugian bagi pengguna jasa dan masyarakat, serta menurunkan fungsi bangunan.

Masalah ketiga adalah kesalahan supervisi. Berdasarkan Pasal 49 Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2020 dan Pasal 40 Permen PUPR No. 1 Tahun 2023, pengawasan yang dilakukan pengguna jasa atau konsultan pengawas bertujuan memastikan mutu pekerjaan. Namun, kelalaian pengawas menyebabkan permasalahan mutu pekerjaan selama berjalannya proyek hingga selesai, memperlihatkan pentingnya pengawasan yang lebih ketat untuk mencegah kesalahan yang dapat menjadi masalah besar.



Gambar 3. Permasalahan pada dokumen audit investigasi bangunan publik di Indonesia

Selain masalah yang paling sering terjadi, teridentifikasi juga dua permasalahan yang paling fatal. Masalah fatal pertama adalah permasalahan terkait pengadaan tanah. Pengadaan tanah di Indonesia sering menjadi hambatan pembangunan, seperti pada kasus Peningkatan Jalan Gamblok – Luragung. Berdasarkan Undang-Undang No. 2 Tahun 2012 dan Peraturan Presiden No. 71 Tahun 2012, pengadaan tanah untuk kepentingan umum diperbolehkan, namun konflik sering muncul terkait nilai ganti rugi, di mana masyarakat kadang enggan melepas tanah mereka karena nilai yang dianggap terlalu rendah atau alasan sentimental. Pengadaan tanah di Indonesia memerlukan pendekatan holistik dengan implementasi regulasi yang baik dan komunikasi transparan untuk mengurangi konflik dan mempercepat pembangunan.

Menurut Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2017 kegagalan bangunan terjadi ketika bangunan runtuh atau tidak berfungsi setelah penyerahan akhir hasil jasa konstruksi. Fenomena ini bisa menyebabkan kerugian besar dan mengancam keselamatan, seperti yang terjadi pada kasus Peningkatan Jalan Gamblok – Luragung. Pada kasus tersebut, jembatan yang tidak menyambung dengan jalan dikategorikan sebagai kegagalan bangunan. Selain itu, tanggung jawab atas kegagalan bangunan dibebankan pada pengguna atau penyedia jasa, tergantung pada penyebab dan waktu terjadinya kegagalan. Korupsi dan praktik kecurangan dapat memperparah potensi kegagalan bangunan, yang juga diperburuk oleh pengawasan yang lemah dan rendahnya kompetensi tenaga kerja. Oleh karena itu, peningkatan kompetensi melalui pelatihan dan sertifikasi, serta penambahan jumlah penilai ahli yang memadai, sangat penting untuk mengantisipasi kegagalan bangunan.

4. KESIMPULAN

Hubungan antara permasalahan fisik bangunan dengan manajemen bangunan publik adalah kesalahan teknis maupun non teknis yang dilakukan oleh tenaga kerja konstruksi dapat menyebabkan permasalahan fisik bangunan. Walaupun terdapat faktor alam yang dapat menyebabkan permasalahan fisik bangunan, kualitas perencanaan, konstruksi, hingga pemeliharaan yang buruk dapat memperburuk kondisi fisik suatu bangunan. Ditemukan bahwa permasalahan paling sering terjadi pada fase *Operation and Maintenance*. Oleh karena itu, dibutuhkan manajemen bangunan publik yang baik agar masalah tidak berkelanjutan dan menjadi suatu masalah yang lebih banyak dan lebih besar. Pada ketiga studi kasus, pendeteksian masalah dari tenaga kerja konstruksi kurang baik sehingga masalah terjadi secara terus menerus. Selain itu, penanganan dari suatu permasalahan juga cukup terlambat sehingga dapat menimbulkan masalah yang lebih besar, seperti kegagalan bangunan pada studi kasus Pembangunan Jalan G-L. Permasalahan fatal yang ditemukan pada studi kasus adalah perizinan lahan yang bermasalah dan kegagalan bangunan. Sedangkan untuk masalah yang paling umum terjadi pada studi kasus adalah kurangnya pengetahuan dan kelalaian personil proyek konstruksi, kesalahan spesifikasi, dan kesalahan supervisi. Perbedaan antara hasil analisis data jurnal internasional dan studi kasus audit investigasi di Indonesia adalah pendeteksian dan penanganan dari masalah yang terjadi. Pendeteksian dan penanganan masalah yang lebih baik, suatu masalah bangunan publik dapat teratasi secara efektif tanpa perlu menjadi masalah yang lebih besar dan proyek mengalami kerugian yang lebih banyak.

Ucapan terima kasih pada Tim assisten Laboratorium Manajemen Konstruksi Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, dan dukungan pembiayaan dari Hibah Penelitian Fundamental Reguler dari Dana DIPA DRPTM Dirjen Dikti dan Ristek Kemendikbudristek TA 2024 No. SP DIPA-023.17.1.690523/2024 revisi ke-1 tanggal 4 Februari 2024. No. Kontrak Induk: 047/E5/PG.02.00.PL/ 2024 tanggal 11 Juni 2024, No. Kontrak

Pelaksanaan Program: 601-68/UN7.D2/PP/VI/2024 tanggal 12 Juni 2024.

DAFTAR PUSTAKA

Abdou, A., Haggag, M. and Al Khatib, O. (2016) 'Use of Building Defect Diagnosis in Construction Litigation: Case Study of a Residential Building', *Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction*, 8(1). Available at: https://doi.org/10.1061/(asce)la.1943-4170.0000177.

Angelis, G.F. *et al.* (2023) 'AI-enabled Underground Water Pipe non -destructive Inspection', *Multimedia Tools and Applications* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/s11042-023-15797-w.

Atkinson, A.R. (1999) 'The role of human error in construction defects', *Structural Survey*, 17(4), pp. 231–236. Available at: https://doi.org/10.1108/02630809910303006.

Atkinson, A.R. (2002) 'The pathology of building defects; a human error approach', *Engineering, Construction and Architectural Management*, pp. 53–61. Available at: https://doi.org/10.1108/eb021206.

Bortolini, R. and Forcada, N. (2018) 'Building Inspection System for Evaluating the Technical Performance of Existing Buildings', *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(5). Available at: https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001220.

Carlos Dos Santos Júnior, J., Manoel Almeida Santos, J. and Rocha Almeida Santos, M. (2023) 'Parametric modeling using the BIM methodology for the process of pathology identification in buildings', *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1). Available at: https://doi.org/10.1007/s41024-023-00311-4.

Carretero-Ayuso, M.J. *et al.* (2021) 'Interrelations between the types of damages and their original causes in the envelope of buildings', *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102235.

Chan Associate Professor, D.W. *et al.* (2014) *Overview of the Development and Implementation of the Mandatory Building Inspection Scheme (MBIS) in Hong Kong*, *Built Environment Project and Asset Management (BEPAM) (Final Accepted Manuscript)*.

Chan, D.W.M. and Choi, T.N.Y. (2015) 'Difficulties in executing the Mandatory Building Inspection Scheme (MBIS) for existing private buildings in Hong Kong', *Habitat International*, 48, pp. 97–105. Available at: https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.03.015.

Chan, D.W.M. and Hung, H.T.W. (2015) *An empirical survey of the perceived benefits of implementing the Mandatory Building Inspection Scheme (MBIS) in Hong Kong*, *Facilities Journal (Final Accepted Manuscript)*.

Dejaco, M.C., Re Cecconi, F. and Maltese, S. (2017) 'Key Performance Indicators for Building Condition Assessment', *Journal of Building Engineering*, 9, pp. 17–28. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.11.004.

Ebrahimiyan, M., Golabchi, M. and Yekrangnia, M. (2017) 'Field Observation and Vulnerability Assessment of Gonbad-e Qābus', *Journal of Architectural Engineering*, 23(4). Available at: https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000266.

Einizinab, S. *et al.* (2023) 'Enabling technologies for remote and virtual inspection of building work', *Automation in Construction*. Elsevier B.V. Available at: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105096.

Esteves, I.C.A., Medeiros-Junior, R.A. and Medeiros, M.H.F. (2018) 'NDT for bridges durability assessment on urban-industrial environment in Brazil', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 36(5), pp. 500–515. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-04-2018-0032.

Faqih, F., Zayed, T. and Alfalah, G. (2022) 'Technology-based multi-tiered building diagnosis framework', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 40(1), pp. 101–133. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-10-2020-0088.

Fox, M. *et al.* (2015) 'Time-lapse thermography for building defect detection', *Energy and Buildings*, 92, pp. 95–106. Available at: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.021.

Jaafari, A. (2000) 'Life-Cycle Project Management: A Proposed Theoretical Model for Development and Implementation of Capital Projects', *Project Management Journal*, 31(1), pp. 44–52.

Jesus, M. *et al.* (2023) 'The potential of 3D printing in building pathology: rehabilitation of cultural heritage', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*. Emerald Publishing, pp. 647–674. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-03-2022-0053.

Jiao, J. *et al.* (2017) 'Regional structural investigation on the preservation districts of Yuasa and Ine in Japan', *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 16(1), pp. 193–200. Available at: https://doi.org/10.3130/jaabe.16.193.

Jingmond, M. and Ågren, R. (2015) 'Unravelling causes of defects in construction', *Construction Innovation*, 15(2), pp. 198–218. Available at: https://doi.org/10.1108/CI-04-2014-0025.

Josephson, P.-E. and Hammarlund, Y. (1999) *The causes and costs of defects in construction A study of seven building projects*, *Automation in Construction*. Available at: www.elsevier.comrlocaterautcon.

Kian, P.S. (2001) 'A Review of Factors Affecting Building Defects in Singapore', *Dimensi Teknik Sipil*, 3(2), pp. 64–68. Available at: http://puslit.petra.ac.id/journals/civil.

Lazarova-Molnar, S. and Mohamed, N. (2016) 'Challenges in the data collection for diagnostics of smart buildings',

in *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Verlag, pp. 941–951. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0557-2_90.
Lesanmi, A. *et al.* (2023) 'Common Defects of Buildings in Tertiary Institutions in Nigeria', *American Journal of Construction and Building Materials* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.11648/j.ajcbm.20230701.12.
Liu, D. *et al.* (2021) 'Integrating Building Information Model and Augmented Reality for Drone-Based Building Inspection', *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(2). Available at: https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000958.
Lombillo, I., Biezma, M. V. and Villegas, L. (2015) 'Construction Rehabilitation in Civil Engineering at the Bachelor Degree Level: Guideline Course', *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29(2). Available at: https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000540.
Love, P.E.D. and Smith, J. (2016) 'Error management: Implications for construction', *Construction Innovation*. Emerald Group Publishing Ltd., pp. 418–424. Available at: https://doi.org/10.1108/CI-01-2016-0001.
Milion, R.N., Alves, T. da C.L. and Paliari, J.C. (2017) 'Impacts of residential construction defects on customer satisfaction', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 35(3), pp. 218–232. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-12-2016-0033.
Mohd Isa, H. *et al.* (2011) *Learning from Defects in Design and Build Hospital Projects in Malaysia*.
Molnárka, G. (2000) *PROBLEMS IN FAILURE ANALYSIS IN BUILDING PATHOLOGY*. Budapest.
Molnárka, G. (2001) *The methodology in Visual Examinations in Building Pathology*. Győr.
Naito, S. *et al.* (2017) 'Investigation of damages in immediate vicinity of co-seismic faults during the 2016 kumamoto earthquake', *Journal of Disaster Research*, 12(5), pp. 899–915. Available at: https://doi.org/10.20965/jdr.2017.p0899.
Napolitano, R. *et al.* (2019) 'Combination of image-based documentation and augmented reality for structural health monitoring and building pathology', *Frontiers in Built Environment*, 5. Available at: https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00050.
Napolitano, R., Hess, M. and Glisic, B. (2020) 'Quantifying the Differences in Documentation and Modeling Levels for Building Pathology and Diagnostics', *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(4), pp. 1135–1152. Available at: https://doi.org/10.1007/s11831-019-09350-y.
Ogbeifun, E., Mbohwa, C. and Pretorius, J.H.C. (2018) 'Developing an effective renovation plan: the influence of data collection tools', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 36(1), pp. 63–76. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-09-2017-0035.
Olajumoke, A.M. *et al.* (2009) 'Engineering failure analysis of a failed building in Osun State, Nigeria', *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 9(1), pp. 8–15. Available at: https://doi.org/10.1007/s11668-008-9197-7.
Pemerintah Republik Indonesia. 2010. Peraturan Menteri PUPR No. 16 Tahun 2010
Pemerintah Republik Indonesia. 2012. Peraturan Presiden No. 71 Tahun 2012 tentang tentang Penyelenggaraan Pengadaan Tanah bagi Pembangunan untuk Kepentingan Umum.
Pemerintah Republik Indonesia. 2012. Undang-Undang No. 2 Tahun 2012 tentang Pengadaan Tanah Bagi Pembangunan untuk Kepentingan Umum.
Pemerintah Republik Indonesia. 2017. Undang-Undang No. 2 Tahun 2017 tentang Jasa Konstruksi
Pemerintah Republik Indonesia. 2020. Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2020.tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-undang Nomor 2 Tahun 2017 Tentang Jasa Konstruksi
Pemerintah Republik Indonesia. 2023. Peraturan Menteri PUPR No. 1 Tahun 2023.tentang **P**edoman Pengawasan Penyelenggaraan Jasa Konstruksi Yang Dilaksanakan Pemerintah Daerah Provinsi, Kabupaten, Dan Kota
Pemerintah Republik Indonesia. 2023. Rancangan Akhir Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional 2025 - 2045.
Pereira, C., de Brito, J. and Silvestre, J.D. (2021) 'Harmonising correlation matrices within a global building expert knowledge-based inspection system', *Construction and Building Materials*, 272. Available at: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121655.
Perez, H., Tah, J.H.M. and Mosavi, A. (2019) 'Deep learning for detecting building defects using convolutional neural networks', *Sensors (Switzerland)*, 19(16). Available at: https://doi.org/10.3390/s19163556.
Pheng, L.S. and Wee, D. (2001) 'Improving maintenance and reducing building defects through ISO 9000', *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 7(1), pp. 6–24. Available at: https://doi.org/10.1108/13552510110386865.
Resende, M.M. *et al.* (2022) 'Infrared thermal imaging to inspect pathologies on façades of historical buildings: A case study on the Municipal Market of São Paulo, Brazil', *Case Studies in Construction Materials*, 16. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01122.
Riggio, M. *et al.* (2018) 'Assessment of heritage timber structures: Review of standards, guidelines and procedures', *Journal of Cultural Heritage*. Elsevier Masson SAS, pp. 220–235. Available at: https://doi.org/10.1016/j.culher.2017.11.007.
Rogage, K. *et al.* (2020) 'Assessing building performance in residential buildings using BIM and sensor data', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 38(1), pp. 176–191. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-01-2019-0012.

Sandanayake, M. *et al.* (2022) 'Residential building defects investigation and mitigation – a comparative review in Victoria, Australia, for understanding the way forward', *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29(9), pp. 3689–3711. Available at: https://doi.org/10.1108/ECAM-03-2021-0232.
Sanrı Karapınar, I., Özbay, A.E.Ö. and Ünen, H.C. (2021) 'GIS-Based Assessment of Seismic Vulnerability Information of Old Masonry Buildings Using a Mobile Data Validation System', *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(3). Available at: https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001574.
Shan, M. *et al.* (2022) 'Investigating the critical issues in the conservation of heritage building: The case of China', *Journal of Building Engineering*, 51. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104319.
Shelbourn, M. *et al.* (2000) *Learning building pathology using computers - a prototype application*. Available at: http://www.cibworld.nl/pages/ib/9904/.
Shelton, J. *et al.* (2013) 'Multiresolution visualization tools to aid in conducting road safety audits', *Transportation Research Record*, (2392), pp. 59–67. Available at: https://doi.org/10.3141/2392-07.
Silva, A. and de Brito, J. (2019) 'Do we need a buildings' inspection, diagnosis and service life prediction software?', *Journal of Building Engineering*, 22, pp. 335–348. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.12.019.
Silva, C. da *et al.* (2017) 'Inspection, Diagnosis, and Repair System for Architectural Concrete Surfaces', *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31(5). Available at: https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001034.
Silva Junior, L.A. DA and Santos, T.B.D. (2023) 'Building pathologies caused by failure of Fundão Tailing Dam: A principal component analysis aproach', *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 95, p. e20220458. Available at: https://doi.org/10.1590/0001-3765202320220458.
Tavukçuoğlu, A. (2018) 'Non-Destructive Testing for Building Diagnostics and Monitoring: Experience Achieved with Case Studies', *MATEC Web of Conferences*, 149, p. 01015. Available at: https://doi.org/10.1051/matecconf/201814901015.
Tripura, D.D. and Sangma, S. (2019) 'Failure analysis of earthen, masonry and concrete buildings during the 2017 Tripura earthquake', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Forensic Engineering*, 172(2), pp. 75–84. Available at: https://doi.org/10.1680/jfoen.19.00017.
Wang, P. *et al.* (2021) 'Comprehensive evaluation method of historical timber structural building taking fujiu zhou house as an example', *Forests*, 12(9). Available at: https://doi.org/10.3390/f12091172.
Yazdani Mehr, S. and Wilkinson, S. (2018) 'Technical issues and energy efficient adaptive reuse of heritage listed city halls in Queensland Australia', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 36(5), pp. 529–542. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2018-0020.
Zalejska Jonsson, A. and Hungria Gunnelin, R. (2019) 'Defects in newly constructed residential buildings: owners' perspective', *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 37(2), pp. 163–185. Available at: https://doi.org/10.1108/IJBPA-09-2018-0077.

OPTIMALISASI SISTEM *SEA WATER REVERSE OSMOSIS* (SWRO) DI PULAU ENDE: EVALUASI EFISIENSI DAN STRATEGI PENGELOLAAN

Putu Gede Suranata[1], Putu Ika Wahyuni[2], Kadek Windy Candrayana[3], I Wayan Gde Erick Triswandana[4], Gde Wikan Pradnya Dana[5]

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
***e-mail**: suranata10@gmail.com*
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
***e-mail:** Ikawahyuni9971@gmail.com*
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
***e-mail**: windycandrayana@gmail.com*
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
***e-mail:** ericktriswandana@gmail.com*
Program Studi Teknik Komputer, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
***e-mail**: wikanpdana8044@gmail.com*

ABSTRAK

Pulau Ende menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan air bersih karena keterbatasan sumber air tawar. Upaya untuk mengatasi masalah ini, pemerintah membangun instalasi *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) sebagai solusi desalinasi air laut. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalisasi biaya operasional dan keberlanjutan operasional SWRO di Pulau Ende yang sebelumnya telah terlaksana, dengan fokus pada analisis biaya listrik, pemeliharaan, serta perhitungan waktu operasional yang ideal. Data diperoleh melalui survei lapangan dan analisis teknis terhadap perangkat SWRO, termasuk perhitungan daya aktif dan daya reaktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biaya operasional SWRO meliputi komponen penting seperti listrik, tenaga kerja, dan pemeliharaan, dengan estimasi biaya bulanan mencapai Rp. 47.628.869. Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa untuk mencapai titik impas, operasional SWRO harus berjalan minimal selama 596 jam per bulan. Dengan analisis ini, penelitian memberikan rekomendasi terkait strategi pengelolaan SWRO agar operasional dapat berjalan efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: SWRO, Biaya Operasional, Desalinasi, Energi Listrik, Keberlanjutan

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan air baku saat ini menjadi salah satu prioritas utama dalam memenuhi kebutuhan dasar kehidupan manusia. Air merupakan sumber vital yang memiliki peran penting dalam mendukung berbagai aktivitas manusia sehari-hari. Dalam kehidupan sehari-hari, peran air baku sangat krusial, baik untuk memenuhi kebutuhan minum, sanitasi, serta kebutuhan lainnya seperti mandi, cuci, kakus (MCK), dan keperluan rumah tangga, termasuk untuk keperluan ternak. Seiring dengan perkembangan di berbagai aspek kehidupan akibat pertumbuhan populasi yang terus meningkat serta pesatnya pembangunan, kebutuhan akan air dan pelayanan yang memadai untuk penyediaannya pun semakin bertambah dan menjadi semakin mendesak.

Pulau Ende sebagai salah satu daerah yang memiliki keterbatasan sumber air tawar mengalami tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan air bersih bagi masyarakatnya. Salah satu solusi yang telah diterapkan untuk mengatasi masalah ini adalah pembangunan Sistem Penyediaan Air Minum *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO). Peneletian mengenai SWRO telah banyak dilakukan, salah satunya dari Qihang (2024) yang membahas pengembangan sistem *reverse osmosis* air laut (SWRO) dengan mnenggunakan kontrol PLC Siemens dan proses pra-pengolahan yang dioptimalkan. Sistem ini dirancang untuk menghasilkan air minum berkualitas tinggi dan menawarkan keuntungan seperti pengoperasian yang mudah, perawatan yang mudah, dan pemantauan. (Li et al., 2024). Penelitian lainnya dari Sarai (2016) menjelaskan penggunaan teknologi desalinasi *reverse osmosis* (RO) terbukti efektif dalam mengatasi tingginya salinitas sungai MOD di Irak. Hasil analisis menunjukkan bahwa parameter operasi seperti suhu, salinitas, tekanan, dan rasio pemulihan memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi desalinasi RO. Selain itu, penelitian ini berhasil mengoptimalkan sistem desalinasi RO dalam hal kebutuhan energi, penolakan garam, dan biaya total produksi air, memberikan kontribusi signifikan dalam menawarkan solusi berkelanjutan untuk mengatasi kekurangan air di Irak. (Sarai Atab et al., 2016).
Teknologi SWRO ini mampu mengubah air laut menjadi air bersih yang layak digunakan oleh masyarakat setempat. Namun, meskipun teknologi ini sangat bermanfaat, terdapat beberapa kendala dalam keberlanjutan operasionalnya yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Berdasarkan hasil survei dan identifikasi masalah di lapangan, ditemukan beberapa tantangan utama dalam operasional SWRO Pulau Ende, salah satunya adalah besarnya biaya operasional

yang meliputi biaya listrik, biaya pemeliharaan (*maintenance*), biaya tenaga kerja, dan biaya lainnya. Biaya-biaya ini menjadi faktor yang krusial dalam menentukan kelangsungan operasional SWRO di masa mendatang.

Kondisi ini memunculkan dua pertanyaan utama yang perlu dijawab: pertama, berapa sebenarnya biaya operasional SWRO Ende setiap bulannya? Kedua, apakah SWRO Pulau Ende dapat terus beroperasi di masa depan dengan mempertimbangkan besarnya biaya operasional tersebut? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini sangat penting untuk merumuskan strategi pengelolaan yang lebih efektif dan efisien bagi keberlanjutan penyediaan air bersih di Pulau Ende.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung secara rinci besarnya biaya operasional yang diperlukan oleh SWRO Ende setiap bulan dan untuk mengevaluasi apakah keberlanjutan operasional SWRO dapat terjamin di masa depan dengan mempertimbangkan faktor biaya tersebut. Dengan memahami komponen biaya dan bagaimana pengaruhnya terhadap durasi operasi dan jumlah pegawai, diharapkan dapat diperoleh waktu operasional yang ideal sehingga sistem dapat beroperasi dengan efisien tanpa mengalami kerugian.

STUDI PUSTAKA

Sea Water Reserse Osmosis (SWRO)

Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) adalah proses desalinasi yang memanfaatkan membran semipermeabel untuk memisahkan air laut dari zat terlarutnya. Prinsip dasar SWRO mengikuti osmosis, di mana air bergerak dari konsentrasi rendah menuju konsentrasi tinggi melalui membran. Namun dalam SWRO, proses ini dibalik dengan menerapkan tekanan yang lebih besar dari tekanan osmotik menggunakan pompa, sehingga air bergerak dari larutan berkonsentrasi tinggi (air asin) menjadi air tawar. Teknologi ini efektif untuk menghasilkan air bersih dengan energi yang relatif efisien, menjadikannya solusi utama untuk daerah dengan keterbatasan air tawar. *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) dapat dikombinasi dengan pembangkit listrik yang mana hal ini sepenuhnya didukung oleh sistem energi terbarukan hibrida yang terdiri dari PV kemiringan tetap, PV pelacakan sumbu tunggal, tenaga angin, baterai, dan teknologi power-to-gas (PtG) (Caldera et al., 2016). Hal ini memungkinkan pemanfaatan kapasitas desalinasi yang terpasang secara optimal. Disisi lain SWRO memiliki dampak lingkungan diantaranya seperti impingement dan entrainment organisme laut akibat sistem pengambilan air, dampak konstruksi dan operasi fasilitas, dan dampak dari pembuangan konsentrat. (Missimer & Maliva, 2018) serta dampak dari Reverse Osmosis (RO) antara lain: penurunan permeabilitas air, peningkatan tekanan saluran pakan, peningkatan keluarnya garam (sehingga memerlukan pergantian membran awal) kebutuhan CIP periodik (Jafari et al., 2021) serta potensial pemanasan global (GWP) dan potensial ekotoksikologi akuatik laut (MAETP) yang tinggi (Al-Kaabi et al., 2021)

Daya Listrik

Daya listrik adalah jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja dalam suatu sistem tenaga 2istrik, yang diukur dalam satuan watt (W). Pada sistem tegangan bolak-balik (AC), daya listrik terbagi menjadi tiga jenis, yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). **Daya aktif (P)**, diukur dalam watt (W), adalah energi yang digunakan secara efektif untuk melakukan kerja. **Daya reaktif (Q)**, diukur dalam volt ampere reaktif (VAR), adalah komponen energi yang tidak melakukan kerja tetapi dibutuhkan untuk mempertahankan medan listrik dan magnet. **Daya semu (S)**, diukur dalam volt ampere (VA), adalah gabungan dari daya aktif dan reaktif yang mencerminkan total kebutuhan energi dalam sistem. Pengelolaan ketiga jenis daya ini sangat penting untuk efisiensi operasional sistem tenaga listrik.

$$\text{Daya Aktif (P)} = V \times I \times \cos \varphi \quad (1)$$
$$\text{Daya Reaktif (Q)} = V \times I \times \sin \varphi \quad (2)$$
$$\text{Daya Semu (S)} = V \times I \times \sin \varphi \quad (3)$$

Dengan P = Daya Aktif (Watt), Q = Daya Aktif (VAR), S = Daya Semu (VA), V = Tegangan (Volt), I = Arus (Ampere), cos φ = faktor daya,

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan survey lapangan. Penggunaan metode penelitian ini bertujuan untuk mengumpulkan, mengukur, dan menganalisis data numerik dari lingkungan nyata atau lapangan untuk menguji hipotesis atau menjawab pertanyaan penelitian. Metode ini sering digunakan untuk memetakan situasi yang ada, mengukur 2istrik2 tertentu, serta menghasilkan 2istrik2an yang dapat digeneralisasi ke populasi yang lebih luas. Dan perhitungan teknis. Adapun 2istrik-langkah dalam metode penelitian meliputi:

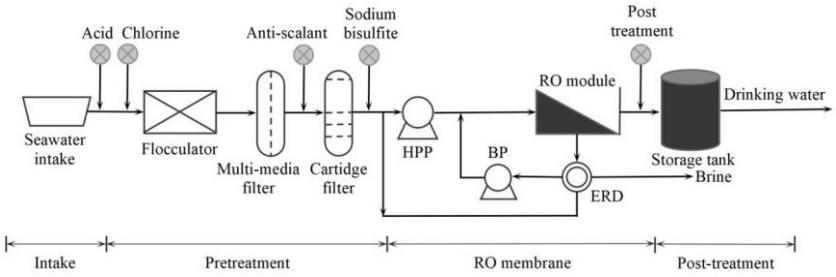
1. **Pengumpulan Data Lapangan** dimana data dikumpulkan dari SPAM SWRO Pulau Ende terkait konsumsi energi, kapasitas produksi, dan biaya operasional bulanan. Data teknis terkait perangkat 3istrik yang digunakan juga diambil dari Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan diperbarui berdasarkan kondisi lapangan.
2. **Perhitungan Kebutuhan Daya** bertujuan untuk menganalisis kebutuhan daya 3istrik dengan memperhitungkan kapasitas 3istrik dari perangkat utama SWRO, seperti pompa feed, pompa high pressure, kompresor, dan lainnya. Perhitungan daya dilakukan dengan membagi daya aktif dengan 3istri daya (cos phi) untuk memperoleh daya semu (KVA).
3. **Analisis Biaya Listrik dan Operasional** dilakukan untuk mengetahui perhitungan biaya 3istrik bulanan dengan menerepkan standar dan ketentuan dari **Permen ESDM Tahun 2021**, yakni menghitung biaya berdasarkan daya tersambung dan jam operasional fasilitas. Selain itu, analisis biaya perawatan juga dilakukan dengan mempertimbangkan umur perangkat dan frekuensi penggantian suku cadang
4. **Estimasi Pendapatan** merujuk pada data jumlah penduduk dan kebutuhan air harian di Desa Rendoraterua digunakan untuk memperkirakan pendapatan dari penjualan air bersih. Pendapatan dihitung berdasarkan tarif air yang berlaku dan kapasitas produksi SWRO.
5. **Analisis Keseimbangan Operasional** merupakan penghitungan dilakukan untuk menemukan jam operasional ideal yang dapat menghasilkan pendapatan yang seimbang dengan biaya operasional, atau mencapai titik impas

HASIL PEMBAHASAN

Analisis Kebutuhan Sea Water Reverse Osmosi

Pemasangan Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) di Pulau Ende merupakan salah satu langkah strategis pemerintah dalam mengatasi permasalahan pasokan air bersih bagi masyarakat setempat. Proyek ini diprakarsai oleh Dinas Cipta Karya dan Tata Ruang Kota Ende, yang bernaung di bawah Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Instalasi SWRO dimulai pada tahun 2015 dan mulai beroperasi secara penuh pada tahun 2016. Latar belakang pembangunan ini berangkat dari permasalahan utama yakni keterbatasan sumber air baku yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan masyarakat di Pulau Ende.

Sebelum memutuskan pembangunan SWRO, berbagai solusi sempat dipertimbangkan, termasuk pemasangan pipa distribusi air. Namun, rencana ini tidak terealisasi, sehingga akhirnya diputuskan untuk membangun sistem SWRO dengan kapasitas 2 x 2,5 liter per detik. Instalasi SWRO ini terdiri dari beberapa komponen penting, yaitu pretreatment, pompa bertekanan tinggi (high-pressure pump/HPP), pompa pendorong (booster pump/BP), serta post-treatment. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan perangkat pemulihan energi (energy recovery device/ERD) untuk mengoptimalkan penggunaan tekanan hidrolik pada air asin yang diolah



Gambar 1. Schematic diagram of SWRO process.(Li et al., 2024)

Teknologi *Reverse Osmosis* (RO) merupakan metode desalinasi yang paling umum digunakan di seluruh dunia, dengan lebih dari 65% instalasi desalinasi global menggunakan teknologi ini. RO menjadi pilihan unggul karena kemampuannya untuk mengubah air payau (campuran air laut dan air tawar) atau air laut menjadi air tawar yang aman untuk dikonsumsi. Salah satu kelebihan utama dari sistem RO adalah konsumsi energi yang relatif rendah jika dibandingkan dengan metode desalinasi lainnya. Selain itu, sistem ini juga dikenal memiliki risiko korosi yang minim, sehingga perawatan alat menjadi lebih mudah. Proses penggantian komponen juga sederhana, dan instalasi RO dapat dengan mudah diintegrasikan dengan sistem pengolahan air yang sudah ada.

Prinsip kerja utama dari teknologi RO adalah proses fisik yang memanfaatkan **tekanan osmotik**. Dalam sistem ini, perbedaan tekanan osmotik antara air asin dan air tawar digunakan untuk memisahkan garam yang terkandung dalam air. Dengan menerapkan tekanan yang lebih tinggi dari tekanan osmotik air asin, air dipaksa melewati membran semi-permeabel, yang kemudian menghasilkan air murni atau air tawar. Karena tekanan hidrostatik yang digunakan

melebihi tekanan osmotik larutan, air sebagai pelarut berpindah dari larutan yang kaya zat terlarut (air asin) menuju larutan yang miskin zat terlarut (air tawar). Proses ini memungkinkan teknologi RO menghasilkan air bersih yang siap untuk dikonsumsi dalam skala besar dengan efisiensi yang tinggi. Secara lebih rinci berikut merupakan data item pekerkajaan SPAM SWRO yang ditampilkan pada tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Data Item Perangkat Listrik SWRO dan Listrik Gedung

NO	NAMA PERANGKAT	BRAND	DAYA	DATA DARI RAB
PERANGKAT LISTRIK SWRO				
1	Pompa Hign Pressure	FEDCO	56 KW	Update
2	Pompa Transfer 1	EBARA	11 KW	tetap
3	Pompa Transfer 2	EBARA	11 KW	tetap
4	Pompa Transfer 3	GRUNDFOST CMV	2.2 KW	tetap
5	Pompa CIPUF/CIP RO	CMV	5.5 KW	update
6	Pompa Feed UF	GRUNDFOST	15 KW	update
7	Pompa Backwash UF	GRUNDFOST	37 KW	update
8	Pompa submersible Sumuran	GRUNDFOST	5.5 KW	update
9	Pompa Pengadaan SWRO feed		11 KW	update
10	Pompa dosing pump RO		20 w x 3, 90 w x1	update
11	Pompa dosing pump UF		370 w x 3	update
12	Pompa dosing pump UF		90 W	update
13	Kompressor	Swan	2.25 KW	tetap
14	Dray air kompresor	Swan	1 KW	tetap
PERANGKAT LISTRIK GEDUNG				
1	Lampu 10 W		43 bh	
2	Lampu 18 W		1 bh	
3	Lampu 50 W		4 bh	
4	LAMPU 1 X TL 18 W		4 bh	
5	STOP KONTAK (200W)		18 bh	
6	AC 1 PK (800W)		4 bh	Spare daya utk pengadaan kantor
7	AC 1/2 PK (400w)		2 bh	Spare daya utk pengadaan kantor
8	POMPA 125 W		2 bh	

Data hasil survey lapangan di kantor PDAM dapat diperhatikan Dari data saat survey lapangan terlihat pada item Perangkat listrik SWRO point 5, 9, 11-12 terjadi perubahan daya pada dokumen RAB dan rencana pekerjaan selanjutnya. Seperti terlihat pada tabel di atas poin no 1 sampai dengan no 14 besarnya daya didapatkan langsung dari nameplate masing – masing perangkat dan dapat dijumlahkan langsung nilai totalnya, sedangkan untuk Perangkat listrik gedung point 6 dan 7 adalah include data spare sebagai peruntukkan pengadaan kedepannya untuk keperluan kantor PDAM dan petugasnya.

4.2. Analisis Kebutuhan Tenaga Listrik

Menganalisis kebutuhan tenaga Listrik bertujuan untuk mengetahui jumlah daya total yang dibutuhkan untuk mengoprasikan SPAM SWRO. Perhitungan daya semu dilakukan dengan cara membagi daya aktif dengan cos phi = 0,8.

$$Daya\ Semu\ (S) = V \times I \quad (4)$$

$$Daya\ Aktif\ (P) = V \times I\ \times \cos\varphi \quad (5)$$

$$Daya\ Aktif\ (P) = S\ \times \cos\varphi \quad (6)$$

$$Daya\ Semu = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (7)$$

$$\text{Daya semu pada Pompa High Pressure} = \frac{56}{0.8} = 70\ KVA \quad (8)$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama maka didapatkan hasil perhitungan kebutuhan Listrik pada Perangkat SWRO adalah sebagai berikut

Tabel 2. Kebutuhan Daya untuk Perangkat SWRO

NO	ITEM	DAYA AKTIF (KW)	DAYA SEMU (KVA)	Diversity (tetap hidup / total)	Daya Semu Serentak
1	Pompa Hign Pressure	56	70	1	70
2	Pompa Transfer 1	11	13.75	1	13.75
3	Pompa Transfer 2	11	13.75	1	13.75
4	Pompa Transfer 3	2.2	2.75	1	2.75
5	Pompa Feed RO/CIP RO 10 HP	5.5	6.875	0	0
6	Pompa Feed UF	15	18.75	0	0
7	Pompa Backwash UF	37	46.25	1	46.25
8	Pompa Submersible Sumur bor	5.5	6.875	0	0
9	Pompa Pengadaan SWRO feed	11	13.75	1	13.75
10	Pompa dosing pump RO 20 W X 4	0.15	0.1875	1	0.1875
11	Pompa dosing pump UF 370 WX3	1.11	1.3875	1	1.3875
12	Pompa dosing pump UF 19 W	0.09	0.1125	1	0.1125
13	Kompressor	2.25	2.8125	1	2.8125
14	Dray air kompresor	1	1.25	1	1.25
	TOTAL	**158.8**	**198.5**	**0.8**	**156.05**

Hasil perhitungan pada tabel 2 dapat diperhatikan kebutuhan keseluruhan daya SWRO adalah 156.05 KVA dari perhitungan tersebut maka Daya Aktif Total untuk mengoperasikan SWRO dapat diperhitungkan dengan mengalikan total daya semu dengan cos phi 0,8 sehingga hasil perhitungan adalah sebagai berikut :

$$\text{Total Daya Aktif} = 156{,}05 \times 0{,}8 = 124{,}84 \text{ KVA} \quad (9)$$

Selanjutnya untuk menganalisis kebutuhan Listrik operasional Gedung menggunakan persamaan rumus yang sama sehingga kebutuhan daya Listrik Gedung adalah sebagai berikut yang diperlihatkan pada tabel 3.

Tabel 3. Kebutuhan Daya Listrik Gedung

NO	ITEM	JUMLAH (Bh)	DAYA (W)	DAYA (VA)
1	Lampu 10 W	43	430	537.5
2	Lampu 18 W	1	18	22.5
3	Lampu 50 W	4	200	250
4	Lampu 1 X TL 18 W	4	72	90
5	Stop Kontak (200w)	18	3600	4500
6	AC 1 PK (800W)	4	3200	4000
7	AC 1/2 PK (400w)	2	800	1000
8	Pompa 125 W	2	250	312.5
	TOTAL		**8.570**	**10.712,5**

Merujuk pada tabel 3 perhitungan daya listrik gedung didapat total daya aktif 8.570 W atau 8,57 KW dan total daya semu perangkat listriknya adalah sebesar 10.712,5 VA atau 10,71 KVA. Jadi kebutuhan keseluruhan daya SWRO dengan daya Gedung dengan memasukkan keseragaman atau DIversity 80% didapat sebagai berikut:

$$S = (\text{daya SWRO} + \text{daya Gedung}) \times 80\% \quad (10)$$

$$S = (198{,}5 \text{ KVA} + 10{,}7125 \text{ KVA}) \times 80\% = 167.37 \text{ KVA} \quad (11)$$

Sedangkan total daya aktifnya dikalikan dengan besarnya cos phi = 0.8 adalah

$$P = 167.37 \times 0.8 = 133.896 \text{ KW} \quad (12)$$

Jadi kebutuhan daya keseluruhan untuk pengoperasian SPAM SWRO pulau Ende memerlukan daya aktif sebesar 133.896 KW dengan daya semu adalah 167.37 KVA. Sehingga jika dibandingkan dengan item pekerjaan pada RAB terkontrak dengan pengadaan Daya sebesar 197 KVA yang ditujukan untuk untuk melayani beban pada SWRO, gedung PDAM dan spare daya perangkat baru masih sangat aman untuk pengoperasian SWRO.

Estimasi Biaya Penggunaan Listrik pada SPAM SWRO

Hasil dari perhitungan daya aktif total perangkat SWRO pulau ende pada perhitungan kebutuhan daya Listrik didapatkan kebutuhan daya aktif sebesar 124,84 KW dan apabila diasumsikan kebutuhan kerja SWRO adalah 8 jam / hari maka perhitungan estimiasi biaya didapatkan sebagai berikut:

Kapasitas air bersih yang dihasilkan = 5 liter/ detik (13)

Jumlah total air perhari = 5 liter / dt × 8 jam × 3600 detik/jam = 144.000 liter (14)

Sesuai dengan Permen ESDM untuk Listrik daya 200 KVA dikenakan rekening minimum (RM1) dimana:

$$\text{RM 1} = 40 \text{ (jam nyala)} \times \text{Daya Tersambung} \times \text{biaya pemakaian} \quad (15)$$

Maka besarnya rekening minimum atau abonemen yang harus dibayarkan perbulan adalah

$$\text{RM 1} = 40 \times 200 \times \text{Rp. } 1.444,7 = \text{Rp. } 11.557.600,- \quad (16)$$

Hasil dari perhitungan maka minimal pembayaran Listrik bulanan yang dibayarkan adalah Rp. 11.557.600,-.

Meskipun tidak adanya pemakaian dan atau pemakaian 1 sampai dengan 40 jam, apabila operasional melebihi batas kerja 40 jam maka perhitungan disesuaikan dengan perhitungan pemakaian kWhnya. Pemakaian daya aktif dapat diperhitungkan selama 1 bulan dapat diperhitungkan dengan mengalikan jam kerja operasional dan 30 hari kerja, sehingga perhitungan dapat dituliskan sebagai berikut :

Total Daya aktif = daya aktif SPAM SWRO × 8 jam × 30 hari (17)

= 124,84 kW × 8 jam × 30 hari = 29.961,6 kWh (18)

Pemakaian daya sesuai ketentuan Permen ESDM untuk P-1/TR 6.600 VA - 200 KVA adalah Rp. 1.444,70/KWH, maka pelanggan akan dikenai biaya KWH sesuai dengan Besarnya rekening minimum ditambah dengan besarnya kwh kelebihan dari 40 jam (sesuai jam rekening minimum) yaitu sebagai berikut:

Pemakaian KWH selama 40 jam pertama = 40 x 124,84 KW = 4.993,6 KWH
Besarnya KWH kelebihan dari 40 jam pertama = 29.961,6 KWH - 4.993,6 KWH = 24.968 KWH
Biaya penggunaan kwh perbulan = 24.968 KWH x Rp. 1.444,70/KWH = Rp.36.071.269,6
Biaya total estimasi pembayaran rekening listrik = RM 1 + biaya penggunaan Kwh = Rp. 11.557.600 + Rp.36.071.269,6 = Rp. 47.628.869,6.

Peraturan menteri ESDM per tahun 2021 yang sampai sekarang masih dipergunakan, dimana untuk daya 6.600 VA sampai 200 KVA seperti tabel tidak dikenakan penggunaan daya reaktif, namun dalam kajian ini akan dihitung besarnya penggunaan daya reaktif pada SWRO sebagai gambaran banyak sedikitnya penggunaan daya reaktif pada peralatan SWRO yang dapat menyebabkan drop tegangan dan sebagai dasar perhitungan jika suatu saat terjadi perubahan regulasi peraturan ESDM terbaru.
Biaya daya reaktif (KVAR) akan dikenakan PLN jika seandainya faktor daya jaringan instalasi listrik SWRO berada dibawah 0.85 sesuai dengan ketentuan Peraturan Menteri ESDM. Perhitungan daya aktif total perangkat SWRO Pulau Ende sesuai perhitungan sebelumnya adalah P= 124.84 KW maka daya semu yang dibutuhkan adalah

$$S = \frac{P}{Cos\ \emptyset} \quad (18)$$

$$S = \frac{124.84}{0,75} \quad (19)$$

$$S = 166,453 \text{ KVA} \quad (20)$$

Sehingga daya reaktif bisa didapatkan;

$$S = \sqrt{P^2 - Q^2} \quad (21)$$
$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (22)$$
$$Q = \sqrt{166{,}453^2 - 124{,}84^2} \quad (23)$$
$$Q = \sqrt{27706{,}71 - 15585{,}0256} \quad (24)$$
$$Q = 110{,}1 \text{ kVAR} \quad (25)$$

Jadi besarnya daya reaktif yang diperlukan oleh pengoperasian SWRO pulau Ende adalah sebesar 110,1 kVAR. Jika seandainya penggunaan SWRO dalam sehari adalah 8 jam maka besar penggunaan daya reaktif dalam sebulan adalah

Daya Reaktif = V × I × 8 jam × 30 hari
= Q × 8 Jam × 30 hari = 110,1 KVAR × 8 jam × 30 = 26.424 kWh

Jadi besar pemakaian Daya Reaktif Spam SWRO Ende dalam sebulan adalah sebesar 26.424 kWH, sedangkan Batas kVAR yang dibolehkan oleh PLN adalah pada faktor daya 0.85, jadi pemakaian kVAr yang dibatasi PLN adalah:

$$S = \frac{P}{Cos\ \varphi} \quad (26)$$
$$S = \frac{124.84}{0{,}85} \quad (27)$$
$$S = 146{,}87 \text{ KVA} \quad (28)$$

Maka kVAR SPAM SWRO pada Cos 0.85 adalah

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (29)$$
$$Q = \sqrt{(P^2 + S^2)} \quad (30)$$
$$Q = \sqrt{(124{,}84^2 + 146{,}87^2)} \quad (31)$$
$$Q = 77{,}37 \text{ KVAR} \quad (32)$$

Total batasan PLN pemakaian kVAR Penggunaan dalam sebulan (kVARH) adalah : 77,37 kVAR 9 jam x 30 hari =20.889,9 kVARh. Jadi kelebihan pemakaian kAVRH penggunaan adalah sebesar : 26.424 kVARH - 20.889,9 KVARH = 5.534,1 kVARh

Dari perhitungan diatas didapatkan terdapatnya selisih antara tegangan reaktif yang dipersyaratkan dengan tegangan reaktif konsumsi SWRO dimana tegangan konsumsi lebih besar dibandingkan tegangan dipersyaratkan. Jika dihitung berdasarkan besaran biaya Kelebihan sebesar 5.534,1 kVARH inilah yang dibebankan oleh PLN ke pelanggan Bila tegangan pelanggan dalam kontrak diatas 200 KVA. Sehingga kalau tarif denda pemakaian kelebihan kVARH sesuai ketentuan Permen ESDM untuk P-1/TR 6.600 VA - 200 KVA adalah Rp. 1.444,70/kVARH, maka pelanggan akan dikenai denda kVARH sebesar:

5.534,1kVARh x Rp. 1.444,70/kVARh = Rp. 7.995.114,27 (33)

Jadi jumlah denda saja diluar pemakaian adalah sebesar Rp. 7.995.114,27 per bulan. Sehingga sesuai dengan perhitungan di atas total biaya pembayaran jika tanpa kapasitor Bank yang menimbulkan nilai faktor daya dibawah 0,85 seperti yang dipersyaratkan peraturan Menteri ESDM adalah

Biaya listrik = Biaya pemakaian daya aktif + Biaya pemakaian daya reaktif (biaya perhitungan untuk listrik dengan daya diatas 200 KVA)

Biaya listrik = Rp. 47.628.869,6 + Rp. 7.995.114,27 = Rp. 55.623.983,87 (34)
Biaya di atas adalah hasil perhitungan jika listrik yang digunakan di atas 200 KVA (35)

SWRO pulau ende karena direncanakan menggunakan daya 200 KVA sesuai dengan permen ESDM seperti pada perhitungan sebelumnya hanya dikenakan biaya RM1 dan biaya pemakaian daya aktif yaitu;

Total Biaya Listrik = Rp. 47.628.869,6

Estimasi Besarnya Oendapatamn Pendistribusian Air Bersih Hasil SWRO

Sesuai data yang didapat dari di Dinas Catatan Sipil Kabupaten Ende per tanggal 30 juni 2022 didapatkan data sebagai berikut yang diperlihatakan oleh tabel 4.

Tabel 4. Data Kependudukan Pulau Ende

Kode Wilayah	Nama Wilayah	Laki-laki	Perempuan	Total Penduduk
530802	Pulau Ende	4209	4420	8629
5308022001	Aejeti	426	450	876
5308022002	Puutara	392	441	833
5308022003	Paderape	487	516	1003
5308022004	Ndoriwoi	609	614	1223
5308022005	Roruranggа	469	504	973
5308022006	Rendoraterua	523	522	1045
5308022007	Redory	583	629	1212
5308022008	Kazo Kapo	348	351	699
5308022009	Renga Menge	372	393	765

Merujuk pada tabel 4 diketahui total penduduk pulau ende adalah 8629 jiwa. Daearh sementera pendistribusian PDAM Pulau Ende adalah pada Desa Rendoraterua dengan jumlah penduduk sebesar 1045 jiwa. Berdasarkan acuan dari hasil pengkajian Puslitbang Permukiman Dep. Kimpraswil tahun 2010 dan Permen Kesehatan RI No.: 986/Menkes/Per/XI/1992, maka cara perhitungan total kapasitas aliran dapat dihitung berdasarkan standar tabel kebutuhan air per orang perhari

Tabel 5. Kebutuhan Air Desa Rendoraterua

No.	Penggunaan Gedung	Pemakaian Air (Liter/hari)	Satuan
1	Rumah tinggal	120	Liter/penghuni
2	Rumah susun	100	Liter/penghuni
3	Asrama	120	Liter/penghuni
4	Rumah Sakit	500	Liter/tempat tidur pasien
5	Sekolah Dasar	40	Liter/siswa
6	SLTP	50	Liter/siswa
7	SMU/SMK dan lebih tinggi	80	Liter/siswa
8	Ruko/Rukan	100	Liter/penghuni dan pegawai
9	Kantor/Pabrik	50	Liter/pegawai
10	Toserba, toko pengecer	15	Liter/m2
11	Restoran	150	Liter/kursi
12	Hotel berbintang	250	Liter/tempat tidur
13	Hotel Melati/Penginapan	150	Liter/tempat tidur
14	Gd. pertunjukan, Bioskop	10	Liter/kursi
15	Gd. Serba Guna	25	Liter/kursi
16	Stasiun, terminal	3	Liter/penumpang tiba dan pergi

17	Peribadatan	5	Liter/orang (belum dengan air wudhu)

Diasumsikan warga Redoraterua berlangganan air PDAM hanya 3/4 dari total jumlah penduduk desa Rendoraterua, maka jumlah warga yang berlangganan adalah 783.75 atau dibulatkan 784 orang. Sesuai dengan tabel di atas untuk rumah tinggal pemakaian air sebesar 120 liter per orang per hari dapat dihitung estimasi kebutuhan air bersih penduduk Desa Rendoraterua adalah Kebutuhan air = 784 × 120 liter/per orang/hari = 94.080 liter per hari = 94.08 kubik. Data yang didapatkan di masyarakat sekitar tentang pembelian air bersih per kubik adalah Rp. 50.000 per kubik sehingga kalau harganya disamakan maka penghasilan PDAM per hari adalah

$$94.08 \text{ kubik x Rp. } 50.000 \text{ /kubik} = \text{Rp. } 4.704.000 \quad (36)$$

Sehingga untuk 1 bulan pendapatannya adalah

$$\text{Rp. } 4.704.000 \text{ x } 30 = \text{Rp. } 141.120.000{,}00 \quad (37)$$

Kebutuhan produksi air sebanyak 94.08 m^3 perhari, SWRO minimal harus menghasilkan air bersih sebesar kebutuhan air ditambah 20 persen (menurut Sunarno, 2005) hal ini didasarkan untuk antisipasi kekurangan air akibat kebocoran penampung air maupun instalasi.

Jadi jumlah air yang harus disediakan PDAM adalah sebesar $94.08 + (94.08 \times 20\%) = 112{,}896\ m^3$ (38)

Untuk menghasilkan air sebanyak 112,896 m^3 lamanya SWRO harus beroperasi dapat dihitung seperti di bawah ini; Dimana diketahui spesifikasi perangkat SWRO dapat memproduksi air bersih dengan kapasitas 5 liter/ detik sehingga,

Lama beroperasi = Jumlah kebutuhan air / kapasitas produksi

$= 112{,}896\ m^3 / 5$ L/dt

$= \frac{112{,}896 \text{m3}}{18 \text{ m3}/jam}$

= 6,272 jam

Perhitungan pengeluaran biaya listrik perbulan selama beroperasi 6,272 jam dilakukan dengan cara perhitungan yang sama seperti biaya listrik di atas. Sehingga sesuai dengan perhitungan beroperasi selama 6,272 jam perhari didapat biaya pengeluaran listrik perbulan sebesar Rp 38.279.196,52 . Estimasi pemasukan dan pengeluaran SWRO Pulau Ende aalah sebagai berikut:

Tabel 6. Estimasi Pemasukan dan Pengeluaran SWRO

ITEM	UNIT	JUMLAH
Produksi	6.272 jam / hari	94.08 m^3
Pendapatan / hari	Rp. 50.000,00/ m^3	Rp 4.704.000,00
Pendapatan / Bulan	30 hari	**Rp 141.120.000,00**
Biaya Listrik	6.272 jam /hari/bulan	**Rp 38.279.196,52**
Biaya Pegawai	1 orang	**Rp. 5.000.000,00**
Penghasilan SWRO	Perbulan	**Rp 97.840.803,48**

Dari hasil perhitungan tersebut selanjutnya adalah memperhitungkan biaya maintenance dari SWRO berikut tabel 7 merupakan estimasi biaya maintenance.

Tabel 7. Biaya Maintenance

Item	Harga Unit	Pemasangan	Estimasi Penggantian	Harga Perbulan
Optimalisasi/Maintenance			**(Umur)**	**(Harga+Pemasangan)/ Umur**

Item	Harga Unit	Pemasangan	Estimasi Penggantian	Harga Perbulan
Pompa Feed Uf	317,412,214.87	11,259,620.22	5 Tahun	5,477,863.92
Pompa Backwash	483,424,661.27	22,136,765.52	5tahun	8,426,023.78
Pompa Intake	303,777,423	7,934,161.36	5 Tahun	5,195,193.07
Pompa Cip	132,467,842.89	7,934,161.36	5 Tahun	2,340,033.40
Pompa Feed Ro	158,683,227.15	7,934,161.36	5 Tahun	2,776,956.48
Pompa Hpp	728,881,500.00	22,136,765.52	5 Tahun	12,516,971.09
Turbo Charger	287,716,934.44	11,259,620.23	5 Tahun	4,982,942.58
Microscreen	412,382,005.20	4,799,862.00	5 Tahun	6,953,031.12
Uf Membran	545,100,000.00	10,689,300.00	3 Tahun	15,438,591.67
Ro Membran	428,571,000.00	26,723,250.00	3 Tahun	12,647,062.50
Filter Cip	45,909,600.00	2,375,400.00	3 Tahun	1,341,250.00
Plc Dan Display	245,887,101.77	6,274,968.66	5 Tahun	4,202,701.17
Dosing Pump	888,888.00 × 8	888,888.00	5 Tahun	237,036.80
Lain - Lain (Instalasi Perpipaan)	**121,400,664.58**		3 Tahun	3,372,240.68
	TOTAL			**85,907,898.26**

Merujuk dari tabel 7 diketahui total maintenance perbulan adalah sebesar Rp. 85.907.898,26. Biaya ini termasuk penggantian komponen sesuai dengan estimasi umur pakainya, serta pemasangan ulang jika diperlukan. Biaya perawatan ini harus diperhitungkan secara matang dalam evaluasi keberlanjutan sistem, karena efisiensi biaya maintenance akan berdampak langsung pada kemampuan SWRO untuk terus beroperasi tanpa gangguan jangka panjang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan penting terkait biaya operasional, waktu operasional yang ideal, dan strategi keberlanjutan operasional sistem SWRO ini.

1. Biaya Operasional SWRO Salah satu hasil utama dari penelitian ini adalah identifikasi komponen biaya yang menjadi tantangan utama dalam keberlanjutan operasional SWRO. Komponen terbesar dari biaya operasional adalah biaya listrik, yang dihitung berdasarkan konsumsi daya aktif dan daya reaktif dari berbagai perangkat utama dalam sistem SWRO. Berdasarkan perhitungan, total biaya listrik bulanan mencapai Rp. 47.628.869 untuk operasional 8 jam per hari selama 30 hari. Biaya ini mencakup tarif dasar listrik serta biaya tambahan akibat pemakaian daya reaktif yang tidak sepenuhnya terhindarkan dalam sistem kelistrikan SWRO. Selain listrik, komponen biaya lain yang signifikan adalah biaya pemeliharaan perangkat seperti pompa feed, pompa backwash, dan pompa high-pressure, yang perlu diganti secara berkala untuk menjaga kinerja optimal sistem.
2. Estimasi Waktu Operasional Dalam penelitian ini, waktu operasional yang ideal untuk mencapai break-even point atau titik impas juga dihitung dengan mempertimbangkan biaya dan pendapatan. Dengan kapasitas produksi air sebesar 2 x 2,5 liter per detik, SWRO di Pulau Ende menghasilkan sekitar 144.000 liter air bersih setiap harinya, yang dijual dengan harga Rp. 50.000 per kubik. Dari sini, pendapatan bulanan diperkirakan mencapai Rp. 141.120.000 jika operasi berlangsung tanpa hambatan. Untuk mencapai keseimbangan antara biaya dan pendapatan, hasil penelitian menunjukkan bahwa SWRO harus beroperasi minimal 596 jam per bulan (sekitar 20 jam per hari) agar dapat menutupi semua biaya operasional dan mencapai titik impas, tanpa keuntungan maupun kerugian.
3. Keberlanjutan Operasional SWRO Keberlanjutan operasional SWRO sangat bergantung pada efisiensi biaya operasional, terutama biaya listrik dan pemeliharaan. Berdasarkan hasil analisis, sistem SWRO di Pulau Ende memiliki potensi untuk beroperasi secara berkelanjutan dengan catatan adanya efisiensi dalam pengelolaan listrik dan pemeliharaan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan mengoptimalkan penggunaan energi, termasuk pemanfaatan teknologi hemat energi atau sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin untuk mengurangi beban biaya listrik. Penggunaan energy recovery device (ERD) yang sudah diterapkan di sistem SWRO juga dapat membantu mengurangi konsumsi energi dengan memanfaatkan kembali tekanan hidrolik dalam proses desalinasi.
   Selain itu, pemeliharaan yang teratur dan penggantian suku cadang tepat waktu sangat penting untuk menjaga keandalan sistem SWRO. Pemeliharaan preventif dapat mengurangi risiko kerusakan mendadak yang dapat menyebabkan peningkatan biaya perbaikan dan penurunan produktivitas.

4. Rekomendasi untuk Pengelolaan Berdasarkan temuan penelitian ini, beberapa rekomendasi diajukan untuk meningkatkan efisiensi operasional SWRO di Pulau Ende. Pertama, penting bagi pengelola untuk mengoptimalkan waktu operasional sesuai dengan kapasitas permintaan air di wilayah tersebut agar sistem dapat berjalan lebih efisien dan mengurangi pemborosan energi. Kedua, pengelolaan sumber daya manusia yang lebih efisien juga diperlukan, seperti mengalokasikan tenaga kerja sesuai dengan kebutuhan operasional sistem. Ketiga, investasi dalam teknologi tambahan seperti kapasitor bank dapat membantu mengurangi beban daya reaktif, sehingga biaya listrik dapat ditekan lebih rendah.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Kaabi, A., Al-Sulaiti, H., Al-Ansari, T., & Mackey, H. R. (2021). Assessment of water quality variations on pretreatment and environmental impacts of SWRO desalination. *Desalination*, *500*(October 2020), 114831. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114831

Caldera, U., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2016). Local cost of seawater RO desalination based on solar PV and wind energy: A global estimate. *Desalination*, *385*, 207–216. https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.004

Jafari, M., Vanoppen, M., van Agtmaal, J. M. C., Cornelissen, E. R., Vrouwenvelder, J. S., Verliefde, A., van Loosdrecht, M. C. M., & Picioreanu, C. (2021). Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands. *Desalination*, *500*(July 2020), 114865. https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114865

Li, Q., Li, K., & Yuan, C. (2024). Application Research of an Automatic Control Seawater Reverse Osmosis (SWRO) System Based on the Siemens PLC. *Global Journal of Earth Science and Engineering*, *11*(86), 1–18. https://doi.org/10.15377/2409-5710.2024.11.1

Missimer, T. M., & Maliva, R. G. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, *434*(April 2017), 198–215. https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012

Sarai Atab, M., Smallbone, A. J., & Roskilly, A. P. (2016). An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation. *Desalination*, *397*, 174–184. https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.020

OPTIMASI OVERDRAFT PADA PERENCANAAN WAKTU PELAKSANAAN PROYEK KONSTRUKSI DENGAN SISTEM PEMBAYARAN TERMIN

Ariany Frederika[1*], Anak Agung Gde Agung Yana[1], dan Ana Amatullah Khoiriyah[1]

[1]Program Studi teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran
e-mail: arianyfrederika@unud.ac.id
[1]Program Studi teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran
e-mail: agungyana@unud.ac.id
[1]Program Studi teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran
e-maIl: khoiriyahana21@gmail.com

ABSTRAK

Penjadwalan sebagai aspek yang krusial dalam pelaksanaan sebuah proyek konstruksi. saat perencanaan jadwal, variasi kegiatan dan sistem pembayaran akan berpengaruh terhadap *cash flow* proyek. Penjadwalan yang tidak direncanakan dengan baik dalam pelaksanaannya dapat menimbulkan aliran kas negative/*overdraft* negatif (biaya lebih besar dari modal), sehingga dapat menghambat pelaksanaan yang mengakibatkan keterlambatan dan penambahan biaya. Penelitian ini bertujuan mengoptimasi penjadwalan pada pekerjaan nonkritis terhadap overdraft yang terjadi dengan sistem pembayaran termin, sehingga tidak terjadi *overdraft negative*. Studi kasus dilakukan pada Proyek Pembangunan Rumah Susun T.36 Polres Jembrana-Bali, dengan nilai proyek sebesar Rp16.310.562.844,- dan kontrak menggunakan sistem pembayaran termin. Penjadwalan dilakukan dengan menggunakan *Microsoft Project* 2019 dengan memasukkan item pekerjaan, sumber daya dan biaya pelaksanaan. Kemudian dilakukan *trial and error* dengan beberapa strategi pengaturan pekerjaan nonkritis tertentu pada penjadwalan, seperti: mengubah durasi, waktu mulai, *predecessor* maupun *split task*, menyesuaikan dengan ketersediaan dana sehingga tidak terjadi *overdraft*. Hasil analisis diperoleh tujuh model penjadwalan setelah dilakukan *trial and error* pengaturan *overdraf* pada item pekerjaan nonkritis. Jadwal yang optimal didapat dengan durasi 210 hari bernilai Rp14.654.889.435,- tanpa adanya *overdraft negative.* Efisiensi biaya yang diperoleh dari optimasi *overdraft* pada perencanaan waktu dengan sistem pembayaran termin dalam penelitian ini adalah sebesar Rp50.053.029,- sebagai beban bunga yang ditiadakan akibat dari *overdraft negative* yang terjadi pada penjadwalan awal sebesar Rp5,005,302,935 (30,69%).

Kata kunci: Optimasi, *Overdraft, Cash Flow*, Penjadwalan, Efisiensi

1. PENDAHULUAN

Penilaian kualitas proyek konstruksi terdiri atas tiga aspek diantaranya mutu, biaya dan waktu (Ervianto, 2004). Proyek memiliki potensi nilai bisnis jika dilakukan secara efektif dan efisien sehingga diperlukan adanya manajemen proyek. Kelemahan penjadwalan menjadi aspek penyebab keterlambatan pada proyek gedung dalam kurun waktu tahun 2012 hingga 2015 dengan presentase mencapai 5,538% (Diah et al., 2019). Dalam perencanaan jadwal, *cash flow* suatu proyek akan dipengaruhi oleh variasi kegiatan proyek dan sistem pembayarannya. Penjadwalan yang tidak dilakukan dengan baik dapat menimbulkan *cashflow* negatif (*overdraft*) yang mengakibatkan berkurangnya keuntungan kontraktor. Penelitian terdahulu dilakukan pada Proyek Pembangunan Hotel Citadines Berawa Beach Bali. Astana et al. (2022), menyimpulkan bahwa untuk menghindari *overdraft* atau arus kas negatif pada proyek yang menggunakan sistem pembayaran *monthly payment* dilakukan melalui pengaturan ulang durasi pekerjaan di lintasan nonkritis, waktu tenggang dan *predecessor* jalur non kritis, serta *split task* (membagi beberapa sub pekerjaan dalam beberapa bagian).

Proyek Pembangunan Rumah Susun T.36 Polres Jembrana-Bali dengan nilai *real cost* sebesar Rp16.310.562.844,- dan waktu pelaksanaan 210 hari. Metode pembayaran yang digunakan dalam proyek tersebut adalah menggunakan sistem pembayaran termin dengan rincian pembayaran: *down payment* (DP) sebesar 20%, termin I sebesar 25% pada progress 30%, termin II sebesar 25% pada progres 55%, termin III sebesar 25% pada progres 80%, termin IV sebesar 20% pada progres 100% serta pembayaran sebesar 5% dengan masa retensi selama dua tahun. Pada pembayaran termin I – IV, masing-masing dilakukan pengurangan pembayaran sebesar 25% dari nilai uang muka sebagai pengembalian.
Berdasarkan data yang diperoleh dari kontraktor pelaksana, jadwal pelaksanaan yang dibuat untuk Proyek Pembangunan Rumah Susun T.36 Polres Jembrana TA. 2022 mengalami *overdraft* pada sebelas minggu

pelaksanaannya. Hal ini membuat penggunaan dana penerimaan termin proyek menjadi tidak optimal mengingat arus kas negatif dapat menimbulkan beban bunga pinjaman. Latar belakang tersebut menjadi tujuan penelitian ini yakni untuk merancang jadwal pelaksanaan proyek agar menghasilkan penggunaan biaya optimal dimana *overdraft* dapat dihindari sehingga dapat diperoleh efisiensi dari ketiadaan *overdraft* tersebut pada *cashflow* proyek.

2. MATERI DAN METODE

Sistem Pembayaran Termin

Sistem pembayaran memiliki peran yang sangat signifikan pada keberlangsungan sebuah proyek konstruksi. Segala bentuk faktor permasalahan dalam aspek pembayaran dapat mempengaruhi kinerja pelaksanaan proyek hingga mencapai presentase sebesar 15,9% (Istiana et al., 2020). Sistem pembayaran yang digunakan dalam sebuah pelaksanaan proyek akan mempengaruhi aliran kas proyek.
Sistem pembayaran termin merupakan skema pembayaran dengan sistem bertahap sesuai dengan kontrak yang sudah disepakati. Karena pembayaran dilakukan dengan bertahap maka akan terdapat istilah termin pertama, termin kedua dan seterusnya menyesuaikan isi kontrak. Pembayaran termin dilakukan ketika proyek sedang berjalan sehingga pembayaran yang dilakukan sebelum proyek dilaksanakan disebut uang muka.
Penelitian yang dilakukan Wirahman (2015) mengenai hubungan metode pembayaran terhadap *cash flow* optimal pada studi kasus proyek pembangunan Gedung Pengadilan Negeri Praya menunjukkan bahwa sistem pembayaran termin berpotensi menghasilkan keuntungan yang lebih besar pada kontraktor. Variasi yang dibuat dengan berbagai sistem pembayaran dan bentuk pengaturan variasi kegiatan proyek menghasilkan keuntungan yang sama tetapi besaran *overdraft* berbeda.

Aliran Kas

Aliran kas dapat diartikan sebagai kondisi aktual dari pemasukan maupun pengeluaran uang yang terjadi dalam jangka waktu tertentu. Aliran kas melibatkan nilai uang muka, modal kerja, biaya produksi, biaya operasional dan besaran pendapatan (Soeharto, 1999). Dalam sebuah proyek konstruksi, aliran kas masuk diperoleh dari pembayaran oleh pihak *owner*. Sistem pembayaran yang digunakan dalam kontrak akan berpengaruh besar terhadap kondisi ini. Adapun aliran kas keluar diperhitungkan sebagai biaya operasional proyek, baik biaya langsung maupun tak langsung serta biaya *overhead.*

Overdraft

Dalam pelaksanaan proyek konstruksi, *overdraft* adalah nilai negatif dari *cash flow* proyek setelah diperhitungkan nilai pembayaran *owner* terhadap pengeluaran yang akan dilakukan, sehingga merupakan kewajiban kontraktor untuk menyiapkan biaya terlebih dahulu sebelum adanya penerimaan dari *owner* (Halpin, 2011). Agar nilai kredit bank yang harus dibuat dapat diperkirakan, nilai *overdraft* maksimum yang mungkin terjadi selama pelaksanaan proyek perlu diperhitungkan.

Overdraft muncul akibat ketersediaan dana dalam suatu proyek tidak mencukupi untuk melanjutkan pelaksanaan proyek sebelum pembayaran *owner* yang selanjutnya. Kendati demikian, proyek harus tetap berjalan sehingga pihak kontraktor melakukan pengadaan biaya. Umumnya, pihak kontraktor akan mengajukan persetujuan dengan bank garansi agar sebelum *overdraft* terjadi, pihak kontraktor dapat mengajukan pencairan dana sehingga proyek tetap berjalan. Kondisi ini nantinya menimbulkan beban bunga pinjaman dengan besaran suku bunga sesuai dengan bank yang digunakan.

Program Microsoft Project 2019

Program *Microsoft Project* adalah program perangkat lunak dari Microsoft yang dapat dioperasikan untuk manajemen proyek. *Microsoft Project* dapat membantu merencanakan rangkaian pekerjaan dalam proyek untuk menjaring dan memantau sumber daya, baik tenaga kerja, material maupun peralatan (Arifudin, 2012).

Penyusunan jadwal rencana sebuah proyek konstruksi pada software Microsoft Project dimulai dengan memasukkan jenis pekerjaan, durasi kegiatan, waktu mulai kegiatan serta *predecessor* (hubungan antar pekerjaan) dalam lembaran kerja. *Microsoft Project* akan langsung menampilkan *Gantt Chart* dari item pekerjaan yang di-*input* tersebut. Detail pekerjaan serta durasi baik waktu mulai maupun berakhirnya sebuah pekerjaan akan diproyeksikan dengan jelas. Setelah menyusun pekerjaan dengan *Microsoft Project*, pekerjaan mana saja yang termasuk dalam kegiatan kritis atau pekerjaan tanpa waktu tenggang dapat diidentifikasi (Frederika, 2010).

Pengolahan biaya pada *Microsoft Project* dapat dilakukan dengan memasukkan elemen-elemen sumber daya, baik material maupun tenaga kerja berikut dengan biaya per satuannya. Koefisien dari masing-masing elemen ini disesuaikan dengan volume pekerjaan dan AHSP dapat diinput pada *gantt chart* di menu bar utama. Biaya pada tiap satuan pekerjaan akan diperhitungkan secara otomatis oleh Microsoft Project sehingga pengeluaran tiap satuan waktunya dapat diperhitungkan. Dalam melakukan tindakan ini, *Microsoft Project* memiliki fitur *Report* dengan

beberapa sub-fitur diantaranya *Budget Cost Report*. Fitur ini menyajikan data biaya per satuan waktu yang diinginkan untuk dapat digunakan sebagai acuan perhitungan.

Pengumpulan Data

Data yang diaplikasikan pada penelitian ini terdiri dari data primer berupa hasil wawancara mengenai detail sistem pembayaran yang diperoleh dari staf pelaksana, dan data sekunder meliputi: *Time Schedule*, difungsikan untuk mengetahui item pekerjaan dan durasi pelaksanaan proyek; RAB, untuk mengetahui nilai proyek dan besaran keuntungan; Kontrak, untuk mengetahui system pembayaran dan masa pemeliharaan proyek; Gambar Kerja, digunakan untuk acuan logika ketergantungan antar pekerjaan pada pelaksanaan proyek.

Metode Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan menganalisis data-data yang telah dikumpulkan. Langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai RAP

   Nilai Rencana Anggaran Pelaksanaan dihitung dengan asumsi keuntungan kontraktor adalah sebesar 10%.

   $$RAP = 90\% \times RAB \quad (1)$$

2. Membuat variasi model penjadwalan dalam program Microsoft Project 2019 dengan memasukkan item pekerjaan, durasi, biaya dan sumber daya sesuai dengan data yang ada.
3. Menghitung *cash flow*.
4. Mengidentifikasi *overdraft* dan melakukan *trial and error* optimasi *overdraft* pada penjadwalan.

Tahapan Analisis *Cash Flow*

Analisis *cash flow* melibatkan perhitungan antara pengeluaran proyek dengan penerimaan termin. Detail perhitungan tersebut adalah sebagai berikut:

1. *Down Payment* (DP)

   $$DP = (20\% \times RAB) \quad (2)$$

2. Penerimaan Termin

   $$\text{Penerimaan Termin} = \text{Presentase Termin} \times RAB - (25\% DP) \quad (3)$$

3. Pengeluaran Mingguan

   $$\text{Pengeluaran} = \text{Bobot mingguan} \times RAP \quad (4)$$

4. Retensi

   $$\text{Retensi} = 5\% \times RAB \quad (5)$$

5. *Cash flow*

   $$\textit{Cash flow} = \text{kumulatif penerimaan} - \text{pengeluaran} \quad (6)$$

6. *Overdraft*

   Overdraft diidentifikasi melalui adanya aliran kas negatif.

7. Total anggaran yang digunakan dalam perhitungan penerimaan adalah RAB dan pengeluaran diperhitungkan dengan RAP.

Perhitungan *cash flow* dilakukan pada masing-masing penjadwalan untuk mengidentifikasi keberadaan *overdraft*. Penjadwalan dilakukan ulang sampai aliran kas tidak mengalami *overdraft*. Hal ini diupayakan dengan menerapkan beberapa strategi seperti mengubah durasi, tanggal mulai, *predecessor* maupun memecah pekerjaan menjadi beberapa sub pekerjaan. Strategi tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan bobot pekerjaan dengan ketersediaan dana pada minggu pelaksanaan.

3. ANALISIS

Input Penjadwalan

Perencanaan jadwal proyek diolah dengan memasukkan item pekerjaan, durasi serta sumber daya sesuai dengan data *time schedule* ke program Microsoft Project 2019. Koefisien masing-masing sumber daya dimasukkan sesuai dengan volume dan durasi yang direncanakan. Jalur kritis dan non kritis dapat diidentifikasi berdasarkan data hubungan setiap jenis pekerjaan dari proyeksi data tersebut.

Analisis *Cash Flow*

Model penjadwalan yang telah dibuat dalam program Microsoft Project 2019 dapat diekspor perhitungan pengeluaran mingguannya dengan fitur *Budget Cost Report*. Luaran ini dalam bentuk Microsoft Excel kemudian dapat digunakan untuk perhitungan *cash flow*. Pengajuan penerimaan termin dapat dilakukan ketika progres sudah sesuai dengan kesepakatan. Penerimaan diasumsikan selambat-lambatnya tiga hari setelah pengajuan progres. Data perhitungan ini diproyeksikan dalam bentuk grafik yang menunjukkan hubungan perbandingan *cash flow* dan *outflow* mingguan proyek.

Perhitungan *Cash Flow Schedule* Awal

Schedule awal memiliki durasi 210 hari dengan sumber daya sesuai RAP senilai Rp14.654.889.435,-. *Schedule* awal akan menjadi acuan dalam penjadwalan model *trial and error* berikutnya. Penjadwalan ini dilakukan melalui program Microsoft Project 2019 dengan pengaturan kalender tujuh hari kerja dan sumber daya diasumsikan selalu tersedia. RAP diperoleh dengan penurunan koefisien AHSP sebesar 10%.

Cash Out

Cash out dalam proyek adalah biaya kumulatif mingguan dari pelaksanaan proyek. Besarnya diperhitungkan dengan:

$$\textit{Cash out} = \text{bobot mingguan x RAP} \tag{7}$$

Besaran *cash out* dapat dianalisis dengan memproyeksi data dari Microsoft Project menggunakan fitur *Budget Cost Report* dan diolah dalam Microsoft Excel.

Cash In

Cash in dalam proyek adalah pembayaran termin oleh *owner* dimana terbagi menjadi:

1. Uang Muka = 20% x RAB
2. Termin = Persentase Termin x RAB – (25% uang muka)
3. Retensi = 5% x RAB

Uang muka diasumsikan telah dibayarkan sebelum proyek dilaksanakan. Penerimaan termin diasumsikan terealisasi selambat-lambatnya tiga hari setelah pengajuan.

Berdasarkan kontrak, retensi sebesar 5% diberikan setelah masa pemeliharaan yakni selama 2 tahun.

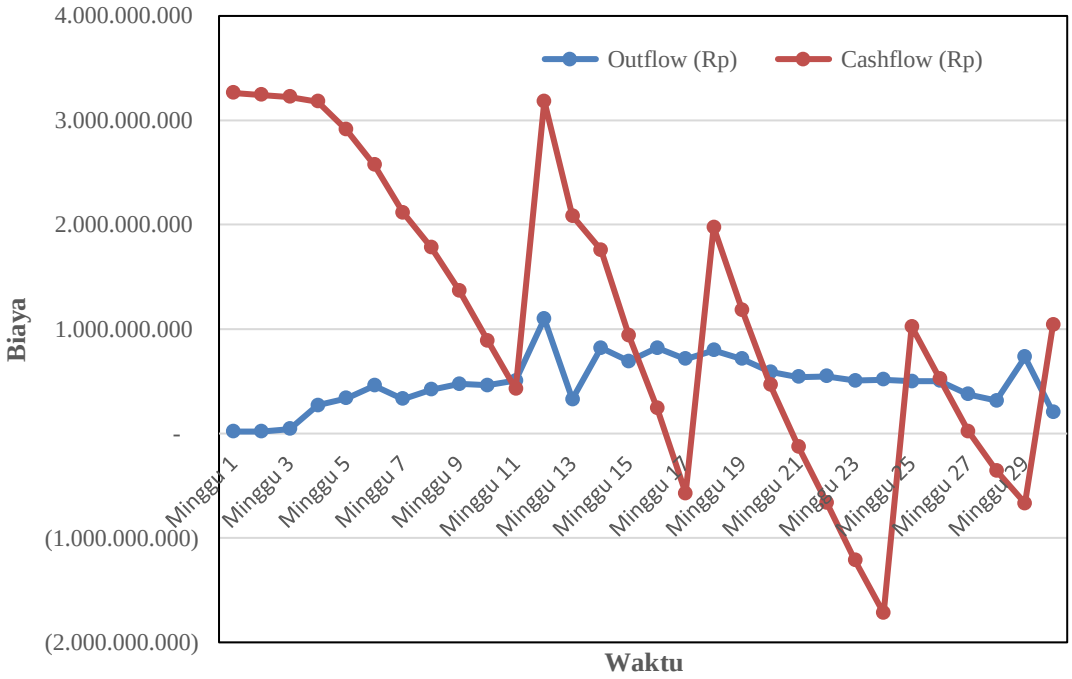
Cash Flow

Nilai *cash flow* diperhitungkan dengan:

$$\textit{Cash Flow} = \textit{Cash In} - \textit{Cash out} \tag{8}$$

Apabila *cash flow* bernilai positif, proyek dapat dilanjutkan menggunakan nilai kas yang ada. Namun, apabila *cash flow* bernilai negatif (*overdraft*), akan menjadi kebutuhan kontraktor untuk menyediakan dana agar proyek dapat tetap berjalan. Salah satu caranya adalah mengajukan pinjaman bank. Dampak dari tindakan ini akan menimbulkan beban bunga bank yang mengakibatkan keuntungan kontraktor berkurang.

Berdasarkan analisis c*ash flow*, *schedule* awal mengalami *overdraft* sebesar Rp5,005,302,935 pada sebelas minggu pelaksanaannya. Grafik perhitungan *cash flow schedule* awal titik terjadinya *overdraft* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik titik-titik *overdraft* pada *Cash flow Schedule* Awal

***Trial and error* Penjadwalan**

Penjadwalan ulang ditargetkan untuk memperoleh jadwal yang optimal tanpa mengalami *overdraft* negatif. Upaya ini melibatkan beberapa strategi pengaturan pada pekerjaan nonkritis dalam penyusunan jadwal. Tindakan strategi yang dilakukan dalam proses ini diantaranya:

1. Mengganti durasi pekerjaan, sehingga pengeluaran kumulatif mingguan dapat diperbesar maupun diperkecil nilainya.
2. Mengubah waktu mulai pekerjaan, sehingga kondisi aliran kas dapat disesuaikan.
3. Mengubah *predecessor*, sehingga lonjakan pengeluaran akibat *workload* yang tinggi dapat diminimalisir.
4. Melakukan *split task*, sehingga volume pekerjaan yang terlalu besar dapat dipecah menjadi beberapa minggu pengeluaran kas.

Tindakan strategi ini diterapkan dengan mempertimbangkan bobot masing-masing pekerjaan dengan penyesuaiannya terhadap ketersediaan kas.

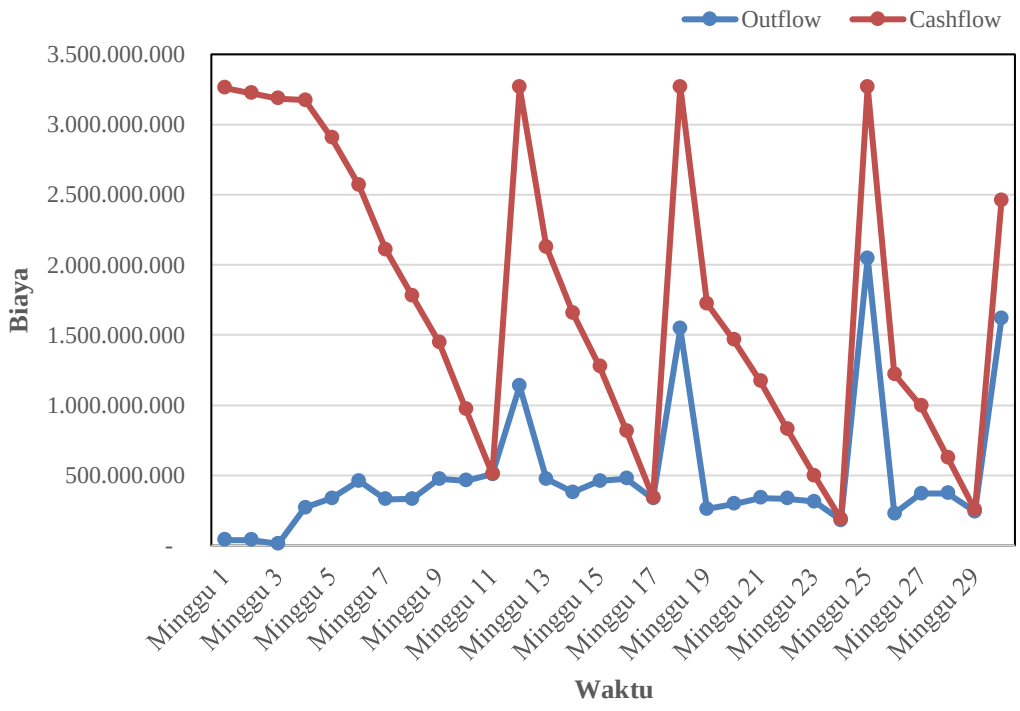
Hasil perhitungan pada *trial and error* menghasilkan variasi model jadwal dengan *overdraft* dan berdampak menanggung beban bunga pinjaman bank. Pada *trial and error* pertama, *overdraft* masih terjadi pada sembilan minggu dari sebelas minggu pada penjawalan awal. Total *overdraft* yang terjadi pada model penjadwalan ini adalah sebesar Rp4.200.537.509,- dan menimbulkan bunga bank senilai Rp42.005.371,-. Penjadwalan kembali dilakukan pada trial and error kedua terjadi overdraft negatif pada empat minggu dengan nilai sebesar Rp2,148,774,647 yang menimbulkan bunga bank sebesar Rp21,487,746. Demikian seterusnya dilakukan optimasi *overdraft* agar didapat *cash flow* yang tidak mengalami *overdraft.* Proses *trial and error* optimasi *overdraft* pada penjadwalan, diperoleh jadwal optimal pada *trial and error* ke-7. Rekapitulasi *trial and error* dengan nilai overdraft dan bunga yang terjadi serta efisiensi akibat bunga Bank dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Rekapitulasi Proses *Trial and Error* optimasi *overdraft*

Keterangan	Aliran Negatif (Minggu ke-)	*Overdraft* (Rp)	Bunga Bank (Rp)	Efisiensi (Rp)
Schedule Awal	11, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29	**5,005,302,935**	**50,053,029**	0
Trial 1	16, 17, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 29	4,200,537,138	42,005,371	8,047,658
Trial 2	15,20,21,22	2,148,774,647	21,487,746	28,565,283
Trial 3	20,21,27	1,909,648,128	19,096,481	30,956,548
Trial 4	15,20,	1,591,191,521	15,911,915	34,141,114
Trial 5	10, 11, 15, 16,17,18,19, 20, 21, 22, 23, 26, 27	10,985,033,829	109,850,338	-59,797,309
Trial 6	11, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 27	9,174,180,916	91,741,809	-41,688,780
Trial 7	-	0	0	**50,053,029**

Perhitungan *Cashflow Schedule* Akhir

Schedule akhir memiliki durasi 210 hari yang disusun dengan sumber daya sesuai RAP senilai Rp14.654.889.435,-. *Schedule* akhir diperoleh setelah melalui tujuh kali *trial and error* sehingga *overdraft* tidak lagi terjadi. Penjadwalan ini dilakukan melalui program Microsoft Project 2019 dengan pengaturan kalender tujuh hari kerja dan sumber daya diasumsikan tidak terbatas. RAP diperoleh dengan penurunan koefisien AHSP sebesar 0,9x. Pada pekerjaan yang mengalami perubahan durasi, dilakukan pengaturan alokasi tenaga kerja karena Microsoft Project mengkalkulasikan biaya dengan mengalikan harga satuan sumber daya dengan alokasinya dan durasi harian. Perhitungan *cash flow schedule* awal dan *schedule* akhir proyek dikalkulasikan dengan cara yang sama. Pada *schedule* akhir, diperoleh jadwal optimal dimana *overdraft* tidak lagi terjadi. Hal ini menjadikan keuntungan kontraktor tidak berkurang untuk dialokasikan pada beban bunga bank. Grafik hasil perhitungan *cash flow* jadwal optimal dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik titik-titik *overdraft* optimum pada *Cash flow schedule* akhir

Efisiensi Biaya

Nilai keuntungan diperoleh dari saldo akhir *cash flow* jadwal optimal yakni sebesar Rp1.655.673.409,-.

Persentase keuntungan = $\frac{\text{Rp1.655.673.409}}{\text{Rp16.310.562.844}}$ %

= 10%

Besar keuntungan tidak berubah dari *schedule* awal karena penelitian ini tidak bertujuan untuk memperbesar nilai keuntungan. Kendati demikian, simulasi penjadwalan dengan ketiadaan *overdraft* menimbulkan efisiensi sebesar Rp50.053.029,- karena tidak adanya beban bunga pinjaman bank yang harus dibayar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perhitungan *cash flow schedule awal*, terjadi aliran kas negatif di sebelas minggu pelaksanaan proyek (Tabel 1). *Overdraft* yang terjadi akibat aliran kas negatif tersebut adalah sebesar Rp5,005,302,935,-. (30,69%) dengan asumsi kontraktor menggunakan Bank Mandiri dengan suku bunga 1% per bulan sebagai bank garansi, akan timbul beban bunga bank sebesar Rp50,053,029,- Perencanaan ulang jadwal untuk menghindari adanya *overdraft* dilakukan dengan beberapa strategi, diantaranya adalah dengan mengubah durasi pekerjaan, mengganti *predecessor*, tanggal mulai pekerjaan dan melakukan membagi item pekerjaan (*split task*) menjadi beberapa bagian menyesuaikan bobot pekerjaan tersebut dengan ketersediaan dana.

Perhitungan pada *trial and error* menghasilkan tujuh variasi jadwal dimana beberapa diantaranya tetap mengalami *overdraft* dan masih mengakibatkan tanggungan beban bunga pinjaman bank. Pada *trial and error* pertama, *overdraft* masih terjadi pada sembilan minggu dan menimbulkan *overdraft* sebesar Rp4.200.537.138,- dan menimbulkan bunga bank senilai Rp42.005.371,-. *Trial and Error* ke-6 dilakukan percobaan penjadwalan dengan mengubah jalur kritis sehingga durasi proyek dapat berkurang. Namun, kondisi ini justru menghasilkan *overdraft* yang lebih tinggi dari jadwal awal. Penjadwalan kembali dilakukan sehingga didapat *schedule* akhir dengan *cash flow* yang tidak mengalami *overdraft* dimana waktu optimal sama dengan *schedule* awal yakni 210 hari. Pada *schedule* akhir ini, beberapa pekerjaan mengalami perubahan durasi maupun waktu mulai pekerjaan akibat beberapa tindakan yang dilakukan dalam *trial and error*. Pergeseran maupun pemecahan jadwal pada item pekerjaan dilakukan menyesuaikan bobot yang dapat ditanggung oleh kas yang tersedia.

Diantara contoh pekerjaan yang mengalami perubahan ini adalah pekerjaan Penataan Kawasan yaitu pada sub pekerjaan DPT. Pada *schedule* awal, pekerjaan ini baru dimulai pada bulan ke-6 pelaksanaan proyek. Pada *schedule* akhir, pekerjaan ini mengalami pergeseran hingga dimulai pada minggu ke-3 proyek, mengingat pekerjaan DPT berada di lokasi yang terpisah dengan bangunan utama sehingga pekerjaan sudah dapat dilaksanakan. Perubahan tanggal mulai pekerjaan juga terjadi pada pekerjaan arsitektur tiap lantai dan pengadaan K3. Pengadaan K3 dimulai pada minggu pertama dan pekerjaan arsitektur dilakukan dengan penyesuaian bobot terhadap ketersediaan dana. *Split task* juga dilakukan pada beberapa pekerjaan arsitektur menyesuaikan bobot tiap pekerjaan dan ketersediaan dana.

Schedule akhir terbentuk dengan menggunakan target capaian progress minggu penerimaan pada *schedule* awal sebagai acuan dan pembayaran termin diasumsikan juga demikian. Sehingga, progres termin I sebesar 30% ditargetkan pada Minggu ke-12, termin II sebesar 55% pada Minggu ke-18, termin III sebesar 80% pada Minggu ke-25 serta Termin keempat sebesar 100% pada Minggu ke-30 dengan pembayaran sesuai dengan minggu tersebut. *Schedule* akhir ini memiliki durasi 210 hari, sama seperti *schedule* awal namun dengan ketiadaan aliran kas negatif pada setiap minggunya.

Nilai keuntungan diperoleh dari saldo akhir *cash flow* pada jadwal optimal yaitu sebesar Rp1.655.673.409,- atau sebesar 10%. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan jadwal agar tidak terjadi *overdraft*, sehingga tidak terjadi penambahan keuntungan dibanding dengan jadwal awal. Namun, ketiadaan *overdraft* menimbulkan efisiensi sebesar Rp50.053.029,-. karena tidak adanya beban bunga pinjaman bank yang harus dibayar.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik simpulan bahwa: Hasil analisis diperoleh tujuh model penjadwalan setelah dilakukan *trial and error* pengaturan *overdraf* pada item pekerjaan nonkritis. Jadwal yang optimal didapat dengan durasi 210 hari bernilai Rp14.654.889.435,- tanpa adanya *overdraft negative*. Efisiensi biaya yang diperoleh dari optimasi *overdraft* pada perencanaan waktu dengan sistem pembayaran termin dalam penelitian ini adalah sebesar Rp50.053.029,- sebagai beban bunga yang ditiadakan akibat dari *overdraft negative* yang terjadi pada penjadwalan awal sebesar Rp5,005,302,935 (30,69%).

DAFTAR PUSTAKA

Arifudin, R. (2012). Optimasi Penjadwalan Proyek dengan Penyeimbangan Biaya Menggunakan Kombinasi CPM dan Algoritma Genetika. JURNAL MASYARAKAT INFORMATIKA, 2(4), 1–14.

Astana, I. N. Y., Gusti Ngurah Oka Suputra, I., & Sri Parthiswari, A. (2022). Perencanaan Waktu Pelaksanaan Proyek dengan Mempertimbangkan Metode Pembayaran. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 26, 84–165.

Diah, A. A., Dewi, P., Nadiasa, M., Eka, P., & Savitri, E. (2019). Faktor-Faktor Penyebab Keterlambatan Penyelesaian Proyek Gedung di Kabupaten Karangasem.

Arifudin, R. (2012). Optimasi Penjadwalan Proyek dengan Penyeimbangan Biaya Menggunakan Kombinasi CPM dan Algoritma Genetika. *JURNAL MASYARAKAT INFORMATIKA*, *2*(4), 1–14.

Astana, I. N. Y., Gusti Ngurah Oka Suputra, I., & Sri Parthiswari, A. (2022). Perencanaan Waktu Pelaksanaan Proyek dengan Mempertimbangkan Metode Pembayaran. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, *26*, 84–165.

Diah, A. A., Dewi, P., Nadiasa, M., Eka, P., & Savitri, E. (2019). *Faktor-Faktor Penyebab Keterlambatan Penyelesaian Proyek Gedung di Kabupaten Karangasem*.

Ervianto, W. I. (2004). *Manajemen Proyek Konstruksi*. Penerbit ANDI .

Halpin, D. W. (2011). *Construction Management* (4th ed.). Hamilton Printing.

Frederika, A. (2010). Analisis Percepatan Pelaksanaan dengan Menambah Jam Kerja Optimum pada Proyek Konstruksi. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 14, 113-126.

Istiana, F., Triwuryanto, H., & Novita Sari, S. (2020). *The Effect of Performance of Project Implementation with a Payment System Based on Termin in Building Construction Projects in DIY Province*.

PMI Indonesia. (2013). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide).* (5th ed.). Project Management Institute, Inc.

Soeharto, I. (1999). *Manajemen Proyek* (2nd ed.). PENERBIT ERLANGGA.

Tolangi JP Rantung, M. F., Langi, Jec., & Sibi, M. (2012). Analisis *Cash flow* Optimal pada Kontraktor Proyek Pembangunan Perumahan. In *Jurnal Sipil Statik* (Vol. 1, Issue 1).

Wirahman, L. W., Warka, I. G. P., &Apriliana, A. (2015). Pengaruh Sistem Pembayaran terhadap *Cash flow* Optimal pada Proyek Pembangunan Gedung Pengadilan Negeri Praya. *Spektrum Sipil*, *2*, 145–157.

Pemetaan Penerapan *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) dalam Strategi Pemeliharaan di Sektor Industri dan Infrastruktur: Analisis Visual dengan *VOSviewer*

Nectaria Putri Pramesti[1*], Harijanto Setiawan[2]

[1]Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,*
Jl. Babarsari No.44 Yogyakarta
***e-mail**: nectaria.putri@uajy.ac.id*
[2]Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,
Jl. Babarsari No.44 Yogyakarta
***e-mail**: harijanto.setiawan@uajy.ac.id*

ABSTRAK

Pemeliharaan infrastruktur merupakan faktor krusial dalam menjaga keandalan dan keberlanjutan aset publik. Dengan meningkatnya kompleksitas infrastruktur, pengambilan keputusan dalam strategi pemeliharaan menjadi lebih kompleks dan memerlukan evaluasi berbagai faktor. *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) telah diidentifikasi sebagai metode yang efektif untuk mendukung pengambilan keputusan tersebut. Penelitian ini mengeksplorasi bagaimana MCDM diterapkan dalam strategi pemeliharaan serta mengidentifikasi kerangka kerja dan metodologi yang paling efektif. Melalui analisis bibliometrik, penelitian ini menemukan bahwa MCDM, terutama melalui metode seperti AHP, TOPSIS, dan Fuzzy MCDM, memainkan peran penting dalam memprioritaskan tindakan pemeliharaan dan menilai risiko kegagalan aset berdasarkan kriteria seperti biaya, kondisi aset, serta dampak lingkungan. Selain itu, integrasi teknologi baru seperti *IoT* dan *Big Data* memungkinkan implementasi strategi pemeliharaan yang adaptif dan berkelanjutan. Namun, penelitian ini juga mengidentifikasi kesenjangan terkait kurangnya validasi empiris dan keterbatasan penerapan MCDM dalam berbagai sektor industri. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memperluas penerapan MCDM, terutama dalam konteks keberlanjutan jangka panjang dan pengurangan risiko.

Kata kunci: *Multi-Criteria Decision Making*, MCDM, Pemetaan, *Vosviewer*, bibliometrik, strategi pemeliharaan

1. PENDAHULUAN

Pemeliharaan infrastruktur, seperti bangunan, jembatan, jalan, dan jaringan energi, memainkan peran vital dalam memastikan keberlanjutan dan keandalan aset infrastruktur publik. Seiring dengan bertambahnya usia dan kompleksitas infrastruktur, serta meningkatnya tuntutan terhadap kinerja dan keamanan, pengambilan keputusan yang tepat dalam pemeliharaan menjadi semakin kritis. Pendekatan tradisional terhadap pemeliharaan sering kali tidak memadai karena tidak memperhitungkan berbagai faktor yang berkontribusi terhadap keputusan yang kompleks. Sebagai respons terhadap tantangan ini, *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) atau pengambilan keputusan multi-kriteria telah muncul sebagai metode yang efektif untuk mengevaluasi berbagai alternatif dan menetapkan prioritas berdasarkan beberapa kriteria. MCDM memungkinkan pengambil keputusan untuk mempertimbangkan berbagai aspek seperti biaya, risiko, keberlanjutan, dan kinerja dalam satu kerangka kerja yang terintegrasi, sehingga memastikan bahwa keputusan yang diambil lebih holistik dan berorientasi pada jangka panjang (Wang dkk 2020).

Dalam konteks pemeliharaan infrastruktur, penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa MCDM dapat digunakan secara efektif untuk mengembangkan strategi pemeliharaan yang lebih berkelanjutan dan efisien. Misalnya, penelitian oleh Zavadskas dkk (2016) mengembangkan model MCDM untuk memilih strategi pemeliharaan optimal untuk jembatan dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti kondisi fisik, biaya pemeliharaan, dan dampak lingkungan. Studi lain oleh Li dkk (2018) mengeksplorasi penggunaan *Analytic Hierarchy Process* (AHP), salah satu metode MCDM, untuk mengevaluasi berbagai alternatif pemeliharaan jalan raya berdasarkan kriteria seperti keselamatan, biaya, dan keberlanjutan.

Kombinasi metode ini dengan model pengambilan keputusan, studi kasus, dan penilaian keberlanjutan menunjukkan pendekatan yang holistik terhadap manajemen pemeliharaan. Studi-studi seperti yang dilakukan oleh Tran dkk (2024) dan Madanchian dkk (2023) juga menunjukkan bagaimana metode MCDM, seperti AHP dan TOPSIS, digunakan dalam manajemen aset dan pemeliharaan untuk membuat keputusan yang lebih baik dengan mempertimbangkan berbagai faktor dan kriteria. Temuan-temuan menunjukkan bahwa MCDM tidak hanya membantu dalam mengidentifikasi solusi yang paling efektif secara ekonomi tetapi juga dalam mempertimbangkan dampak jangka panjang dari keputusan pemeliharaan terhadap lingkungan dan masyarakat. Tabel 1 menunjukkan penelitian-penelitian mengenai sistematis review penerapan dan teknik MCDM di berbagai bidang.

Tabel 1. Penelitian-penelitian systematis review penerapan MCDM

Topik	Hasil	Referensi
MCDM dalam Desain Berkelanjutan	Membahas proses pengambilan keputusan berkelanjutan dengan kerangka MCDM seperti ANP/AHP, TOPSIS, BWM, dan mengidentifikasi peluang penelitian masa depan.	(Xu, Liu, & Zhu, 2023)
Tinjauan Komprehensif MCDM	Tinjauan perkembangan dan aplikasi MCDM di berbagai bidang serta tantangan dan tren riset, termasuk integrasi dengan teknologi baru.	(Sahoo & Goswami, 2023), (Budianto & Dewi, 2023)
MCDM dalam Keputusan Kesehatan	Meninjau 140 artikel tentang MCDM di sektor kesehatan, dengan AHP sebagai metode paling umum digunakan.	(Chakraborty, Raut, Rofin, & Chakraborty, 2023)
Tinjauan Bibliometrik MCDM (44 Tahun)	Analisis bibliometrik selama 44 tahun tentang MCDM, dengan AHP dan TOPSIS sebagai metode populer dan China sebagai negara terdepan dalam publikasi.	(Basílio, Pereira, Costa, Santos, & Ghosh, 2022)
Integrasi BIM dan MCDM di Industri AEC	Mengkaji sinergi MCDM dan BIM dalam AEC, dengan lima domain aplikasi utama dan strategi untuk meningkatkan integrasi keduanya.	(Tan, Mills, Papadonikolaki, & Liu, 2021)
Survei Teknik MCDM	Survei mendalam tentang teknik MCDM seperti AHP, ANP, ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS, dan VIKOR, serta klasifikasi berdasarkan metode perbandingan berpasangan, outranking, dan berbasis jarak.	(Azhar, Radzi, & Wan Ahmad, 2021)
MCDM dalam Logistik Terbalik	Tinjauan penerapan MCDM pada logistik terbalik, dengan daur ulang dan AHP sebagai topik dan metode yang paling banyak diteliti.	(Rezaei, 2015)

Oleh karena itu, penelitian ini berusaha untuk mengeksplorasi lebih lanjut bagaimana MCDM diterapkan dalam strategi pemeliharaan, serta untuk mengidentifikasi kerangka kerja dan metodologi yang paling efektif. Penelitian ini memperluas pemahaman tentang bagaimana MCDM dapat digunakan dalam strategi pemeliharaan dalam pengembangan model keputusan yang efektif.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Definisi

Multi-Criteria Decision Making (MCDM) adalah pendekatan dalam pengambilan keputusan yang melibatkan evaluasi dan pemilihan di antara sejumlah alternatif berdasarkan berbagai kriteria. MCDM sangat berguna dalam menangani masalah pengambilan keputusan yang kompleks di mana beberapa kriteria, yang bisa saling bertentangan, harus dipertimbangkan secara bersamaan. Tujuan utama dari MCDM adalah untuk membantu pengambil keputusan menemukan solusi optimal dengan mengevaluasi trade-off antara berbagai kriteria (Saaty & Vargas, 2012). Metode MCDM memungkinkan pengambil keputusan untuk memperhitungkan faktor kuantitatif seperti biaya dan waktu serta faktor kualitatif seperti kepuasan pelanggan dan keberlanjutan. MCDM digunakan dalam berbagai bidang, termasuk manajemen, teknik, ekonomi, dan perencanaan publik, untuk memastikan bahwa keputusan yang diambil mempertimbangkan semua aspek penting dari masalah yang dihadapi (Edmundas Kazimieras Zavadskas, Turskis, & Kildiene, 2014).

Jenis-jenis MCDM

Metode MCDM adalah pendekatan yang digunakan untuk membantu pengambil keputusan dalam memilih alternatif terbaik berdasarkan berbagai kriteria. Beberapa metode utama MCDM meliputi *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), dan *Analytic Network Process* (ANP). AHP menyusun masalah keputusan dalam hierarki dan menghitung peringkat alternatif berdasarkan bobot yang diberikan (Saaty & Vargas, 2012), sedangkan TOPSIS menentukan alternatif terbaik dengan mengukur jarak terhadap solusi ideal positif dan negatif (Edmundas Kazimieras Zavadskas et al., 2014). ANP merupakan perluasan dari AHP yang mempertimbangkan ketergantungan dan umpan balik antara elemen-elemen dalam hierarki(Saaty & Vargas, 2012).
Metode lain termasuk *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT), *Simple Additive Weighting* (SAW), dan *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART). MAUT mengukur preferensi pengambil keputusan berdasarkan beberapa atribut menggunakan fungsi utilitas, sementara SAW menghitung skor total alternatif berdasarkan bobot kriteria dan nilai kinerja (Monte & Almeida-filho, 2016). SMART adalah metode yang sederhana dan mudah digunakan, memberikan skor total dengan mengalikan nilai kriteria dengan bobotnya (Mardani dkk., 2015) dan (Cholil, Pinem, & Vydia, 2018). Selain itu, ada juga pendekatan fuzzy MCDM yang digunakan untuk mengukur kinerja keberlanjutan pemasok berdasarkan pendekatan *triple bottom line*, menunjukkan aplikasi MCDM dalam penilaian keberlanjutan (Govindan, Khodaverdi, & Jafarian, 2013). Selain itu metode berbasis logika fuzzy yang menggabungkan FAHP berbasis skala 3 poin, teori himpunan fuzzy, dan logika fuzzy untuk melakukan penilaian risiko secara lebih efisien selama konstruksi jembatan, dengan studi kasus pada Jembatan Aizhai di China (Cheng, Xu, & Chen, 2019). Semua metode ini menawarkan pendekatan berbeda dalam mengatasi keputusan multi-kriteria, memungkinkan fleksibilitas

dalam berbagai situasi pengambilan keputusan.

Strategi pemeliharaan
Strategi pemeliharaan adalah pendekatan yang dirancang untuk memastikan bahwa aset, seperti infrastruktur, mesin, atau sistem, berfungsi optimal sepanjang siklus hidupnya. Strategi ini mencakup berbagai metode, prosedur, dan kebijakan untuk melakukan pemeliharaan guna mencegah kerusakan, meminimalkan downtime, dan memperpanjang umur aset (ISO, 2015)

Penerapan MCDM dalam pemeliharaan infrastruktur:
Penggunaan MCDM dalam pemeliharaan infrastruktur telah terbukti membantu dalam membuat keputusan yang lebih baik terkait dengan alokasi sumber daya dan prioritas tindakan pemeliharaan. Menurut Zavadskas dkk (2016), MCDM digunakan untuk memilih strategi pemeliharaan optimal untuk jembatan dengan mempertimbangkan berbagai faktor seperti kondisi fisik, biaya pemeliharaan, dan dampak lingkungan. Sementara itu, Li dkk (2018) menunjukkan bahwa metode AHP, salah satu metode MCDM yang populer, efektif dalam mengevaluasi alternatif pemeliharaan jalan raya berdasarkan kriteria seperti keselamatan, biaya, dan keberlanjutan. Studi-studi ini menegaskan bahwa MCDM dapat membantu organisasi mengatasi tantangan dalam manajemen pemeliharaan dengan memberikan cara yang sistematis untuk mengevaluasi berbagai pilihan.

Penerapan MCDM pada Penelitian Terdahulu
Meskipun penerapan MCDM dalam pemeliharaan infrastruktur telah banyak diteliti, masih ada beberapa celah penelitian yang signifikan. Salah satu celah utama adalah kurangnya integrasi antara metode MCDM tradisional, seperti AHP dan TOPSIS, dengan teknologi canggih seperti *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML), yang dapat meningkatkan akurasi dan efisiensi pengambilan keputusan (Tan dkk, 2021). Selain itu, penelitian yang ada kurang mengeksplorasi penerapan MCDM dalam konteks keberlanjutan jangka panjang dan pengurangan risiko, serta belum menyediakan kerangka kerja komprehensif yang menggabungkan aspek teknis, ekonomi, keberlanjutan, dan risiko secara holistik (Wang dkk., 2020). Lebih jauh lagi, ada keterbatasan dalam representasi berbagai jenis infrastruktur dan konteks geografis dalam studi-studi yang ada, menunjukkan perlunya penelitian yang lebih komprehensif dan beragam untuk mengembangkan panduan pemeliharaan yang lebih adaptif dan luas di berbagai situasi.
Berikut adalah tabel yang merangkum beberapa penelitian terkait dengan penerapan MCDM dalam pemeliharaan infrastruktur. Tabel 2 ini menguraikan berbagai aspek penelitian yang terkait dengan penggunaan MCDM dalam pemeliharaan infrastruktur, mencatat apa yang sudah dicapai oleh penelitian yang ada, dan mengidentifikasi kekurangan yang perlu diatasi melalui penelitian di masa depan.

Tabel 2. Penelitian terdahulu terkait penerapan MCDM dalam pemeliharaan

Aspek Penelitian	Penelitian yang Ada	Referensi
Metode MCDM yang Digunakan	Mayoritas penelitian menggunakan metode tradisional seperti AHP dan TOPSIS.	(Saaty & Vargas, 2012), (Edmundas Kazimieras Zavadskas et al., 2014
Fokus pada Keberlanjutan	Beberapa penelitian telah mempertimbangkan keberlanjutan sebagai salah satu kriteria dalam MCDM.	(Govindan et al., 2013).
Variasi Studi Kasus	Studi kasus yang ada cenderung berfokus pada infrastruktur spesifik seperti jembatan dan jalan raya.	(Prastika, Junaedi, & Imrona, 2016), (Cheng et al., 2019),
Evaluasi Risiko dalam Pemeliharaan	Evaluasi risiko telah diidentifikasi sebagai elemen penting dalam beberapa studi terkait MCDM.	(Cheng et al., 2019)
Pengembangan Model Holistik	Beberapa penelitian telah mengembangkan model MCDM untuk pemeliharaan dengan mempertimbangkan berbagai faktor.	(Wang dkk., 2020), (E. K. Zavadskas et al., 2016)

3. METODE PENELITIAN
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis bibliometrik untuk mengeksplorasi bagaimana MCDM diterapkan dalam strategi pemeliharaan. Beberapa tahapan dilakukan dalam penelitian ini yaitu tahap pertama melakukan pengumpulan data literatur menggunakan database Scopus dengan *software Publish or Perish* untuk mengumpulkan data literatur yang relevan. Kata kunci seperti "*Multi-Criteria Decision Making AND Maintenance*" digunakan untuk pencarian. Rentang waktu publikasi dibatasi dari tahun 2010 hingga 2024 untuk mendapatkan tren terbaru dalam penelitian. Tahap kedua adalah *Preprocessing Data* dengan mengunduh artikel dalam format RIS

(*Research Information Systems*) menghasilkan total 200 artikel. Serta mengimpor file RIS ke dalam VOSviewer setelah melakukan pembersihan data untuk menghilangkan duplikasi dan artikel yang tidak relevan. Hanya data yang memiliki informasi bibliografis lengkap (judul, abstrak, kata kunci, penulis, tahun publikasi, dan referensi) yang digunakan untuk analisis lebih lanjut. Tahap ketiga merupakan analisis bibliometrik dengan *VOSviewer*. Analisis jaringan dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan antara kata kunci, topik penelitian, dan tren penelitian utama menggunakan *VOSviewer*. Visualisasi jaringan kata kunci, *co-citation*, dan analisis bibliometrik lainnya dihasilkan untuk memahami distribusi penelitian dan identifikasi gap penelitian. Identifikasi *cluster* kata kunci untuk mengelompokkan topik penelitian yang sering muncul bersama, yang memberikan wawasan tentang fokus dan hubungan antar topik. Tahap keempat merupakan interpretasi hasil visualisasi untuk mengidentifikasi tren penelitian, area yang kurang tereksplorasi, dan potensi pengembangan lebih lanjut dalam konteks MCDM dan pemeliharaan. Menggunakan hasil analisis untuk mengembangkan pemahaman lebih mendalam tentang bagaimana MCDM diterapkan dalam strategi pemeliharaan. Tahap kelima adalah menyimpulkan temuan utama dari analisis bibliometrik dan memberikan rekomendasi untuk penelitian masa depan berdasarkan identifikasi gap penelitian dan tren yang ditemukan. Merekomendasikan kerangka kerja dan metodologi yang paling efektif untuk penerapan MCDM dalam konteks pemeliharaan.

4. ANALISA DATA

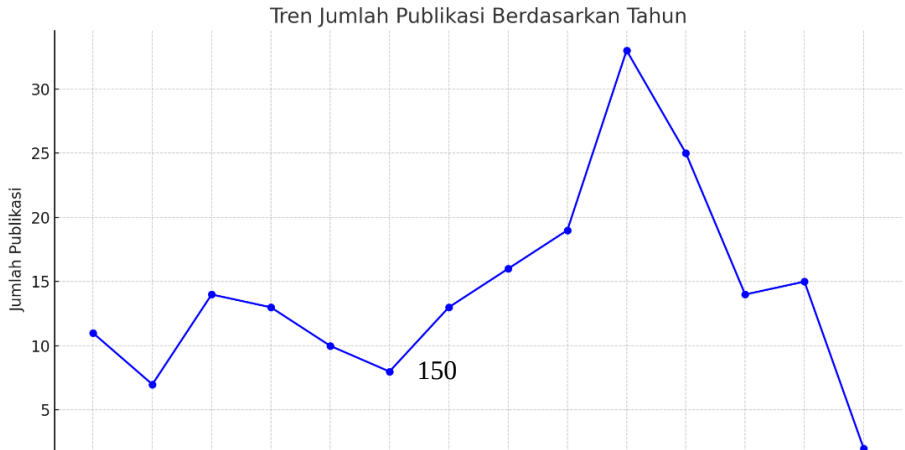
Pola dan Tren Publikasi per Tahun

Pada bagian ini, dilakukan analisis data untuk memahami pola, tren, dan memetakan publikasi-publikasi yang terindeks Scopus terkait dengan penggunaan MCDM dalam konteks pemeliharaan. Pada Tabel 3, ditampilkan 200 artikel jurnal internasional yang terindeks Scopus. Artikel-artikel ini diidentifikasi melalui pengumpulan data menggunakan *software Publish or Perish* selama periode tahun 2010 hingga 2024. Analisis ini menunjukkan jumlah publikasi yang berfokus pada topik penggunaan MCDM dalam konteks pemeliharaan, yang telah dipublikasikan di berbagai jurnal internasional. Data ini memberikan gambaran tentang perkembangan dan minat akademis terhadap topik tersebut selama rentang waktu 14 tahun terakhir, menunjukkan bagaimana penelitian dalam bidang ini telah mengalami pertumbuhan atau perubahan fokus sepanjang periode tersebut.

Tabel 3. Publikasi terindex Scopus MCDM dalam konteks pemeliharaan

No.	Tahun	Jumlah Publikasi Terindex Scopus	No.	Tahun	Jumlah Publikasi Terindex Scopus
1	2010	11	8	2017	16
2	2011	7	9	2018	19
3	2012	14	10	2019	33
4	2013	13	11	2020	25
5	2014	10	12	2021	14
6	2015	8	13	2022	15
7	2016	13	14	2023	2
Total Publikasi		**200**			

Gambar 1 menunjukkan bahwa tren penelitian tentang penggunaan MCDM dalam konteks pemeliharaan cenderung berfluktuasi selama periode tersebut, dengan peningkatan yang signifikan hingga mencapai puncak pada tahun 2019, kemudian menurun secara drastis setelahnya. Tahun 2012, terjadi peningkatan signifikan dalam jumlah publikasi, dengan jumlah publikasi yang meningkat dari 7 pada tahun 2011 menjadi 14 pada tahun 2012, atau peningkatan sebesar 100%. Ini menunjukkan lonjakan yang besar dalam aktivitas publikasi atau penelitian pada tahun tersebut. Tahun 2019, da peningkatan lain yang cukup besar dalam jumlah publikasi, dari 19 publikasi pada tahun 2018 menjadi 33 publikasi pada tahun 2019, atau peningkatan sebesar 73,68%. Ini juga menandakan adanya dorongan yang signifikan dalam aktivitas publikasi atau penelitian di tahun ini. Secara keseluruhan, tahun 2012 dan 2019 adalah tahun-tahun dengan peningkatan jumlah publikasi yang menonjol, menunjukkan periode dengan aktivitas penelitian yang lebih tinggi atau mungkin peningkatan dalam jumlah jurnal yang diterbitkan.



Gambar 1. Grafik Tren Jumlah Publikasi

Pola dan Tren Jenis MCDM yang Digunakan

Berdasarkan analisis judul publikasi, berikut adalah jenis-jenis metode MCDM yang paling sering digunakan dalam publikasi yang ada, dapat dilihat pada Tabel 4. Dari data ini, metode berbasis Fuzzy merupakan yang paling sering digunakan dalam publikasi yang terkait dengan MCDM, diikuti oleh AHP dan TOPSIS. Jumlah total yang dihitung berdasarkan jenis MCDM yang ditemukan dalam judul hanya mencerminkan publikasi yang secara eksplisit menyebutkan metode MCDM dalam judulnya. Beberapa publikasi mungkin tidak mencantumkan metode MCDM secara spesifik dalam judul atau abstrak, sehingga tidak terhitung dalam analisis kata kunci tersebut.

Tabel 4. Jumlah publikasi berdasarkan jenis MCDM

No.	Jenis MCDM	Jumlah Publikasi	No.	Jenis MCDM	Jumlah Publikasi
1	COPRAS	3	6	ELECTRE	3
2	AHP	13	7	SAW	1
3	TOPSIS	12	8	ANP	6
4	VIKOR	4	9	Fuzzy	44
5	PROMETHEE	1	10	Hybrid	12

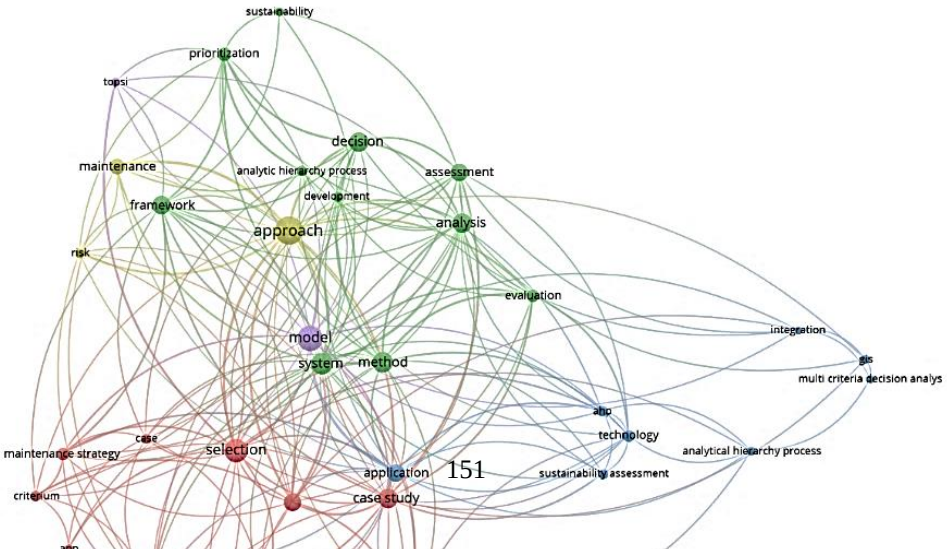
Analisa Bibliometrik Penggunaan MCDM dalam Konteks Pemeliharaan

Hasil analisis bibliometrik dalam penelitian ini disajikan dengan menggunakan perangkat lunak *VOSviewer*. *Software* ini memungkinkan visualisasi data bibliometrik secara komprehensif, memetakan keterkaitan antar publikasi dan mengidentifikasi tren utama dalam penggunaan MCDM untuk pemeliharaan infrastruktur. Visualisasi tersebut terdiri dari beberapa elemen penting yang memberikan wawasan mendalam tentang struktur penelitian yang ada.

Pertama, visualisasi ini menampilkan titik-titik (*node*) yang mewakili publikasi individu. Setiap node dihubungkan oleh garis-garis yang menunjukkan adanya hubungan sitasi antar-publikasi, memberikan gambaran tentang bagaimana satu publikasi merujuk pada yang lain. Kedua, warna dalam visualisasi digunakan untuk menunjukkan kelompok penelitian (*klaster*) yang memiliki kesamaan topik atau pendekatan, sehingga memberikan pandangan tentang pengelompokan bidang penelitian yang relevan. Selain itu, analisis bibliometrik ini juga membantu dalam mengidentifikasi publikasi yang paling sering disitasi (*citation analysis*), yang memberi informasi mengenai kontribusi penting dalam bidang pemeliharaan berbasis MCDM. Melalui analisis ini, dapat diungkapkan area-area yang sering dijadikan rujukan oleh peneliti lain, serta potensi gap yang dapat dieksplorasi lebih lanjut dalam penelitian masa depan.

Visualisasi Network VOS Viewer

Hasil dari analisis ini ditampilkan pada Gambar 2, yang memberikan gambaran menyeluruh tentang bagaimana topik-topik dala na kontribusi berbagai p



Gambar 2 *Visualisasi Network VOS Viewer* Penggunaan MCDM

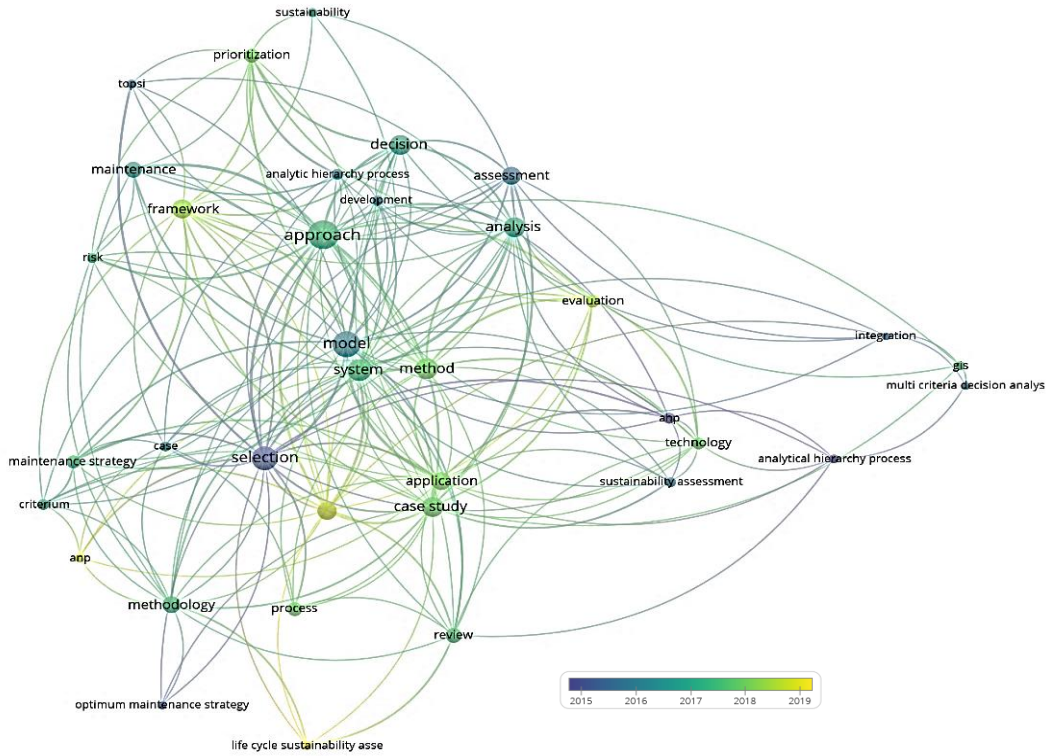
Visualisasi bibliometrik yang ditampilkan pada Gambar 2, *VOSviewer* menunjukkan beberapa klaster utama yang saling berhubungan erat, dengan masing-masing klaster mencerminkan penggunaan dan penerapan metode MCDM dalam berbagai konteks pemeliharaan. Setiap klaster diwakili oleh kelompok kata kunci yang sering muncul bersama dalam literatur, memperlihatkan topik dan metode yang dominan dalam penelitian terkait MCDM. Berikut adalah analisis dari setiap klaster dan hubungannya dengan MCDM:
Penelitian ini mengidentifikasi empat klaster utama terkait penerapan MCDM dalam berbagai bidang, khususnya pengambilan keputusan dan strategi pemeliharaan. Klaster Hijau berfokus pada pengambilan keputusan dan evaluasi kriteria, dengan kata kunci seperti *decision, assessment, evaluation, dan approach*, menunjukkan pentingnya proses evaluasi multi-kriteria dalam menentukan alternatif terbaik di situasi yang kompleks. Metode MCDM digunakan untuk mengembangkan pendekatan baru yang lebih efektif dalam menilai kriteria yang relevan. Klaster Merah menyoroti metodologi MCDM dan penerapannya dalam strategi pemeliharaan, termasuk kata kunci seperti AHP (*Analytic Hierarchy Process), maintenance strategy, dan Life Cycle Sustainability.* MCDM digunakan secara luas untuk menentukan strategi pemeliharaan yang optimal dan efisien, terutama terkait keberlanjutan aset dalam jangka panjang. Klaster Biru menekankan integrasi MCDM dengan teknologi seperti *GIS (Geographic Information Systems)*, serta penekanan pada *sustainability assessment*. MCDM bersama teknologi mendukung pengambilan keputusan berbasis data yang lebih kompleks, memungkinkan pendekatan holistik dalam penilaian keberlanjutan dengan mempertimbangkan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi. Dan Klaster Ungu fokus pada prioritisasi dan analisis risiko melalui metode TOPSIS. Hubungan antara *risk, prioritization*, dan TOPSIS menunjukkan bahwa metode ini sangat efektif untuk menentukan solusi optimal dalam situasi yang melibatkan risiko tinggi, terutama dalam konteks pemeliharaan.
Secara keseluruhan, visualisasi klaster ini menggarisbawahi peran penting MCDM dalam berbagai aplikasi, termasuk evaluasi kriteria, strategi pemeliharaan, integrasi teknologi, dan mitigasi risiko. Metode seperti AHP dan TOPSIS sering digunakan untuk memfasilitasi pengambilan keputusan yang melibatkan banyak faktor dan kriteria. Penerapan MCDM terus berkembang di berbagai bidang, memberikan solusi untuk tantangan pengambilan keputusan yang semakin kompleks.

Overlay Visualization VOSviewer

Gambar 3 merupakan *overlay visualization* dari *VOSviewer*, yang menunjukkan evolusi temporal topik-topik penelitian dari tahun 2015 hingga 2019. Dalam visualisasi ini, warna digunakan untuk menunjukkan kapan topik atau kata kunci tertentu lebih sering dibahas dalam literatur.
Warna-warna dalam visualisasi ini menunjukkan tren perkembangan topik, dari topik yang lebih awal dibahas (berwarna biru) hingga topik yang lebih baru (berwarna kuning). Analisis ini membantu kita memahami arah perkembangan penelitian, sekaligus mengidentifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*) yang masih belum dieksplorasi secara menyeluruh.

Pada periode awal penelitian (2015-2016), AHP dan GIS menjadi fokus utama dalam literatur MCDM. AHP digunakan untuk menimbang alternatif berdasarkan kriteria multi-dimensi, sementara GIS mendukung analisis spasial dalam pengambilan keputusan. Pada periode berikutnya (2016-2017), penelitian beralih ke pengembangan model, sistem, dan framework yang lebih terstruktur, dengan penekanan pada strategi pemeliharaan dan manajemen aset. Kemudian, pada periode 2018-2019, fokus penelitian bergeser ke aplikasi praktis MCDM, seperti selection, case study, dan *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA), yang menyoroti pentingnya keberlanjutan dalam keputusan berbasis multi-kriteria.
Visualisasi *overlay* mengungkapkan tren evolusi penelitian MCDM, dari fokus awal pada metode AHP dan integrasi teknologi seperti GIS, hingga perkembangan model dan sistem yang lebih maju serta aplikasi praktis, terutama dalam penilaian keberlanjutan. Penelitian terkini menekankan pentingnya aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi dalam pengambilan keputusan berbasis multi-kriteria. Namun, terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu diisi,

seperti terbatasnya penggunaan teknologi baru seperti AI dan *Big Data*, minimnya validasi empiris melalui studi kasus, dan kurangnya integrasi penuh antara penilaian keberlanjutan dengan metode MCDM. Penelitian masa depan perlu fokus pada penggabungan teknologi baru dan validasi praktis untuk menciptakan solusi MCDM yang lebih komprehensif dan aplikatif.



Gambar 3 *Overlay Visualization VOS Viewer* Penggunaan MCDM

Density Visualization VOSviewer

Density Visualisation menggunakan *VOSviewer* dapat dilihat pada Gambar 4, menggambarkan kepadatan kemunculan istilah atau kata kunci dalam suatu literatur penelitian. Warna dalam visualisasi density ini merepresentasikan seberapa sering dan erat suatu istilah muncul dalam literatur yang diindeks.
Warna pada visualisasi menunjukkan kepadatan topik dalam penelitian MCDM. Warna kuning menandakan kepadatan tertinggi, dengan topik seperti model, sistem, dan metode menjadi fokus utama, menunjukkan banyaknya penelitian yang berfokus pada pengembangan pendekatan untuk mendukung pengambilan keputusan kompleks. Warna hijau menandakan kepadatan menengah, dengan topik seperti approach, selection, case study sering muncul, meski kurang dominan dibandingkan model dan sistem. Warna biru menandakan kepadatan rendah, di mana topik seperti AHP, GIS, dan penilaian keberlanjutan muncul lebih jarang, meskipun penting. Visualisasi ini menyoroti bahwa pengembangan model dan metode menjadi fokus utama, sementara penilaian keberlanjutan dan integrasi teknologi dengan MCDM masih kurang mendapat perhatian, menunjukkan adanya peluang untuk penelitian lebih lanjut di area ini.



Gambar 4 *Density Visualization* VOS Viewer Penggunaan MCDM

***Research Gap* penggunaan MCDM dalam konteks pemeliharaan**

Analisis mendalam mengenai MCDM menggunakan visualisasi data penting untuk mengidentifikasi tren, hubungan, dan kekurangan penelitian. Hasil analisis dari berbagai aspek penelitian melalui network, overlay, dan density visualization mengungkap klaster-topik terkait, perubahan fokus literatur, serta kepadatan hubungan antar topik. Temuan ini membantu mengidentifikasi kesenjangan penelitian serta potensi pengembangan lebih lanjut.

Tabel 5. Identifikasi kekurangan dalam penelitian MCDM berdasarkan analisis visualisasi (Gambar 2, 3 dan 4)

Aspek Penelitian	Klaster (Gambar 2)	Visualisasi (Gambar 2,3,4)	Research Gap
Pengambilan Keputusan dan Evaluasi Kriteria	Klaster Hijau: decision, assessment, evaluation, approach	Network: Topik berkaitan erat dengan model dan metode. Overlay: Dominan pada 2016-2017. Density: Kepadatan menengah, topik berkembang.	Pengembangan lebih lanjut pada metodologi evaluasi kriteria dan validasi empiris diperlukan.
Metodologi MCDM dan Strategi Pemeliharaan	Klaster Merah: selection, methodology, AHP, Life Cycle Sustainability	Network: Fokus pada AHP dan strategi pemeliharaan optimal. Overlay: Dominan pada 2016-2017. Density: AHP dan strategi pemeliharaan memiliki kepadatan menengah.	Validasi model dalam konteks dunia nyata dan pengembangan strategi lebih terstruktur.
Integrasi Teknologi dan Keberlanjutan	Klaster Biru: GIS, technology, integration, sustainability assessment	Network: Integrasi GIS dengan MCDM dalam pengambilan keputusan. Overlay: Teknologi dan keberlanjutan meningkat pada 2018-2019. Density: Kepadatan rendah.	Integrasi teknologi baru seperti AI dan Big Data masih terbatas, peluang untuk pengembangan lebih lanjut.
Prioritisasi dan Analisis Risiko	Klaster Ungu: TOPSIS, risk, prioritization	Network: TOPSIS terkait erat dengan prioritisasi dan risiko. Overlay: Risiko menjadi fokus penelitian pada 2018-2019. Density: Kepadatan rendah.	Minimnya studi empiris tentang validasi penerapan TOPSIS dalam konteks praktis dan pengurangan risiko.

5. KESIMPULAN

MCDM telah berkembang menjadi alat yang penting dalam strategi pemeliharaan dan evaluasi keberlanjutan, terutama di sektor-sektor yang memerlukan pengambilan keputusan yang kompleks, seperti infrastruktur, energi terbarukan, dan manajemen sumber daya. Berdasarkan analisa bibliometrik menggunakan alat yaitu *Vosviewer*, berikut adalah kesimpulan terkait penerapan MCDM dalam strategi pemeliharaan dan evaluasi keberlanjutan serta identifikasi kerangka kerja dan metodologi yang paling efektif adalah MCDM diterapkan dalam strategi pemeliharaan dengan membantu pengambil keputusan memprioritaskan tindakan pemeliharaan, menilai risiko kegagalan aset, dan memilih strategi yang paling sesuai berdasarkan berbagai kriteria seperti biaya, risiko, dan kondisi aset. Penggunaan metode seperti AHP dan TOPSIS memungkinkan pengambil keputusan untuk memprioritaskan aset mana yang membutuhkan pemeliharaan lebih cepat atau lebih mendesak. Dalam evaluasi keberlanjutan, MCDM memungkinkan integrasi aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan untuk memastikan keputusan pemeliharaan berkontribusi terhadap tujuan keberlanjutan jangka panjang. Hasil dari research gap menunjukkan bahwa kerangka kerja MCDM hibrida yang menggabungkan metode seperti AHP, TOPSIS, dan Fuzzy MCDM serta integrasi teknologi real-time seperti IoT dan Big Data, adalah pendekatan paling efektif untuk menciptakan strategi pemeliharaan yang adaptif dan

berkelanjutan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk validasi empiris dan penerapan MCDM dalam berbagai sektor industri.

DAFTAR PUSTAKA

Azhar, N. A., Radzi, N. A. M., & Wan Ahmad, W. S. H. M. (2021). Multi-criteria Decision Making: A Systematic Review. *(Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering)*, *14*(8), 779–801. https://doi.org/10.2174/2352096514666211029112443

Basílio, M. P., Pereira, V., Costa, H. G., Santos, M., & Ghosh, A. (2022). A Systematic Review of the Applications of Multi-Criteria Decision Aid Methods (1977–2022). *Electronics (Switzerland)*, *11*(11). https://doi.org/10.3390/electronics11111720

Budianto, E. W. H., & Dewi, N. D. T. (2023). Pemetaan Penelitian Rasio Dividend Per Share (Dps) Pada Perbankan Syariah Dan Konvensional : Studi Bibliometrik Vosviewer Dan Literature Review. *Al-Mal: Jurnal Akuntansi Dan Keuangan Islam*, *04*(01), 109–126.

Chakraborty, S., Raut, R. D., Rofin, T. M., & Chakraborty, S. (2023). A comprehensive and systematic review of multi-criteria decision-making methods and applications in healthcare. *Healthcare Analytics*, *4*, 100232. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.health.2023.100232

Cheng, J., Xu, M., & Chen, Z. (2019). A Fuzzy Logic-Based Method for Risk Assessment of Bridges during Construction. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)*, *26*(1), 1–10. https://doi.org/10.11916/j.issn.1005-9113.18089

Cholil, S. R., Pinem, A. P. R., & Vydia, V. (2018). Implementation of the Simple Multi Attribute Rating Technique method for prioritizing post-disaster rehabilitation and reconstruction (In Bahasa). *Register: Scientific Journal of Information Systems Technology*, *4*(1), 1. https://doi.org/10.26594/register.v4i1.1133

Govindan, K., Khodaverdi, R., & Jafarian, A. (2013). A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, *47*, 345–354. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.014

ISO. (2015). INTERNATIONAL STANDARD ISO 5500 Asset management — Overview, principles and terminology. *International Organization for Standardization*, *10406-1:20*, 3–6.

Li, H., Ni, F., Dong, Q., & Zhu, Y. (2018). Application of analytic hierarchy process in network level pavement maintenance decision-making. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *11*(4), 345–354. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.015

Madanchian, M., & Taherdoost, H. (2023). A comprehensive guide to the TOPSIS method for multi-criteria decision making. *Sustainable Social Development*, *1*(1), 1–6. https://doi.org/10.54517/ssd.v1i1.2220

Mardani, A., Jusoh, A., Nor, K. M. D., Khalifah, Z., Zakwan, N., & Valipour, A. (2015). Multiple criteria decision-making techniques and their applications - A review of the literature from 2000 to 2014. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja* , *28*(1), 516–571. https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1075139

Monte, M. B. S., & Almeida-filho, A. T. De. (2016). A Multicriteria Approach Using MAUT to Assist the Maintenance of a Water Supply System Located in a Low-Income Community. *Water Resources Management*. https://doi.org/10.1007/s11269-016-1333-7

Prastika, K. F., Junaedi, D., & Imrona, M. (2016). Optimization of Bridge Maintenance Priority Scale Using the Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (Promethee) and Analytical Hierarchy Process (AHP) at the Highways Office of West Java Province (In Bahasa). *EProceedings of Engineering*, *3*(2), 3573–3582. Retrieved from http://libraryeproceeding.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/2319

Rezaei, J. (2015). A Systematic Review of Multi-criteria Decision-making Applications in Reverse Logistics. *Transportation Research Procedia*, *10*, 766–776. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.030

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). *Models , Methods , Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process Second Edition* (Vol. 175).

Sahoo, S. K., & Goswami, S. S. (2023). A Comprehensive Review of Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) Methods: Advancements, Applications, and Future Directions. *Decision Making Advances*, *1*(1), 25–48. https://doi.org/10.31181/dma1120237

Tan, T., Mills, G., Papadonikolaki, E., & Liu, Z. (2021). Combining multi-criteria decision making (MCDM) methods with building information modelling (BIM): A review. *Automation in Construction*, *121*, 103451. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103451

Tran, N. T., Trinh, V. L., & Chung, C. K. (2024). An Integrated Approach of Fuzzy AHP-TOPSIS for Multi-Criteria Decision-Making in Industrial Robot Selection. *Processes*, *12*(8). https://doi.org/10.3390/pr12081723

Wang, G., Burrow, M., & Ghataora, G. (2020). Study of the Factors Affecting Road Roughness Measurement Using Smartphones. *Journal of Infrastructure Systems*, *26*(3). https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000558

Xu, T., Liu, W., & Zhu, Z. (2023). Multi-Criteria Decision-Making Methods Applied To Achieve Sustainable Design: a Systematic Review. *Proceedings of the Design Society*, *3*(JULY), 2725–2734. https://doi.org/10.1017/pds.2023.273

Zavadskas, E. K., Antucheviciene, J., Turskis, Z., & Adeli, H. (2016). Hybrid multiple-criteria decision-making

methods: A review of applications in engineering. *Scientia Iranica*, *23*(1), 1–20. https://doi.org/10.24200/sci.2016.2093

Zavadskas, Edmundas Kazimieras, Turskis, Z., & Kildiene, S. (2014). State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, *20*(1), 165–179. https://doi.org/10.3846/20294913.2014.892037

PENENTUAN *EARNED VALUE* SEBAGAI INDIKATOR *PROGRESS* FISIK KONSTRUKSI: STUDI KASUS PROYEK KERETA CEPAT JAKARTA-BANDUNG

Muhammad Sapto Nugroho[1*], Muhammad Zaki[1], Abdhy Gazali[2]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Trisakti, Jl. Kyai Tapa No. 1, Grogol, Jakarta Barat 11440*
***e-mail**: m.sapto@trisakti.ac.id*

[2]Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Universitas Negeri Jakarta, Jl. Rawamangun Muka, Jakarta Timur 13220

ABSTRAK

Pengukuran *progress* fisik dalam proyek konstruksi, terutama pada proyek infrastruktur besar seperti Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB), sangat penting untuk memastikan pekerjaan sesuai dengan jadwal dan efisiensi sumber daya terjaga. Penelitian ini mengeksplorasi implementasi metode *Earned Value* (EV) untuk mengevaluasi kinerja proyek KCJB. Metode EV dipilih karena mampu mengintegrasikan lingkup, biaya, dan waktu proyek sehingga memungkinkan pemantauan kemajuan proyek yang lebih komprehensif dan tepat waktu. Namun, proyek KCJB menghadapi tantangan signifikan, seperti kompleksitas proyek dan koordinasi antara berbagai pemangku kepentingan yang terlibat. Selain itu, perbedaan dalam pelaporan kemajuan pekerjaan oleh Kontraktor EPC dan struktur biaya dalam kontrak menciptakan tantangan tambahan dalam mengukur kemajuan fisik. Penelitian ini mengusulkan *framework* integrasi data dan pendekatan manajemen adaptif untuk mengatasi tantangan ini dan meningkatkan akurasi pengukuran *progress* fisik proyek. Berdasarkan hasil analisis, *progress* fisik proyek KCJB per Maret 2021 mencapai 48,3%. Hasil ini menunjukkan pentingnya integrasi metode EV yang akurat dan adaptif dalam menghadapi kompleksitas proyek infrastruktur berskala besar, seperti KCJB, untuk meningkatkan efektivitas pengukuran *progress* fisik dan mendukung pengambilan keputusan manajerial yang lebih baik.

Kata kunci: *Progress*, *Earned Value*, *Framework*, Konstruksi, Infrastruktur

1. PENDAHULUAN

Pengukuran *progress* fisik dalam proyek konstruksi merupakan elemen krusial dalam manajemen proyek, terutama pada proyek infrastruktur berskala besar seperti proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB). *Progress* fisik yang akurat tidak hanya penting untuk memastikan bahwa pekerjaan berjalan sesuai jadwal, tetapi juga untuk memantau efisiensi penggunaan sumber daya dan mengidentifikasi potensi masalah sejak dini mengingat sektor infrastruktur menghadapi tantangan signifikan akibat kebutuhan pendanaan yang tinggi sepanjang siklus hidup proyek (Goh & Yang, 2013). Dalam proyek konstruksi yang kompleks, ketepatan dalam pengukuran progres fisik dapat berdampak langsung pada pengambilan keputusan manajerial dan keberhasilan proyek secara keseluruhan sehingga diperlukan pendekatan perhitungan progress fisik yang akurat untuk mengurangi ketidakpastian dalam proyek konstruksi infrastruktur.

Metode *Earned Value* (EV) adalah salah satu konsep yang paling banyak digunakan untuk mengevaluasi kinerja proyek (Ibrahim, Thorpe, & Mahmood, 2019). Konsep EV menggabungkan seluruh lingkup, biaya, dan waktu proyek, serta memungkinkan pemangku kepentingan untuk memantau kemajuan proyek selama siklus hidup proyek serta membantu dalam memperbaiki deviasi secara tepat waktu (Najafi & Azimi, 2016). Dengan menghitung nilai fisik yang telah diperoleh dari pekerjaan yang diselesaikan, EV memungkinkan manajer proyek untuk memantau tidak hanya seberapa banyak pekerjaan yang telah dilakukan, tetapi juga bagaimana pekerjaan tersebut sesuai dengan anggaran dan jadwal yang telah direncanakan. Penerapan EV pada proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih komprehensif tentang progres fisik proyek dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dalam manajemen proyek ini.

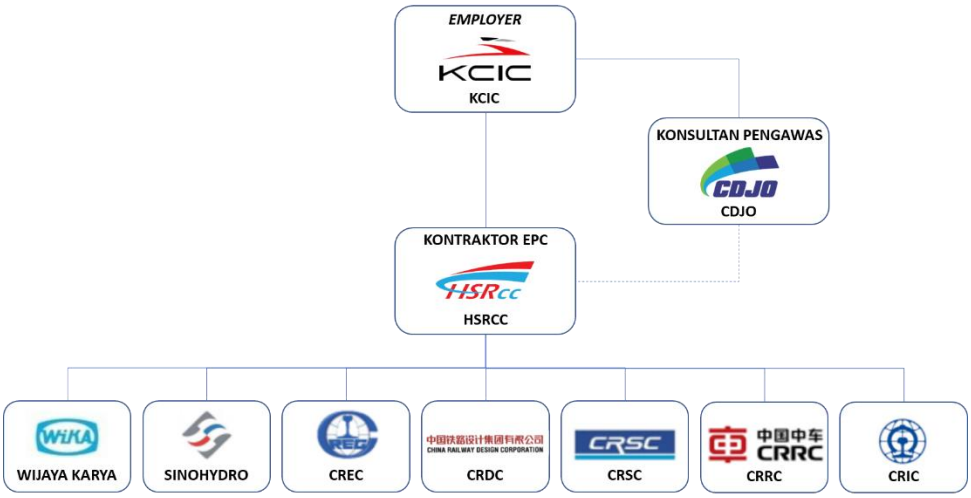
Namun, implementasi metode *Earned Value* dalam proyek infrastruktur berskala besar seperti Kereta Cepat Jakarta-Bandung bukan tanpa tantangan. Salah satu tantangan utama adalah kompleksitas yang muncul dari berbagai disiplin ilmu dan kontraktor yang terlibat dalam proyek ini, yang membutuhkan integrasi data dari berbagai sumber dan pemangku kepentingan. Selain itu, ketepatan dalam pelaporan data fisik sering kali menjadi isu kritis, mengingat skala dan kompleksitas pekerjaan yang harus diselesaikan dalam lingkungan yang dinamis dan sering kali tidak dapat diprediksi (Al-Jibouri, 2003). Keterlambatan dalam pengumpulan data atau ketidaksesuaian data yang dilaporkan dapat menyebabkan perbedaan antara kondisi aktual di lapangan dan informasi yang tersedia untuk pengambilan keputusan.

Selain itu, dalam konteks proyek KCJB, tantangan lain yang harus dihadapi adalah koordinasi antara berbagai pihak yang terlibat, baik dari segi teknis maupun administratif. Sebagai proyek strategis nasional, KCJB melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, perusahaan swasta, dan kontraktor asing, yang masing-masing memiliki kepentingan dan prioritas yang berbeda. Ini memerlukan sistem manajemen yang mampu mengakomodasi berbagai kepentingan tersebut tanpa mengorbankan ketepatan dan keakuratan pengukuran progres fisik. Oleh karena itu, diperlukan suatu *framework* yang tidak hanya mengandalkan metode EV secara tradisional, tetapi juga mengintegrasikan pendekatan manajemen yang adaptif untuk memastikan bahwa pengukuran progress fisik dapat dilakukan secara efektif dan efisien. Dengan demikian, kombinasi antara pendekatan tradisional dan inovatif diharapkan dapat mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keberhasilan proyek KCJB secara keseluruhan.

2. GAMBARAN PROYEK

Kereta Cepat Indonesia China (KCIC) adalah perusahaan konsorsium yang didirikan untuk mengembangkan jalur kereta cepat sepanjang 150 kilometer antara Jakarta dan Bandung. Proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB) yang kini juga dikenal Whoosh, telah diresmikan secara komersial beroperasi pada tanggal 17 Oktober 2023 lalu ((PT Kereta Cepat Indonesia China, 2023). Kecepatan desain maksimum kereta ini adalah 350 km/jam. Panjang total jalur ini sekitar 142,3 km, dengan sekitar 4,7 km berada di wilayah Jabodetabek dan sekitar 137,6 km berada di wilayah Provinsi Jawa Barat, serta mencakup empat stasiun yaitu Halim, Karawang, Padalarang, dan Tegal Luar, serta depo EMU (*Electric Multiple Unit*) dan basis perawatan terintegrasi di Tegal Luar.

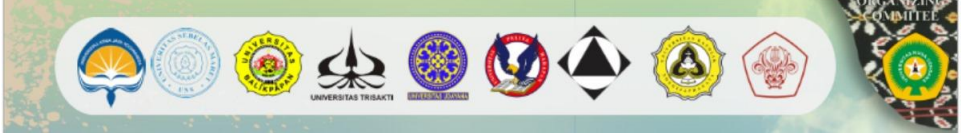
Meskipun telah dilakukan peletakan batu pertama pada 21 Januari 2016, konstruksi proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung tertunda karena izin dan masalah lahan, namun konstruksi akhirnya dimulai pada pertengahan 2018 setelah Presiden menetapkannya sebagai proyek strategis nasional (Soemardi & Chan, 2022). Pekerjaan konstruksi dilakukan oleh Konsorsium Kontraktor Kereta Cepat, *High-Speed Railway Contractor Consortium* (HSRCC) yang terdiri dari PT Wijaya Karya, *China Railway International Co. Ltd*. (CRIC), CREC, Sinohydro *Co. Ltd.*, *China Railway Design Corporation* (CRDC), CRRC Sifang *Co. Ltd*., dan CRSC (Wijaya, 2024) melalui Kontrak Komersial EPC (*Engineering, Procurement and Construction*) *Turnkey* (Yurianto & Kadri, 2020). KCIC menunjuk CARS Dardela *Joint Operation* (CDJO) untuk menyediakan jasa pengawasan dan konsultasi untuk proyek KCJB (PT Kereta Cepat Indonesia China, 2023).



Gambar 1. Organisasi Proyek KCJB

Struktur Biaya Pekerjaan Konstruksi

Proyek KCJB memiliki struktur pekerjaan yang berbeda dari proyek yang biasanya ada di Indonesia. Selain biaya pekerjaan struktur seperti Jembatan, *Subgrade*, Terowongan, Stasiun, dan bangunan penunjang lainnya, biaya pekerjaan non-struktur seperti biaya lain-lain, biaya tak terduga, Pajak Pertambahan Nilai (PPN), dan lainnya menjadi bagian tersendiri yang masuk dalam struktur pekerjaan konstruksi yang ditagihkan oleh Kontraktor EPC. Biaya lainnya yang dimaksud dalam proyek ini meliputi manajemen proyek, pengawasan, inspeksi, biaya pra-kerja, kerja sama, pengujian, persiapan produksi, biaya untuk rekayasa lalu lintas, dan pengembangan perangkat lunak. Komponen biaya ini menjadi acuan dalam penagihan yang dilakukan Kontraktor EPC yang diawasi oleh Konsultan Pengawas. Adapun komponen struktur pekerjaan konstruksi yang disepakati dalam Rencana Anggaran Biaya (RAB) dalam kontrak proyek KCJB ditunjukkan sebagai berikut.



Tabel 1. Komponen Struktur Biaya Pekerjaan Proyek KCJB

No.	Komponen Pekerjaan	Persentase (%)
1	Pembebasan Lahan dan Pembongkaran	0.04%
2	Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*)	9.03%
3	Pekerjaan Jembatan & Gorong-gorong (*Culvert*)	28.35%
4	Pekerjaan Terowongan (*Tunnel*) & Penggalian Terbuka (*Open-Cut*)	10.99%
5	Pekerjaan Rel	6.21%
6	Pekerjaan Komunikasi, Sinyal, dan Informasi	3.67%
7	Pekerjaan Tenaga Listrik dan Gardu Traksi	4.58%
8	Pekerjaan Stasiun & Bangunan	4.07%
9	Pekerjaan Operasional Pendukung & Bangunan Lainnya	5.35%
10	Pekerjaan Sementara Berskala Besar	1.89%
11	Biaya Lainnya	4.48%
12	Biaya Tak Terduga	1.15%
13	Kereta EMU	7.76%
14	Pekerjaan Sementara Lainnya	5.38%
15	PPN	7.05%
	Total	**100.0%**

Pelaporan Kemajuan Pekerjaan Konstruksi

Laporan kemajuan pekerjaan konstruksi secara rutin dilaporkan oleh Kontraktor EPC tiap bulannya dan menjadi topik pembahasan utama dalam rapat koordinasi bulanan antara KCIC, CDJO, dan HSRCC. Dalam laporan bulanan Kontraktor EPC selain terdapat kemajuan pekerjaan yang digambarkan melalui Kurva-S, terdapat pula informasi kemajuan fisik pekerjaan struktur utama. Namun, permasalahan yang ditemukan dalam laporan ini adalah tidak adanya integrasi data antara kemajuan pekerjaan Kurva-S dengan kemajuan pekerjaan konstruksi fisik. Selain itu, komponen struktur pekerjaan konstruksi yang dilaporkan dalam laporan ini juga berbeda dengan apa yang ada dalam kontrak yang ditunjukkan sebelumnya. Berikut adalah komponen struktur pekerjaan konstruksi yang dilampirkan dalam laporan Kontraktor EPC.

Tabel 2. Komponen Struktur Pekerjaan Proyek KCJB oleh Kontraktor EPC

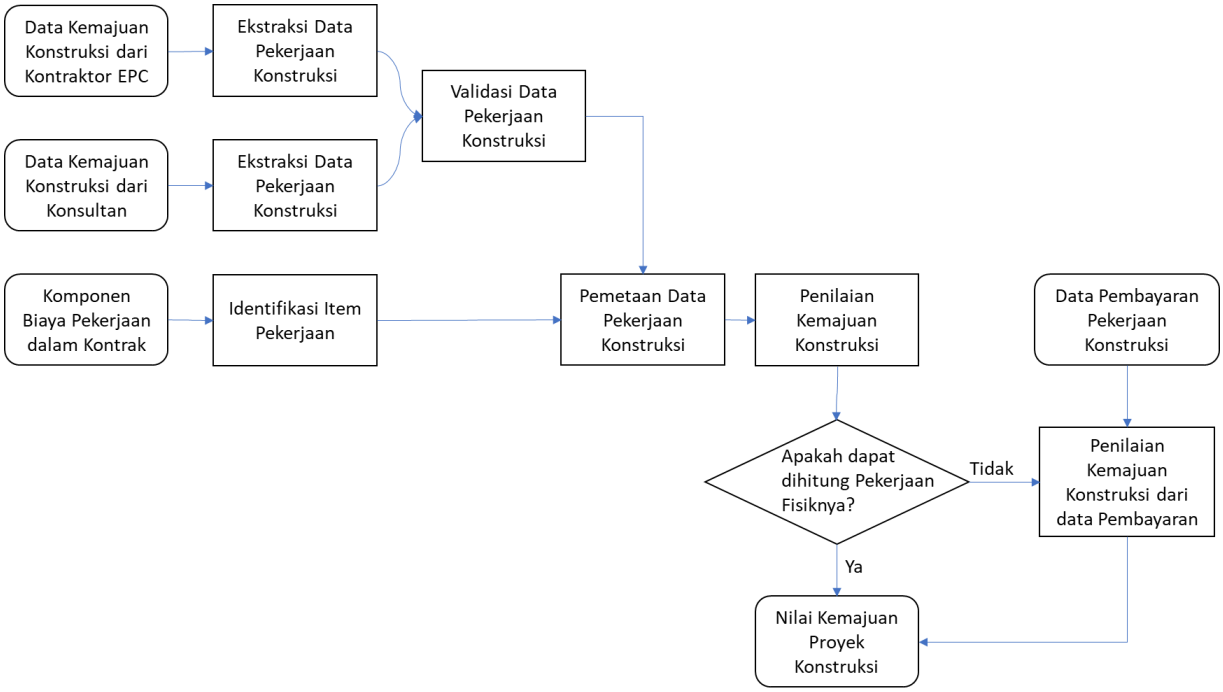
No.	Komponen Pekerjaan	Persentase (%)
1	Pembebasan Lahan (Fasilitas Sementara)	1.53%
2	Persiapan Konstruksi	2.43%
3	Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*) & Gorong-gorong (*Culvert*)	11.30%
4	Pekerjaan Substruktur Jembatan dan Jembatan Bentang Panjang	26.57%
5	Pembuatan *Box Girder* Pracetak	6.96%
6	Pemasangan *Box Girder*	0.09%
7	Pekerjaan Terowongan (*Tunnel*)	12.87%
8	Pemasangan Pelat Rel Kereta dan *Ballast*	3.46%
9	Pemasangan Rel dan Bantalan Ber-*ballast*	3.03%
10	Pemosisian Akhir Rel	1.11%
11	Pekerjaan Stasiun dan Bangunan	10.67%
12	Pekerjaan Depo EMU	1.11%
13	Pekerjaan Komunikasi, Sinyal, Listrik, dan *Power-Supply* Rel	10.62%
14	Kereta EMU	7.76%
15	Pemeriksaan Terpadu dan Operasi Uji Coba	0.49%
	Total	**100.0%**

Struktur komponen biaya pekerjaan dalam laporan kemajuan pekerjaan Kontraktor EPC mengintegrasikan komponen-komponen biaya pekerjaan non-struktur ke dalam biaya pekerjaan konstruksinya. Meskipun komponen struktur biaya pekerjaan ini lebih lazim digunakan di proyek konstruksi di Indonesia pada umumnya, perbedaan antara kedua struktur

komponen pekerjaan ini menyebabkan adanya kesulitan dalam memonitor kemajuan pekerjaan konstruksi KCJB, ditambah lagi dengan tidak adanya integrasi pekerjaan fisik konstruksi dengan klaim kemajuan pekerjaan konstruksi dalam Kurva-S yang dapat menyebabkan pembengkakan biaya konstruksi.

3. METODE PENELITIAN

Analisis *Earned Value* diperoleh dengan mengintegrasikan waktu, biaya, dan kualitas, dengan mengukur deviasi kinerja dalam nilai keuangan yang lazim digunakan untuk memonitor pengeluaran aktual dan pencapaian kemajuan fisik proyek konstruksi, serta untuk menghasilkan laporan kemajuan di tiap periodenya (Nkiwane, Meyer, & Steyn, 2016). Metode ini umumnya dibuat dengan membandingkan kuantitas data aktual yang dikumpulkan dari lapangan dengan perencanaan, dan keandalan metode ini bergantung pada akurasi dan ketepatan waktu pengumpulan data lapangan tersebut (El-Omari & Moselhi, 2011). Meskipun komponen struktur biaya pekerjaan yang ada pada laporan Kontraktor EPC lebih lazim digunakan di proyek konstruksi di Indonesia, komponen struktur biaya pekerjaan konstruksi yang ada dalam kontrak akan digunakan sebagai basis acuan karena merupakan bagian dari dokumen resmi yang telah disepakati oleh semua pihak dan dipakai dalam proses pembayaran konstruksi. Perhitungan *Earned Value* kemajuan pekerjaan fisik konstruksi proyek KCJB dalam penelitian ini dilakukan sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan *Earned Value* Kemajuan Fisik Proyek Konstruksi

Proses dalam diagram alir dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data Pekerjaan Konstruksi
   Data pekerjaan konstruksi diambil dari laporan kemajuan pekerjaan konstruksi dari Kontraktor EPC dan dari Konsultan Pengawas.

2. Validasi Data Pekerjaan Konstruksi
   Data pekerjaan konstruksi dari Kontraktor EPC dan dari Konsultan Pengawas dibandingkan dan divalidasi dengan kesesuaian dan keterbaruannya.

3. Identifikasi Item Pekerjaan
   Komponen biaya pekerjaan konstruksi dan pecahannya dalam kontrak diidentifikasi dan dibandingkan dengan item pekerjaan dari laporan kemajuan proyek konstruksi.

4. Pemetaan Data Pekerjaan Konstruksi
   Data pekerjaan konstruksi yang telah divalidasi dan item pekerjaan dari kontrak yang telah diidentifikasi, selanjutnya dipetakan tiap masing-masing pecahannya sehingga hubungan integrasi datanya dapat terhubung.

5. Penilaian Kemajuan Proyek Konstruksi
   Data pekerjaan konstruksi yang sudah dipetakan dinilai berdasarkan persentase penyelesaiannya sesuai dengan data pekerjaan fisik yang terpasang/terbangun di lapangan. Komponen pekerjaan yang tidak terdapat data pekerjaan fisiknya seperti biaya tak terduga, pekerjaan tambahan, dan lainnya, akan dinilai menggunakan data pembayaran kepada Kontraktor EPC yang telah divalidasi oleh Konsultan Pengawas. Sedangkan untuk pekerjaan stasiun & bangunan dihitung berdasarkan pencapaian *Milestone*, yakni penilaian ketercapaian pekerjaan konstruksi fisik yang dilakukan oleh konsultan pengawas.

Adapun ringkasan perhitungan komponen pekerjaan konstruksi dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 3. Keterangan Penilaian Kemajuan Pekerjaan Konstruksi

No.	Komponen Pekerjaan	Keterangan
1	Pembebasan Lahan dan Pembongkaran	Dinilai menggunakan data pembayaran.
2	Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*)	*Basal Bed, Side Drainage, Green Protection, Sound Barrier, Underground Drainage, Fence, Cable Duct*, Fondasi OCS, Pelat & Peralatan *Nostlement* tidak dilaporkan dalam progres konstruksi, akan dinilai menggunakan data pembayaran.
3	Pekerjaan Jembatan & Gorong-gorong (*Culvert*)	Sistem Dek Jembatan, Pekerjaan Tambahan, & Pekerjaan Lantai Jembatan tidak dilaporkan dalam progres konstruksi, akan dinilai menggunakan data pembayaran.
4	Pekerjaan Terowongan (*Tunnel*) & Penggalian Terbuka (*Open-Cut*)	Pekerjaan Tambahan & Tenaga Listrik tidak dilaporkan dalam progres konstruksi, akan dinilai menggunakan data pembayaran.
5	Pekerjaan Rel	Dinilai menggunakan data pembayaran.
6	Pekerjaan Komunikasi, Sinyal, dan Informasi	Dinilai menggunakan data pembayaran.
7	Pekerjaan Tenaga Listrik dan Gardu Traksi	Dinilai menggunakan data pembayaran.
8	Pekerjaan Stasiun & Bangunan	Dinilai menggunakan kemajuan pekerjaan berdasarkan pencapaian *Milestone*.
9	Pekerjaan Operasional Pendukung & Bangunan Lainnya	Dinilai menggunakan data pembayaran.
10	Pekerjaan Sementara Berskala Besar	Dinilai menggunakan data pembayaran.
11	Biaya Lainnya	Dinilai menggunakan data pembayaran.
12	Biaya Tak Terduga	Dinilai menggunakan data pembayaran.
13	Kereta EMU	Dinilai menggunakan data pembayaran.
14	Pekerjaan Sementara Lainnya	Dinilai menggunakan data pembayaran.
15	PPN	Dinilai menggunakan data pembayaran.

4. HASIL PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian adalah per bulan Maret 2021, adapun pada periode tersebut Stasiun Padalarang belum masuk fase konstruksi dan Stasiun Walini masih menjadi item pekerjaan dalam kontrak proyek KCJB. Komponen struktur biaya antara Kontraktor EPC dengan RAB kontrak dilampirkan sebagai berikut:

Tabel 4. Pecahan Komponen Struktur Biaya Pekerjaan Kontraktor EPC vs. RAB Kontrak

No.	Komponen Pekerjaan	Komponen dari RAB Kontrak
1	Pembebasan Lahan (Fasilitas Sementara)	Pekerjaan Sementara Lainnya; Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; PPN.
2	Persiapan Konstruksi	Pembebasan Lahan dan Pembongkaran; Pekerjaan Sementara Lainnya; Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.

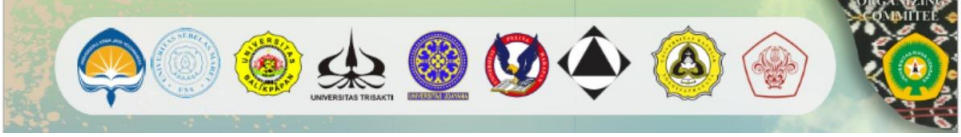
No.	Komponen Pekerjaan	Komponen dari RAB Kontrak
3	Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*) & Gorong-gorong (*Culvert*)	Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*); Pekerjaan Jembatan & Gorong-gorong (*Culvert*); Pekerjaan Sementara Lainnya; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
4	Pekerjaan Substruktur Jembatan dan Jembatan Bentang Panjang	Pekerjaan Jembatan & Gorong-gorong (*Culvert*); Pekerjaan Sementara Lainnya; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
5	Pembuatan *Box Girder* Pracetak	Pekerjaan Jembatan & Gorong-gorong (*Culvert*); Pekerjaan Sementara Lainnya; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
6	Pemasangan *Box Girder*	Pekerjaan Jembatan & Gorong-gorong (Culvert); Pekerjaan Sementara Lainnya; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
7	Pekerjaan Terowongan (*Tunnel*)	Pekerjaan Terowongan (*Tunnel*) & Penggalian Terbuka (*Open-Cut*); Pekerjaan Sementara Lainnya; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
8	Pemasangan Pelat Rel Kereta dan *Ballast*	Pekerjaan Rel; Pekerjaan Sementara Lainnya; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
9	Pemasangan Rel dan Bantalan Ber-*ballast*	Pekerjaan Rel; Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
10	Pemosisian Akhir Rel	Pekerjaan Rel; Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
11	Pekerjaan Stasiun dan Bangunan	Pekerjaan Operasional Pendukung & Bangunan Lainnya; Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
12	Pekerjaan Depo EMU	Pekerjaan Operasional Pendukung & Bangunan Lainnya; Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
13	Pekerjaan Komunikasi, Sinyal, Listrik, dan *Power-Supply* Rel	Pekerjaan Komunikasi, Sinyal, dan Informasi; Pekerjaan Tenaga Listrik dan Gardu Traksi; Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.
14	Kereta EMU	Kereta EMU
15	Pemeriksaan Terpadu dan Operasi Uji Coba	Pekerjaan Sementara Berskala Besar; Biaya Lainnya; Biaya Tak Terduga; Pekerjaan Sementara Lainnya; PPN.

Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, komponen struktur biaya pekerjaan Kontraktor EPC dipecah dan dipetakan ke dalam komponen struktur biaya berdasarkan RAB dalam kontrak. Pekerjaan dengan data kuantitas fisik pekerjaan konstruksi dipetakan dengan komponen biayanya sehingga didapatkan hasil *Earned Value* dalam bentuk finansial dan persentase. Pada makalah ini hanya disajikan data persentase, sedangkan data finansial hanya ditunjukkan dalam 1 contoh perhitungan untuk menjaga privasi data proyek. Adapun data kuantitas pekerjaan fisik yang dapat dihitung hanya Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*), Pekerjaan Jembatan & *Culvert*, dan Pekerjaan *Tunnel* & *Open-Cut* yang ditampilkan dalam Tabel 5, Tabel 6, dan Tabel 7. Contoh perhitungan *Earned Value* ditunjukkan sebagai berikut untuk sub-pekerjaan *Pier – Major Bridge*:

$$Earned\ Value\ (\%) = \frac{Pekerjaan\ Selesai \times Harga\ Satuan}{Nilai\ Pekerjaan\ dalam\ Kontrak} \quad (1)$$

$$Earned\ Value\ (\%) = \frac{27 \times \$\ 74.353}{\$2.379.307} = 84{,}38\% \quad (2)$$

Setelah semua sub-pekerjaan telah dihitung, selanjutnya dijumlahkan dan dibandingkan dengan nilai kontrak pekerjaannya sehingga didapatkan nilai *Earned Value* (%) senilai 60,82%; 63,86%; dan 73,53% masing-masing untuk hanya Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*), Pekerjaan Jembatan & *Culvert*, dan Pekerjaan *Tunnel* & *Open-Cut.*



Tabel 5. Perhitungan *Earned Value* Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*)

Komponen	Rencana	Aktual	*Earned Value* (%)
Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*)			**60,82%**
1. Mainline Earthwork			
a. Excavation for Mainline	9.102.240 m3	7.664.389 m3	84,20%
b. Embankment Fill for Mainline	3.448.580 m3	1.605.797 m3	46,56%
c. Graded Crushed Stone for Mainline	736.013 m3	190.147 m3	25,83%
2. Station Earthwork			
a. Excavation for Station	43.997 m3	40.997 m3	93,18%
b. Embankment Fill for Station	2.962.723 m3	2.962.723 m3	100,00%
c. Graded Crushed Stone for Station	45.480 m3	15.592 m3	34,28%
3. Subgrade Ancillary Work			
a. Slope Protection	185.877 m3	63.433 m3	34,13%
b. Foundation Treatment			
a. Ground Treatment	1.233.424 m	1.169.843 m	94,85%
b. Preloading	220.000 m	220.000 m	100,00%
c. Vacuum Preloading	71.415 m2	70.989 m2	99,40%
c. Retaining Wall	146.151 m3	104.827 m3	71,72%

Tabel 6. Perhitungan *Earned Value* Pekerjaan Jembatan & *Culvert*

Komponen	Rencana	Aktual	*Earned Value* (%)
Pekerjaan Jembatan & *Culvert*			**63,86%**
1. Super Major Bridge			
a. Bored pile - super major bridge	29.224 unit	27.515 unit	94,15%
b. Cushion cap - super major bridge	2.838 unit	2.592 unit	91,31%
c. Pier - super major bridge	2.848 unit	2.303 unit	80,86%
d. Fabrication - super major bridge	2.497 unit	954 unit	38,21%
e. Box Girder Erection - super major bridge	2.497 unit	496 unit	19,86%
f. Cast-in-place Girder - super major bridge	174 unit	62 unit	35,63%
g. Prestressed Continuous Beam - super major bridge	671 unit	468 unit	69,68%
h. Steel truss girder - super major bridge	1 unit	1 unit	60,00%
i. Switch beam - super major bridge	6 unit	1 unit	16,67%
j. Other special beam - super major bridge	2 unit	2 unit	100,00%
2. Major Bridge			
a. Bored pile - major bridge	330 unit	330 unit	100,00%
b. Cushion cap - major bridge	32 unit	31 unit	96,88%
c. Pier - major bridge	32 unit	27 unit	84,38%
d. Fabrication - major bridge	13 unit	0 unit	0,00%
e. Box Girder Erection - major bridge	13 unit	0 unit	0,00%
f. Cast-in-place Girder - major bridge	13 unit	0 unit	0,00%
g. Switch beam - major bridge	1 unit	0 unit	0,00%
3. Medium Bridge	2.200 m	1.759 m	79,99%
4. Minor Bridge	2.200 m	1.759 m	79,99%
5. Culvert	2.200 m	1.759 m	79,99%

Tabel 7. Perhitungan *Earned Value* Pekerjaan *Tunnel* & *Open-Cut*

Komponen	Rencana	Aktual	*Earned Value* (%)
Pekerjaan *Tunnel & Open-Cut*			**73,53%**
1. # Tunnel no.1			
a. TBM Excavation & lining	1.885 m	1.885 m	100,00%
b. Shield & Open Cut	1.885 m	1.837 m	97,45%
c. Foundation & Rail Structure	1.885 m	1.837 m	97,45%
2. Other Tunnel (12)			

a. Excavation & Finish Lining			
a. Excavation & 1st Lining	14.787 m	10.504 m	71,04%
b. Inverted Arch Lining Wall	14.787 m	9.512 m	64,33%
c. 2nd Arch Lining Wall	14.787 m	8.597 m	58,14%
b. Inclined Shaft	2.088 m	2.088 m	100,00%
c. Tunnel Portal & Open Cut	14.787 m	10.504 m	71,04%

Untuk pekerjaan stasiun dilakukan penilaian dengan metode *Milestone* yang dilakukan oleh konsultan pengawas. Komponen pekerjaan stasiun dipecah menjadi sub-pekerjaan sesuai dengan Tabel 8 dan dinilai penyelesaian pekerjaannya secara berkala melalui inspeksi lapangan. Adapun hasil *Earned Value* untuk Pekerjaan Stasiun & Bangunan didapat senilai 25.33% yang ditunjukkan sebagai berikut.

Tabel 8. Perhitungan *Earned Value* Pekerjaan Stasiun & Bangunan

Milestone	**Stasiun Halim**	**Stasiun Karawang**	**Stasiun Walini**	**Stasiun Tegal Luar**
Foundation treatment	17.72%	17.72%	11.59%	17.72%
Tie Beam and Ground Floor	10.98%	5.66%	3.89%	11.33%
Column	12.98%	0.00%	0.00%	9.26%
Beam	6.27%	0.00%	0.00%	7.46%
Slab	5.69%	0.00%	0.00%	4.06%
Steel Structure	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Wall, Doors and Windows	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Roof and Canopy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Interior	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Exterior	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Procurement and installation of electric lighting facilities (including lighting fixtures, sockets, piping and wiring, etc.)	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Progress (%)	**53.63%**	**23.38%**	**15.48%**	**49.83%**
Earned Value (%)	**25.33%**			

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, untuk komponen biaya yang tidak terdapat data pekerjaan fisiknya akan dinilai melalui data pembayaran kontraktor EPC yang sebelumnya telah divalidasi oleh konsultan pengawas. Dengan demikian didapat hasil perhitungan kemajuan pekerjaan proyek KCJB pada Maret 2021 dengan pendekatan *Earned Value* sebesar 48.3%. Rangkuman nilai *Earned Value* masing-masing komponen biaya pekerjaan ditunjukkan sebagai berikut.

Tabel 9. *Earned Value* Proyek KCJB per Maret 2021

No.	**Komponen Pekerjaan**	**Persentase (%)**
1	Pembebasan Lahan dan Pembongkaran	0.01%
2	Pekerjaan Tanah Dasar (*Subgrade*)	5.49%
3	Pekerjaan Jembatan & Gorong-gorong (*Culvert*)	18.11%
4	Pekerjaan Terowongan (*Tunnel*) & Penggalian Terbuka (*Open-Cut*)	8.08%
5	Pekerjaan Rel	0.88%
6	Pekerjaan Komunikasi, Sinyal, dan Informasi	0.00%
7	Pekerjaan Tenaga Listrik dan Gardu Traksi	0.00%

8	Pekerjaan Stasiun & Bangunan	1.03%
9	Pekerjaan Operasional Pendukung & Bangunan Lainnya	0.02%
10	Pekerjaan Sementara Berskala Besar	1.57%
11	Biaya Lainnya	1.73%
12	Biaya Tak Terduga	0.04%
13	Kereta EMU	3.88%
14	Pekerjaan Sementara Lainnya	3.68%
15	PPN	3.75%
	Total	**48.3%**

Berdasarkah hasil pengolahan data di atas, ada beberapa temuan terkait perbedaan perhitungan antara kontraktor EPC dengan perhitungan *Earned Value* yang disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 10. Ringkasan Metode Perhituangan Kontraktor EPC vs. *Earned Value*

No.	Metode Kontraktor EPC	Metode *Earned Value*
1	Menggunakan komponen struktur biaya pekerjaan konstruksi yang berbeda dengan apa yang ada dalam RAB kontrak.	Mengacu pada item yang ada dalam RAB kontrak.
2	Porsi biaya tidak langsung dan pekerjaan yang bukan bangunan utama disisipkan dalam pekerjaan kosntruksi bangunan utama.	Komponen biaya pekerjaannya dan turunannya mengacu pada RAB kontrak.
3	Tidak ada integrasi atau hubungan yang jelas antara klaim pekerjaan konstruksi terbangun dengan biaya yang dikeluarkan.	Kemajuan pekerjaan dihitung dari pekerjaan konstruksi yang terpasang dan dilengkapi dengan data pembayaran.

Meskipun metode *Earned Value* yang digunakan dalam penelitian ini merupakan pendekatan dasar untuk mengukur kemajuan proyek, implementasinya tidak mudah. Kompleksitas proyek yang tinggi, baik dari segi skala maupun jumlah data yang harus diolah, menjadi tantangan tersendiri. Ini menunjukkan bahwa metode *Earned Value* membutuhkan penanganan yang cermat dan sistematis untuk memastikan hasil yang akurat dan relevan.

Perbedaan antara struktur biaya yang digunakan oleh kontraktor EPC dan yang tercantum dalam RAB kontrak menimbulkan potensi risiko terhadap perhitungan ganda dalam pengukuran kemajuan pekerjaan konstruksi. Jika tidak dikelola dengan baik, risiko ini bisa menyebabkan bias dalam estimasi kemajuan proyek, serta potensi pembengkakan biaya dan jadwal yang tidak sesuai. Perbedaan metode ini menggarisbawahi pentingnya koordinasi yang lebih baik antara kontraktor EPC dan pihak lain yang terlibat dalam proyek. Konsistensi dalam mengacu pada RAB kontrak sebagai dasar perhitungan kemajuan proyek sangat penting untuk menghindari interpretasi yang berbeda-beda terhadap komponen biaya dan pekerjaan yang dilakukan.

Hasil penelitian ini juga mengindikasikan bahwa perbedaan dalam metode perhitungan ini bisa mempengaruhi manajemen proyek secara keseluruhan, terutama dalam hal pengambilan keputusan strategis terkait alokasi sumber daya, estimasi biaya, dan penjadwalan. Oleh karena itu, penting bagi manajemen proyek untuk terus memantau dan menyesuaikan pendekatan yang digunakan, memastikan bahwa semua pihak bekerja dengan data yang konsisten dan metodologi yang selaras.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menujukkan perhitungan kemajuan fisik konstruksi Proyek Kereta Cepat Jakarta-Bandung (KCJB) dengan metode *Earned Value* (EV) yang diolah melalui data dari laporan kemajuan bulanan kontraktor EPC, data kemajuan pekerjaan konstruksi dari konsultan pengawas, dan dokumen kontrak resmi. Perhitungan dilakukan dengan menghubungan data pekerjaan konstruksi terbangun di lapangan yang dikonversi dalam nilai finansial dan dilengkapi dengan data pembayaran kontraktor EPC. Hasil perhitungan menunjukkan kemajuan proyek KCJB pada Maret 2021 sebesar 48.3%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara komponen struktur biaya dalam laporan kemajuan pekerjaan kontraktor EPC dengan Rencana Anggaran Biaya (RAB) dalam kontrak proyek. Ketidaksesuaian ini menyebabkan tantangan dalam *monitoring* dan pelaporan kemajuan fisik konstruksi secara akurat, yang berpotensi mempengaruhi kinerja keuangan proyek. Melalui pemetaan dan validasi data, analisis *Earned Value* (EV) memungkinkan identifikasi kinerja fisik proyek yang lebih jelas dan transparan. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa, meskipun terdapat ketidaksesuaian, EV dapat membantu dalam memberikan

gambaran yang lebih akurat tentang kemajuan proyek, sekaligus memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih baik untuk pengendalian biaya dan jadwal proyek. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada peningkatan manajemen proyek konstruksi infrastruktur di Indonesia, khususnya dalam hal *monitoring* dan pelaporan kemajuan fisik, serta membantu dalam mengurangi risiko pembengkakan biaya akibat ketidaksesuaian data antara perencanaan dan implementasi di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Al-Jibouri, S. H. (2003). Monitoring systems and their effectiveness for project cost control in construction. *International Journal of Project Management, Vol. 21, Issue 2*, 145-154.

El-Omari, S., & Moselhi, O. (2011). Integrating automated data acquisition technologies for progress reporting of construction projects. *Automation in Construction 20*, 699–705.

Goh, K., & Yang, J. (2013). Importance of sustainability-related cost components in highway infrastructure: perspective of stakeholders in Australia. *Journal of Infrastructure Systems Vol. 20 No. 1*.

Ibrahim, M. N., Thorpe, D., & Mahmood, M. N. (2019). Risk factors affecting the ability for earned value management to accurately assess the performance of infrastructure projects in Australia. *Construction Innovation Vol. 19 No. 4*, 550-569.

Najafi, A., & Azimi, F. (2016). An extension of the earned value management to improve the accuracy of schedule analysis results. *Iranian Journal of Management Studies, Vol. 9 No. 1*, 63-75.

Nkiwane, N., Meyer, W., & Steyn, H. (2016). THE USE OF EARNED VALUE MANAGEMENT FOR INITIATING DIRECTIVE PROJECT CONTROL DECISIONS: A CASE STUDY. *South African Journal of Industrial Engineering May 2016 Vol. 27 (1)*, 192-203.

PT Kereta Cepat Indonesia China. (2023). *Tentang KCIC*. From KCIC: https://kcic.co.id/tentang-kami/profil/

Soemardi, B., & Chan, T.-K. (2022). China's Belt and Road Initiative in Indonesia A Case Study of the Jakarta–Bandung High-Speed Rail. In T.-K. Chan, & K. S. Pribadi, *Construction in Indonesia Looking Back and Moving Forward* (pp. 131-142). New York: Routledge.

Wijaya, T. (2024, July 22). *Jakarta–Bandung High-Speed Railway*. From The People's Map of Global China: https://thepeoplesmap.net/project/jakarta-bandung-high-speed-railway/

Yurianto, & Kadri, T. (2020). Identifikasi Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Keterlambatan Proyek Infrastruktur Kereta Cepat Jakarta-Bandung. *CESD Vol 03, No.1*, 35-41.

PENERAPAN *EARNED VALUE CONCEPT* PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG KULIAH FAKULTAS KEDOKTERAN UNIVERSITAS PENDIDIKAN GANESHA

Gusti Ayu Putu Candra Dharmayanti[1*], Dewa Ketut Sudarsana[2], dan Ida Ayu Savitri Manohari [3]

[1]Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit Unud Jimbaran*
***e-mail**: candra_dharmayanti@unud.ac.id*
[2]Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. PB. Sudirman Denpasar
e-mail: dksudarsana@unud.ac.id
[3]Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Kampus Bukit Unud Jimbaran
e-mail: : iasavitrimanohari@gmail.com

ABSTRAK

Proyek Pembangunan Gedung Kuliah Fakultas Kedokteran Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja direncanakan selesai dalam jangka waktu 28 minggu. Pada minggu ke-11 terdapat penambahan item pekerjaan. Pengendalian proyek dibutuhkan agar proyek dapat dipastikan berjalan seperti rencana sehingga tidak terjadi penyimpangan pada waktu dan biaya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja proyek sesuai data pelaporan, yaitu pada minggu ke-1 hingga minggu ke-12, serta memperkirakan biaya dan waktu yang diperlukan dalam menyelesaikan proyek tersebut. Earned Value Concept adalah metode yang digunakan dalam penelitian ini. Data penelitian yang digunakan berupa data sekunder yang meliputi Rencana Anggaran Biaya, Time Schedule, Laporan Mingguan dan Analisa Harga Satuan Pekerjaan. Data tersebut dianalisis untuk menghitung 3 indikator dalam Earned Value Concept, yaitu Actual Cost of Work Performed (ACWP), Budgeted Cost of Work Performed (BCWP) dan Budgeted Cost of Work Schedule (BCWS). Berdasarkan hasil analisis dengan metode Earned Value Concept memberikan petunjuk bahwa pada minggu ke-1 hingga minggu ke-12 nilai Cost Performance Index (CPI) > 1 dengan nilai CPI sebesar 1,02 pada minggu ke-12 yang berarti proyek mengeluarkan biaya lebih sedikit dibandingkan dengan anggaran. Pada segi waktu, proyek mengalami kemajuan pada minggu ke-1 hingga minggu ke-12 yang ditunjukkan dengan nilai Schedule Performance Indeks (SPI) > 1 yaitu sebesar 1,01 pada minggu ke-12. Total biaya akhir proyek ini diperkirakan sebesar Rp9.571.450.878,87 yang menandakan proyek mengeluarkan biaya yang lebih kecil dibandingkan dengan anggaran yaitu sebesar Rp9.749.979.363,59. Waktu perkiraan penyelesaian proyek selama 27,79 minggu yang berarti lebih cepat 0,21 minggu (1,47 hari kerja normal) dibandingkan dengan jadwal yang direncanakan.

Kata kunci: pengendalian, biaya, waktu, proyek, *earned value concept*

1. PENDAHULUAN

Jenis pekerjaan yang dilakukan dengan sumber daya yang terbatas pada kurun waktu tertentu dalam mencapai sebuah tujuan tertentu dapat diartikan sebagai proyek konstruksi. Tujuan dalam proyek konstruksi dicapai dengan menerapkan manajemen proyek yang efektif yang dilakukan dengan memperhatikan beberapa aspek dari segi biaya, waktu, dan sumber daya dengan memperhatikan beberapa faktor, antara lain perencanaan, pengendalian, dan pengawasan.

Dalam proyek Pembangunan Gedung Kuliah Fakultas Kedokteran Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja terdapat penambahan item pekerjaan pada minggu ke-11 (Addendum I) yang seharusnya menyebabkan penambahan waktu pada penyelesaiannya, tetapi pada data justifikasi teknik dicantumkan bahwa tidak ada penambahan waktu pelaksanaan (28 minggu). Penambahan item pekerjaan terdiri dari 19 item pekerjaan dengan total bobot penambahan pekerjaan sebesar 4,4%. Oleh karena itu, proyek sangat memerlukan suatu pengendalian agar dapat dipastikan bahwa proyek selesai sesuai jadwal dan untuk mengendalikan pengeluaran agar tidak membengkak dan tetap sesuai budget yang direncanakan.

Salah satu cara untuk mengontrol waktu dan biaya adalah dengan metode Earned Value Concept. Metode ini menentukan prestasi proyek dari segi waktu dan biaya dengan membandingkan nilai dan hasil dari apa yang telah dilakukan atau dikerjakan (Auzan et al., 2017), berbeda dengan metode lain, seperti analisis varians, yang hanya melihat varians biaya dan jadwal yang berbeda dan tidak menemukan masalah kinerja dalam pekerjaan proyek (Lamato et al., 2022). Metode ini dapat memberikan gambaran tentang status proyek apakah pelaporan sesuai dengan anggaran dan jadwal proyek atau tidak.

Melalui metode Earned Value Concept akan didapatkan indikator-indikator yang berupa BCWS, BCWP dan ACWP. Metode ini dapat digunakan untuk menganalisis perkiraan jangka waktu yang dibutuhkan dalam penyelesaian sebuah proyek, perkiraan biaya yang diperlukan untuk pekerjaan yang tersisa, dan biaya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek dari awal hingga akhir melalui indikator tersebut.

2. MATERI

Pengendalian Proyek

Terdapat berbagai kegiatan yang terlibat dalam suatu proyek konstruksi, yang umumnya mencakup pembuatan bangunan dan pekerjaan penting dalam bidang teknik sipil dan arsitektur. Ada banyak jenis kegiatan yang terjadi dalam sebuah proyek konstruksi. Menurut Rahmanto & Janizar (2022) kegiatan proyek merupakan pekerjaan temporer yang berlangsung dalam kurun waktu yang sudah ditentukan dan membutuhkan dana untuk menyelesaikan tugas-tugas tertentu yang dimaksudkan untuk dicapai. Cara terbaik untuk mencapai hasil yang didukung oleh sumber daya yang baik adalah dengan manajemen proyek. Hal ini dilakukan melalui perencanaan, pelaksanaan, dan pengendalian kegiatan dari awal hingga akhir konstruksi untuk memastikan pelaksanaan yang digunakan dilakukan dengan tepat waktu, hemat biaya, dan dengan mutu yang diharapkan (Sidiq & Johari, 2022).

Perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengawasan merupakan proses dari manajemen suatu proyek. Usaha yang terstruktur dalam penentuan standar yang sesuai dengan sasaran perencanaan, membuat informasi, melakukan perbandingan pekerjaan yang dilakukan dengan pekerjaan yang sebenarnya, dan melakukan analisis untuk mencegah penyimpangan antara rencana dan realisasinya disebut dengan pengendalian. Selain itu, pengendalian juga meliputi pengambilan langkah yang tepat sehingga dapat dipastikan bahwa sumber daya digunakan dengan efisien dan efektif dalam pencapaian tujuan tertentu (Yulita & Irnawan, 2020).

Terdapat 2 jenis biaya pada proyek konstruksi, yaitu Biaya Langsung, mencakup biaya material, tenaga kerja, dan peralatan untuk 1 satuan volume pekerjaan pada proyek termasuk kedalam biaya langsung. Selain biaya langsung, pada proyek konstruksi juga terdapat biaya tak langsung, yang meliputi biaya overhead seperti administrasi, biaya tidak terduga, pengawasan, dan konsultan (Kartikasari, 2014).

Rencana waktu yang diperlukan dalam penyelesaian proyek konstruksi disebut dengan time schedule. Pembuatan time schedule dilakukan dengan pembagian berdasarkan masing-masing item pekerjaan yang kemudian akan digabungkan untuk mengetahui jangka waktu yang diperlukan dalam menyelesaikan suatu proyek konstruksi (Marthania et al., 2023). Tujuan dari pembuatan penjadwalan atau time schedule dalam proyek konstruksi ialah untuk menetapkan waktu yang diperlukan dalam menyelesaikan proyek. Beberapa bentuk time schedule pada proyek konstruksi (Sutrisna & Kholiq, 2018) diantaranya:

1. *Bar-chart*
2. Kurva S
3. Laporan Proyek
4. *Network Planning Diagram*

Earned Value Concept

Menurut Auzan et al., (2017) Earned Value Concept didefinisikan sebagai metode yang dalam penggunaanya membandingkan nilai dan hasil dari apa yang telah dilakukan pada suatu proyek untuk mengetahui prestasi proyek dari segi waktu dan biaya. Berdasarkan informasi yang diperoleh dari evaluasi kinerja tersebut, jika terjadi penyimpangan maka kontraktor dapat melakukan antisipasi atau tindakan pencegahan untuk memastikan bahwa proyek selesai dengan biaya dan waktu yang ditetapkan.

Indikator Earned Value

Menurut Muniroh et al., (2021) 3 indikator dasar yang digunakan dalam metode ini antara lain:

1. BCWS
   BCWS adalah biaya yang dianggarkan sesuai rencana kerja yang telah direncanakan dalam kurun waktu tertentu.
   BCWS = % (bobot rencana) x anggaran *(1)*
2. BCWP
   BCWP diartikan sebagai biaya yang dianggarkan pada pekerjaan yang telah dikerjakan.
   BCWP = % (bobot realisasi) x anggaran *(2)*
3. ACWP
   ACWP adalah total biaya pekerjaan yang dikeluarkan pada kurun waktu tertentu berdasarkan data pelaporan.
   ACWP = biaya langsung + biaya tak langsung *(3)*

Evaluasi berdasarkan 3 indikator earned value, antara lain:

a. Evaluasi biaya: jika ACWP > BCWP artinya proyek mengalami *cost overrun*, sebaliknya jika ACWP < BCWP artinya proyek mengalami *cost underrun.*
b. Evaluasi waktu: jika BCWP < BCWS artinya terjadi keterlambatan pada proyek, sedangkan jika BCWP < BCWS artinya proyek mengalami kemajuan dari jadwal rencana (*ahead schedule*).

Analisa Kinerja Waktu dan Biaya

Melalui 3 indikator Earned Value Concept, akan menghasilkan 2 variansi, antara lain:

1. *Cost Variance* (CV)
   CV adalah perbandingan antara biaya yang sebenarnya dikeluarkan selama proyek dan nilai yang diperoleh setelah pekerjaan selesai. Adapun rumus dari CV antara lain:
   $CV = BCWP - ACWP$ *(4)*
   Keterangan berdasarkan nilai CV :
   Negatif (-) : Biaya melebihi anggaran
   Nol (0) : Biaya yang dikeluarkan sesuai anggaran
   Positif (+) : Biaya lebih kecil dari anggaran
2. *Schedule Variance* (SV)
   SV merupakan variansi yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja proyek dalam penentuan apakah proyek yang sedang dijalankan masih sesuai jadwal rencana atau tidak.
   $SV = BCWP - BCWS$ (5)
   Evaluasi berdasarkan nilai SV :
   Negatif (-) : Proyek dikerjakan lebih lambat dari jadwal
   Nol (0) : Proyek dikerjakan sesuai jadwal
   Positif (+) : Proyek dikerjakan lebih cepat dari jadwal

Indeks Produktivitas

1. *Cost Performance Index* (CPI)
   CPI ialah perbandingan antara nilai yang didapat setelah pekerjaan selesai dengan biaya riil pengeluaran di lapangan.
   $CPI = \frac{BCWP}{ACWP}$ *(6)*

   Evaluasi berdasarkan nilai CPI (Ayni et al., 2019) :
   CPI > 1 : Biaya lebih kecil dari anggaran
   CPI = 1 : Biaya dikeluarkan sesuai anggaran
   CPI < 1 : Biaya melebihi anggaran

2. *Schedule Performance Index* (SPI)
   SPI adalah perbandingan biaya yang diperoleh setelah pekerjaan selesai dan biaya yang dikeluarkan sesuai rencana dalam jangka waktu tertentu.
   $SPI = \frac{BCWP}{BCWS}$ *(7)*

   Evaluasi berdasarkan nilai SPI :
   SPI > 1 : Proyek lebih cepat dari jadwal
   SPI = 1 : Tepat waktu atau sesuai jadwal
   SPI < 1 : Proyek terlambat dari jadwal

Proyeksi Biaya dan Waktu Akhir Proyek

Indikator dan indeks kinerja yang diperoleh selama pelaporan, akan memberikan petunjuk dalam memperkirakan biaya dan waktu akhir proyek.

1. *Estimate to Complete* (ETC) adalah estimasi biaya yang diperlukan dalam menyelesaikan pekerjaan yang tersisa dengan asumsi terhadap kinerja proyek akan konsisten hingga proyek selesai.
   $ETC = \frac{(BAC - BCWP)}{CPI}$ *(8)*
2. *Estimate at Completion* (EAC) adalah estimasi total biaya yang diperlukan dalam penyelesaian sebuah proyek dari awal hingga akhir dengan asumsi kinerja proyek akan stabil hingga proyek selesai.
   $EAC = ACWP + ETC$ *(9)*
3. *Variance at Completion* (VAC) adalah selisih antara anggaran proyek (BAC) dengan estimasi total biaya proyek yang diperlukan dalam penyelesaian proyek.
   $VAC = BAC - EAC$ *(10)*

4. *Estimate to Schedule* (ETS) merupakan estimasi jangka waktu yang diperlukan dalam mengerjakan pekerjaan yang tersisa.
   $ETS = \frac{(Sisa\ Waktu)}{SPI}$ *(11)*
5. *Estimate at Schedule* (EAS) merupakan estimasi waktu yang diperlukan dalam mengerjakan proyek dari awal hingga akhir proyek.

$$EAS = ETS + Waktu\ Pelaporan \quad (12)$$

3. METODE

Objek Studi pada penelitian ini adalah Proyek Pembangunan Gedung Kuliah Fakultas Kedokteran Universitas Pendidikan Ganesha yang berlokasi di Jalan Udayana, Singaraja, Bali. Alasan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengevaluasi prestasi proyek dalam pelaporan tertentu dan untuk memperkirakan waktu dan biaya yang dibutuhkan dalam menyelesaikan proyek tersebut sehingga biaya dan waktu pelaksanaan proyek dapat dikendalikan. Penggunaan metode Earned Value Concept dapat menjadi alternatif dalam mengendalikan waktu dan biaya proyek konstruksi. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan data dari kontraktor yang meliputi RAB proyek, jadwal pelaksanaan, laporan mingguan, dan AHSP. Setelah didapatkan data sekunder tersebut, maka dilakukan pengolahan data yang dilakukan dengan menganalisa indikator-indikator Earned Value Concept. Selanjutnya, jika indikator tersebut telah didapatkan, maka dilanjutkan dengan menganalisis indikator tersebut menjadi 3 bagian, yaitu :

1. Parameter Biaya mencakup CV dan CPI
2. Parameter Waktu mencakup SV dan SPI
3. Estimasi Biaya dan Waktu mencakup ETC, EAC, ETS, EAS

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder, yaitu data yang didapat melalui kontraktor yang meliputi Time Schedule, RAB, laporan mingguan dan AHSP. Melalui data tersebut dapat diketahui persentase bobot rencana, persentase bobot realisasi, harga item pekerjaan dan laporan kemajuan proyek.

Bobot Kegiatan, Biaya Langsung dan Biaya Tak Langsung

Persentase bobot rencana dan bobot realisasi per minggu dapat dilihat melalui time schedule dan laporan mingguan proyek yang didapat dari pihak kontraktor. Biaya langsung pada suatu periode dihitung melalui volume pekerjaan yang telah terlaksana yang dapat dilihat pada laporan mingguan proyek dikalikan dengan analisa harga satuan pekerjaan tanpa biaya overhead dan profit. Harga satuan pekerjaan yang digunakan pada perhitungan biaya langsung meliputi biaya upah, harga bahan dan biaya peralatan untuk 1 satuan volume pekerjaan. Biaya tak langsung dihitung dengan mengalikan biaya langsung dengan persentase asumsi biaya overhead pada proyek. Pada penelitian ini, perhitungan biaya tidak langsung terdiri dari biaya overhead yang diasumsikan sebesar 1% dari biaya langsung.

Indikator Earned Value

1. Perhitungan ACWP

Biaya ACWP merupakan biaya riil pengeluaran di lapangan yang didapatkan melalui penjumlahan antara biaya langsung dan biaya tidak langsung. Rekapitulasi perhitungan ACWP didetailkan pada Tabel 1.

2. Perhitungan BCWS

BCWS ialah biaya yang dianggarkan sesuai rencana kerja yang sudah direncanakan dalam kurun waktu tertentu. BCWS didapat melalui perhitungan bobot pekerjaan rencana dikalikan dengan anggaran yang berupa *real cost*. Adapun contoh dari perhitungan BCWS minggu ke-1, antara lain:

$BCWS_{M-1}$ = % bobot $rencana_{M-1}$ × anggaran (1)

= 0,42% × Rp 9.749.979.363,59

= Rp40.640.728,44

Tabel 1. Perhitungan ACWP

Minggu	Biaya Langsung (Rp)	Biaya Tidak Langsung (Rp)	ACWP (Rp)	ACWP Kumulatif (Rp)
	1	2	1+2	
1	136.706.659,05	1.367.066,59	138.073.725,64	138.073.725,64
2	73.981.616,25	739.816,16	74.721.432,41	212.795.158,05
3	196.899.050,43	1.968.990,50	198.868.040,94	411.663.198,99
4	48.929.418,18	489.294,18	49.418.712,36	461.081.911,35
5	121.993.561,55	1.219.935,62	123.213.497,16	584.295.408,52
6	62.494.418,84	624.944,19	63.119.363,03	647.414.771,55
7	282.656.956,82	2.826.569,57	285.483.526,38	932.898.297,93
8	308.028.865,66	3.080.288,66	311.109.154,31	1.244.007.452,24
9	583.582.813,92	5.835.828,14	589.418.642,05	1.833.426.094,30
10	19.769.000,09	197.690,00	19.966.690,09	1.853.392.784,39
11	441.196.802,56	4.411.968,03	445.608.770,58	2.299.001.554,97
12	337.296.723,95	3.372.967,24	340.669.691,19	2.639.671.246,17

3. Perhitungan BCWP

BCWP diartikan sebagai biaya yang dianggarkan pada pekerjaan yang telah dilakukan. BCWP didapatkan melalui persentase bobot realisasi pekerjaan tiap minggunya dikalikan dengan anggaran yang berupa *real cost*.

$BCWP_{M-1}$ = % bobot $realisasi_{M-1}$ × anggaran (2)
= 1,48% × Rp 9.749.979.363,59
= Rp144.115.166,18

Kinerja Proyek pada Minggu ke-1 hingga Minggu ke-12

Untuk mengetahui kinerja proyek berdasarkan data pelaporan, yaitu minggu ke-1 sampai dengan minggu ke-12 dihitung melalui 3 indikator earned value. Setelah mendapat hasil perhitungan indikator tersebut maka diketahui faktor yang menunjukkan kinerja dan kemajuan proyek. Data tersebut akan dianalisis untuk mengetahui CV dan CPI untuk mengevaluasi prestasi dari segi biaya serta SV dan SPI untuk mengevaluasi prestasi dari segi waktu.

1. CV

Berikut merupakan contoh perhitungan CV pada minggu ke-1, yaitu:

CV_{M-1} = BCWP – ACWP (4)
= Rp144.115.166,18 - Rp138.073.725,64
= Rp6.041.440,54

2. SV

Salah satu contoh perhitungan pada minggu ke-1, yaitu:

SVM-1 = BCWP – BCWS (5)
= Rp144.115.166,18 - Rp40.640.728,44= Rp103.474.437,73

3. CPI

Berikut merupakan contoh perhitungan CPI pada minggu ke-12 :

$$CPI = \frac{BCWP}{ACWP} \quad (6)$$
$$= \frac{Rp2.688.906.885,96}{Rp2.639.671.246,17} = 1,02$$

4. SPI

Salah satu contoh perhitungan pada minggu ke-12, yaitu :

$$SPI = \frac{BCWP}{BCWS} \quad (7)$$
$$= \frac{Rp2.688.906.885,96}{Rp2.654.125.030,05} = 1,01$$

Adapun hasil rekapitulasi dari indikator dan parameter *earned value* didetailkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Indikator dan parameter Earned Value

Minggu	ACWP (Rp)	BCWS (Rp)	BCWP (Rp)	CV (Rp)	SV (Rp)	CPI	SPI
	1	2	3	3-1	3-2	3/1	3/2
1	138.073.725,64	40.640.728,44	144.115.166,18	6.041.440,54	103.474.437,73	1,04	3,55
2	212.795.158,05	71.974.913,14	222.735.541,34	9.940.383,29	150.760.628,20	1,05	3,09
3	411.663.198,99	267.939.803,58	431.977.303,93	20.314.104,94	164.037.500,35	1,05	1,61
4	461.081.911,35	308.233.225,38	483.971.827,74	22.889.916,39	175.738.602,36	1,05	1,57
5	584.295.408,52	347.738.762,12	613.601.438,85	29.306.030,34	265.862.676,73	1,05	1,76
6	647.414.771,55	387.244.298,85	680.002.439,15	32.587.667,60	292.758.140,30	1,05	1,76
7	932.898.297,93	514.860.090,19	980.374.267,66	47.475.969,73	465.514.177,47	1,05	1,90
8	1.244.007.452,24	866.220.251,93	1.332.992.503,51	88.985.051,27	466.772.251,58	1,07	1,54
9	1.833.426.094,30	1.271.993.771,35	1.953.154.392,74	119.728.298,44	681.160.621,40	1,07	1,54
10	1.853.392.784,39	1.809.049.051,98	1.974.161.441,33	120.768.656,95	165.112.389,36	1,07	1,09
11	2.299.001.554,97	2.312.126.647,72	2.344.864.057,76	45.862.502,79	32.737.410,04	1,02	1,01
12	2.639.671.246,17	2.654.125.030,05	2.688.906.885,96	49.235.639,79	34.781.855,91	1,02	1,01

Perkiraan Biaya dan Waktu dalam Menyelesaikan Proyek

Berdasarkan pada kinerja proyek yang diperoleh maka akan didapat petunjuk besarnya perkiraan biaya akhir proyek dan perkiraan waktu dalam menyelesaikan proyek.

1. Aspek Biaya
   a. ETC

$$ETC = \frac{Real\ Cost - BCWP}{CPI} \quad (8)$$

$$= \frac{Rp9.749.979.363,59 - Rp2.688.906.885,96}{1,02}$$

$$= Rp6.931.779.632,70$$

   b. EAC

$$EAC = ACWP + ETC \quad (9)$$

$$= Rp2.639.671.246,17 + Rp6.931.779.632,7$$

$$= Rp9.571.450.878,87$$

   c. VAC

$$VAC = BAC - EAC \quad (10)$$

$$= Rp9.749.979.363,59 - Rp9.571.450.878,87$$

$$= Rp178.528.484,73$$

Setelah dianalisis menggunakan metode Earned Value Concept, diperoleh estimasi biaya untuk pekerjaan tersisa sebesar Rp6.931.779.632,70 dan estimasi total biaya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek sebesar Rp9.571.450.878,87. Hal ini menunjukkan biaya yang dikeluarkan lebih kecil dibandingkan dengan anggaran yang telah direncanakan yaitu sebesar Rp9.749.979.363,59. Jika hal ini tetap berlangsung hingga akhir proyek, maka proyek mengeluarkan biaya yang lebih sedikit daripada anggaran.

2. Aspek Waktu
   a. ETS

Indeks kinerja minggu ke-12 = 1,01
Waktu rencana penyelesaian proyek = 28 minggu
Waktu pelaporan = 12 minggu
Sisa Waktu = 16 minggu

$$ETS = \frac{Sisa\ Waktu}{SPI}$$

$$= \frac{16\ minggu}{1,01}$$

$$= 15,79 \text{ minggu}$$

   b. EAS

$$EAS = ETS + \text{Waktu Pelaporan}$$

$$= 15,79 + 12$$

$$= 27,79 \text{ minggu}$$

Setelah dianalisis dengan metode Earned Value Concept, waktu penyelesaian proyek diperkirakan selama 27,79 minggu yang berarti penyelesaian proyek 0,21 minggu (1,47 hari kerja normal) lebih cepat dari waktu rencana (28

minggu).

SIMPULAN

Hasil evaluasi kinerja proyek minggu ke-1 hingga minggu ke-12 dengan metode earned value memberikan petunjuk bahwa proyek mengalami kemajuan dari yang direncanakan yang ditunjukkan dengan nilai SV = positif (+) yaitu sebesar Rp34.781.855,91 pada minggu ke-12 dan nilai SPI > 1 dengan nilai indeks sebesar 1,01 pada minggu ke-12. Indikator tersebut menunjukkan bahwa pelaksanaan proyek lebih cepat dari jadwal rencana. Sementara itu dari segi biaya, proyek ini mengalami cost underrun yang ditunjukkan oleh indikator CV = positif (+) yaitu sebesar Rp49.235.639,79 dan CPI > 1 yaitu sebesar 1,02 pada minggu ke-12 yang berarti biaya yang dikeluarkan lebih sedikit dibandingkan dengan anggaran.

Estimasi waktu dalam menyelesaikan proyek berdasarkan data pelaporan menunjukkan nilai hasil perkiraan penyelesaian proyek tersebut selama 27,79 minggu yang berarti 0,21 minggu (1,47 hari kerja normal) lebih cepat dibandingkan jadwal yang telah direncanakan dalam kontrak yaitu 28 minggu. Untuk besarnya biaya yang diperlukan dalam menyelesaikan pekerjaan yang tersisa dapat diperkirakan sebesar Rp6.931.779.632,70 yang dapat dilihat berdasarkan nilai ETC dan total perkiraan biaya akhir proyek berdasarkan data pelaporan sebesar Rp9.571.450.878,87 yang dapat dilihat berdasarkan nilai EAC. Maka dari itu, hal ini memberikan petunjuk perkiraan biaya yang dikeluarkan lebih sedikit dari anggaran yaitu sebesar Rp9.749.979.363,59.

DAFTAR PUSTAKA

Auzan, R., Daniar Rizky S, Suharyanto, & Frida Kistiani. (2017). *Pengendalian Biaya Dan Waktu Proyek Dengan Metode Konsep Nilai Hasil (Earned Value)* (Vol. 6).

Ayni, W. N., Suranata, G., & Armaeni, N. K. (2019). *Analisis Kinerja Pelaksanaan Proyek Dengan Menggunakan Metode Earned Value Concept (Studi Kasus Pembangunan Gedung Kantor Perwakilan Bank Indonesia Provinsi Gorontalo)*. Paduraksa, 8(1).

Kartikasari, D. (2014). *Extrapolasi Jurnal Teknik Sipil Untag Surabaya Pengendalian Biaya Dan Waktu Dengan Metode Earned Value (Studi Kasus : Proyek Struktur Dan Arsitektur Production Hall-02 Pandaan)*. Desember, 7(2), 107–114.

Lamato, F., Utiarahman, A., Yusuf Tuloli, M., & Teknik Sipil, J. (2022). *Analisis Earned Value Terhadap Proyek Pembangunan Renovasi Gedung Kantor BPJN*. In *Jvst* (Vol. 1, Issue 2).

Marthania, A. A., Agus, G., & Prawira Adistana, Y. (2023). *Kelayakan Perangkat Dan Media Pembelajaran Video Tutorial*.

Muniroh, R., Kempa, M., & Buyang, C. G. (2021). *Pengendalian Biaya Dan Waktu Dengan Earned Value Concept Pada Proyek Penataan Bangunan.* Jurnal Simetrik, 11(1).

Rahmanto, T., & Janizar, S. (2022). *Pengendalian Biaya Dan Waktu Dengan Metode Earned Value Proyek Familia Urban B. Ek. A. Si*.

Sidiq, A. P., & Johari, G. J. (2022). *Analisis Penerapan Earned Value Terhadap Manajemen Waktu Dan Biaya Pada Proyek Jembatan Cibuni*.

Sutrisna, E., & Kholiq, A. (2018). *Analisis Time Schedule Proyek Pembangunan Gedung Vip Rsud Cideres Kabupaten Majalengka*.

Yulita, S., & Irnawan, D. (2020). *Analisis Proyeksi Jadwal Dan Biaya Akhir Dengan Konsep Nilai Hasil Pada Proyek Konstruksi*.

PENERAPAN MODEL PENGENDALIAN KEGAGALAN KONSTRUKSI PADA PROYEK KONSTRUKSI BERBASIS SISTEM REKAYASA SOSIAL

Saeman[1*], Rusdi Usman Latief[2], Rosmariani Arifuddin[3] dan M Asad Abdurrahman[4]

[1]Mahasiswa Doktoral, Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Malino Km. 6, Gowa*
***e-mail**: saemanemon58@gmail.com*
[2]Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Malino Km. 6, Gowa
e-mail: rusdiusmanlateief@unhas.ac.id
[3]Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Malino Km. 6, Gowa
e-mail: rosmarianiarifuddin@unhas.ac.id
[4]Departemen Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Malino Km. 6, Gowa
e-mail: asad@unhas.ac.id

ABSTRAK

Kerentanan terhadap lingkungan dan kerusakan fisik secara langsung berkaitan dengan aktivitas manusia di sektor bangunan. Perencanaan, desain, implementasi, dan pengawasan proyek bangunan yang tidak memadai dapat menyebabkan lokasi konstruksi yang berbahaya bagi lingkungan dan infrastruktur yang rawan bencana. Literatur tentang model pengendalian kegagalan konstruksi ditinjau dalam makalah ini, dengan fokus pada penelitian yang diselesaikan setelah tahun 2015. Salah satu definisi dari "sistem rekayasa sosial" adalah organisasi keselamatan yang antara lain berfokus pada keselamatan konstruksi. Untuk memberikan banyak penjelasan tentang pengendalian kegagalan konstruksi, model-model pengendalian kegagalan konstruksi, dan tingkat pengendalian kegagalan konstruksi berdasarkan sistem sosio-engineering, makalah ini menyajikan data aktual beserta terobosan teoretis terkini. Pengendalian kegagalan konstruksi berdasarkan sistem sosio-teknik secara umum telah mempengaruhi perilaku pekerja dan tindakan yang berkaitan dengan kesehatan dan keselamatan kerja dari organisasi pemberi tugas. Perilaku manusia memiliki peran utama dalam kegagalan konstruksi karena sistem sosio-teknik memiliki pengaruh yang sangat berbahaya terhadap bangunan dan kegagalan konstruksi. Sistem sosio-teknik, yang berdampak pada perencanaan, pembuatan dokumen perencanaan, dan pengadaan barang dan jasa, merupakan lensa yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengkaji pengembangan model pengendalian kegagalan konstruksi pada proyek konstruksi. Hal ini memiliki konsekuensi untuk penelitian di masa depan, mengingat bahwa keselamatan baru-baru ini menjadi pusat perhatian di semua industri, termasuk konstruksi.

Kata kunci: Kegagalan Konstruksi, Sistem Rekayasa Sosial, Keselamatan Konstruksi, Budaya Keselamatan, Kecelakaan Konstruksi

1. PENDAHULUAN

Salah satu sektor yang paling menguntungkan di dunia adalah konstruksi (Nugroho & Fadhilah, 2023). Terlepas dari ukuran dan cakupannya, industri konstruksi selalu berubah dan beradaptasi dengan lingkungan sosial dan ekonomi (Suryadi dkk., 2021). Sebagai hasil dari penerapan Kebijakan Normal Baru, ledakan konstruksi telah melambat, tetapi sektor ini masih hidup dan menunjukkan bahwa sektor ini dapat berkembang di saat-saat yang tidak terduga (Arman dkk., 2020). Hal ini tidak meniadakan kesulitan yang dihadapi industri bangunan. Secara umum, pertumbuhan PDB Indonesia pada kuartal ketiga tahun 2018 tetap stabil di angka 5,2% per tahun (Surbakti dkk., 2021).

Sulit untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan bangunan. Sering kali, pertemuan dari berbagai keadaan yang berbeda merupakan akar penyebab kegagalan (Malasyi dkk., 2021). Sousa dan Einstein (2021) menyatakan bahwa "kegagalan konstruksi, termasuk cacat kualitas, dapat berasal tidak hanya dari satu sumber saja, namun juga dari berbagai sumber.". Sementara itu, Vlachakis dkk. (2020) menyatakan bahwa perilaku manusia dan elemen lingkungan sering kali mempengaruhi akar penyebab kegagalan bangunan. Faktor alam meliputi kegagalan yang disebabkan oleh perubahan dinamis di lingkungan, seperti gempa bumi, banjir, gelombang laut, dan letusan gunung berapi. Faktor utama penyebab kegagalan bangunan adalah perilaku manusia. Ambisi pihak-pihak yang terlibat untuk mendapatkan uang dengan cepat dengan menempuh cara-cara yang tidak lazim dan menggantikan kompetisi hanya berdasarkan besarnya angka rupiah adalah tanda pertama. Dengan mempertimbangkan hal ini, strategi proaktif untuk mendorong pembangunan di Indonesia dapat dikembangkan, sehingga mengurangi kemungkinan proyek-proyek yang gagal (Gamil & Abdul-Rahman, 2020).

Untuk membantu menurunkan kecelakaan kerja, para peneliti telah melihat keselamatan kerja dari berbagai sudut pandang (Sanni-Anibire dkk., 2020). Dari sudut pandang teknis dan psikologis, sudut pandang ini membantu dalam pengembangan budaya keselamatan yang positif, yang merupakan konsep yang terkait erat dengan budaya organisasi dan telah menerima banyak perhatian di industri ini (Sarifah dkk., 2020). Terlepas dari kenyataan bahwa budaya organisasi merupakan faktor utama dalam menentukan apakah suatu organisasi berhasil atau gagal, tampaknya tidak ada konsensus tentang cara terbaik untuk mendefinisikannya (Alfarisyi & Satrio, 2021)

Lebih jauh lagi, pertanyaan apakah sebuah organisasi memiliki budaya atau merupakan budaya itu sendiri masih diperdebatkan (Muafiq, 2021). Mengingat konteks ini, tidak mengherankan jika tidak ada paradigma budaya keselamatan yang diakui dengan baik (Karima & Koesyanto, 2021). Oleh karena itu, penelitian ini mengkaji berbagai

penelitian tentang budaya keselamatan dan menawarkan definisi, data pendukung, dan kerangka teori. Makalah ini mengkaji gagasan dan pendapat dari berbagai lokasi penelitian dalam konteks keselamatan konstruksi. Hal ini didasarkan pada pemeriksaan kritis terhadap penelitian yang telah dipublikasikan (dari tahun 2015 dan seterusnya). Dengan penekanan pada sisi bangunan dari budaya keselamatan, makalah ini memberikan model konseptual untuk mempelajari budaya keselamatan secara umum. Karena sifat-sifat organisasi memiliki dampak yang signifikan terhadap fungsi budaya keselamatan, tinjauan tidak akan lengkap tanpa menyertakan budaya organisasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Model Kontrol Kegagalan Konstruksi

Kontrak kerja konstruksi harus mencantumkan ketentuan mengenai pertanggungjawaban apabila salah satu pihak gagal memenuhi tanggung jawab yang telah disepakati, sesuai dengan Undang-Undang No. 18 Tahun 1999 tentang Jasa Konstruksi, Pasal 22 ayat (G). Sementara itu, kegagalan konstruksi didefinisikan sebagai suatu keadaan di mana hasil pekerjaan konstruksi, baik keseluruhan maupun sebagian, tidak sesuai dengan spesifikasi pekerjaan yang telah disepakati yang diakibatkan oleh kesalahan yang dilakukan oleh penyedia jasa maupun pengguna jasa dalam Pasal 31 Peraturan Pemerintah No. 29 Tahun 2000 tentang penyelenggaraan jasa konstruksi (Manik dkk., 2021).

Sistem Rekayasa Sosial

Sebuah cabang ilmu yang disebut Sistem Rekayasa Sosial mengintegrasikan sistem teknik dan sistem sosial (manusia dan masyarakat) ke dalam satu sistem yang disebut rekayasa sosial. Struktur sosial menekankan pada kualitas bawaan individu, termasuk sikap, kemampuan, nilai atau norma yang dijunjung tinggi, interaksi interpersonal, sistem penghargaan dan pengakuan, dan otoritas struktural (struktur otoritas). Sistem rekayasa berfokus pada tindakan, sumber daya, tugas, dan proses yang mengubah masukan menjadi keluaran (Peñaloza dkk., 2021).

Hubungan Kerja Pemangku Kepentingan

Proses realisasi sebuah proyek dimulai dari tahap ide dan berlanjut hingga tahap eksekusi, operasional, dan pemeliharaan. Sebuah proyek konstruksi melibatkan tiga pihak dari tahap perencanaan hingga tahap pelaksanaan: perencana (desainer), penyedia layanan kontrak (pemberi kerja), dan pemilik proyek atau prinsipal (pemberi kerja/klien/pemberi kuasa). Kami menyebut pemangku kepentingan atau elemen pelaksana proyek sebagai individu atau organisasi yang menyediakan dana, merencanakan, dan melaksanakan kegiatan proyek konstruksi. Sesuai dengan posisinya masing-masing, setiap elemen memiliki wewenang serta tugas, kewajiban, dan tanggung jawab (Sarkar & Singh, 2022).

Karakteristik Organisasi

“Nilai-nilai yang dianut bersama (apa yang penting) dan keyakinan (bagaimana segala sesuatunya berjalan) yang berinteraksi dengan perusahaan, struktur organisasi, dan sistem kontrol untuk menghasilkan norma-norma perilaku (cara kita bekerja di sini)” adalah deskripsi Zhang dkk (2022) mengenai budaya organisasi yang diikuti oleh Reason (1997, hal. 192) [7]. Al-Bayati (2022) menggambarkan budaya kooperatif sebagai budaya yang melihat tujuan, peran, dan praktik-praktik organisasi untuk merefleksikan tindakan, kepercayaan, perilaku, dan nilai-nilai. Budaya organisasi dapat didefinisikan sebagai, singkatnya, hubungan antara organisasi dan karyawannya di mana organisasi dapat mempengaruhi karyawannya melalui interaksi timbal balik.

Trihn and Feng (2020) sampai pada kesimpulan bahwa tujuh sifat berikut ini membentuk budaya organisasi: (1) desain yang mencakup semua; (2) keseimbangan; (3) beragam; (4) disebarkan melalui (nasional, gabungan, organisasi, departemen, kelompok, dan iklim psikologis); (5) berbagai aspek (budaya yang berbeda atau budaya keselamatan); (6) praktik pelaksanaan (aturan dan prinsip, adat istiadat, karakter utama, dan simbol-simbol); dan (7) fungsional-beginilah cara kita beroperasi di sini. Bilqis dkk (2021) menjelaskan budaya terdiri dari berbagai lapisan, norma-norma yang mendasari, dan nilai-nilai. Ritual membentuk lapisan berikutnya, diikuti oleh simbol dan karakter utama. Organisasi hanya peduli dengan tiga lapisan-ritual, tokoh utama, dan simbol-secara kolektif disebut sebagai implementasi. Memperjelas bahwa bimbingan dan instruksi orang tua menanamkan norma dan nilai pada anak-anak dan membantu mereka untuk tetap seperti itu sepanjang hidup mereka.

Budaya organisasi didefinisikan sebagai “pemahaman yang tetap, multidimensi, dan komprehensif yang disebarkan oleh kelompok anggota organisasi” oleh Djaelani & Retnowati (2022). Budaya organisasi menciptakan struktur, menambah makna, dan/atau mengekspresikan dirinya secara unik dalam aplikasi tertentu. Budaya organisasi dianggap sebagai puncak manajemen. “Pola dasar asumsi yang ditanamkan, ditemukan, dan dikembangkan oleh sebuah kelompok yang ditentukan ketika mereka belajar untuk mengatasi masalah adaptasi eksternal dan integrasi internal” adalah bagaimana Mohammed & Ishak (2024) menggambarkan budaya organisasi. Karena semuanya berjalan dengan cukup lancar dan layak untuk diakui sebagai sesuatu yang valid, kita harus menginstruksikan anggota baru tentang hal ini sebagai cara yang tepat untuk melihat, merasakan, dan memikirkan hal-hal yang berkaitan dengan masalah ini”. Tindakan-tindakan ini menyoroti kompleksitas makna dalam suatu budaya.

Tantangan dari makalah ini adalah mendefinisikan budaya keselamatan konstruksi. Oleh karena itu, sangat penting untuk menyelidiki dan memahami tantangan dan peluang yang terkait dengan budaya keselamatan. Orang-orang biasanya terhubung dengan organisasi dengan cara yang berbeda, atau dengan departemen, divisi, profesi, dan subunit

organisasi lainnya berdasarkan faktor-faktor seperti gender, kelas, etnis, bangsa, dll. Tunjukkan bagaimana pengaturan dan budaya organisasi berinteraksi. Itu akurat. Menurut sejumlah akademisi, analisis budaya harus relevan dengan masalah yang mendasarinya, yang dalam hal ini adalah keselamatan. Menurut Fang dkk (2020), budaya organisasi adalah kepercayaan yang dipegang bersama di dalam perusahaan. Menurut Williams dkk (2020), setiap anggota organisasi berkontribusi pada penciptaan budaya organisasi, yang tidak dipegang oleh satu kelompok saja.

Gagasan tentang budaya keselamatan sering disampaikan oleh Duryan dkk (2020) terpisah dari fitur-fitur organisasi lainnya termasuk jadwal kerja, teknologi, strategi perusahaan, dan pengambilan keputusan keuangan. Pemisahan pengertian tersebut diungkapkan. Budaya keselamatan ini mendefinisikan istilah tersebut secara lebih sempit, dengan fokus utama pada elemen-elemen yang berhubungan langsung dengan keselamatan, seperti perilaku keselamatan dan cita-cita keselamatan (Berglund dkk., 2023). Budaya keselamatan telah digunakan secara luas selama bertahun-tahun, meskipun masih belum terlalu dikenal (Yao, 2023). Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih dalam tentang budaya keselamatan, kami telah melihat beberapa penelitian sebelumnya. Ringkasan penelitian yang telah dilakukan mengenai budaya keselamatan sejak tahun 2000 disajikan pada Tabel 1. Tabel ini menunjukkan seberapa akurat dua puluh tujuh studi yang dipilih untuk penilaian kritis menangkap gagasan tersebut.

Bencana Chernobyl pada bulan April 1986 menyoroti pentingnya memahami keselamatan organisasi dan memberikan bukti adanya kelemahan teknologi. Istilah "budaya keselamatan" pertama kali digunakan oleh IAEA dalam Laporan Ringkasan Pertemuan Tinjauan Pasca-Kecelakaan Chernobyl INSAG dalam Seri Keselamatan No. 75-INSAG-1 tahun 1986. Prinsip-prinsip Keselamatan Dasar untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir, Seri Keselamatan No. 75-INSAG-3 tahun 1988, merupakan tempat IAEA melangkah lebih jauh untuk menguraikan konsep tersebut (IAEA, 1991). Meskipun INSAG-1 menggunakan terminologi yang berkaitan dengan budaya yang diambil dari antropolog (Aboubakar & Li, 2024), tidak ada literatur dari disiplin ilmu manapun yang dikutip dalam publikasi INSAG. Kenyataannya adalah bahwa budaya organisasi secara konseptual tidak memunculkan ide budaya keselamatan. INSAG-3 (1988) mengklarifikasi bahwa "frasa budaya keselamatan adalah hal yang sangat umum, dedikasi dan tanggung jawab pribadi dari semua individu yang terlibat dalam aktivitas apapun yang memiliki pengaruh terhadap keselamatan PLTN."

Namun demikian, terdapat kelangkaan pedoman untuk evaluasi "budaya keselamatan", sehingga membuka ruang interpretasi mengenai makna istilah tersebut. Banyak definisi budaya keselamatan yang dapat ditemukan dalam literatur akademis; Tabel 2 mencantumkan beberapa contoh dari definisi-definisi tersebut. Dari 27 makalah yang dipilih, hanya 8 makalah yang memberikan definisi budaya keselamatan. Mayoritas definisi memiliki keyakinan yang sama tentang masing-masing fokus dan berbeda dalam hal bagaimana orang berpikir dan bertindak secara aman sehubungan dengan hal tersebut. Gagasan bahwa budaya keselamatan lebih berkaitan dengan identitas organisasi daripada harta benda yang dimilikinya biasanya tercermin dalam definisi-definisi ini. Definisi yang paling mendasar diberikan oleh Yidi (2023) dan Basahel (2021) yang secara khusus menguraikan komponen-komponen budaya keselamatan.

Gagasan tentang budaya keselamatan ditetapkan secara rinci melalui penelitian terobosan, seperti yang diterbitkan dalam *Safety Culture: A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group* (INSAH-4) oleh Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA, 1991). Para perintis ini mengacu pada budaya keselamatan sebagai "pertemuan karakteristik dan perilaku dalam organisasi dan individu yang memunculkan sesuatu seperti, sebagai prioritas utama, isu PLTN yang menerima perhatian yang dibenarkan oleh kepentingan mereka." Konsep ini menekankan pada dua gagasan penting: (1) budaya keselamatan yang kuat mengutamakan keselamatan; dan (2) perilaku keselamatan yang baik dan manajemen keselamatan yang baik yang melekat pada organisasi termasuk dalam definisi budaya keselamatan. Makalah ini selanjutnya mengatakan bahwa budaya keselamatan, yang berkaitan dengan orang dan organisasi, merupakan pola pikir struktural dan persyaratan untuk mengintegrasikan semua masalah keselamatan dengan perilaku dan sudut pandang yang tepat. Studi (INSAG-4) sampai pada kesimpulan bahwa "budaya keselamatan" merupakan kata yang banyak digunakan saat ini dan merupakan nilai dasar dari ide tersebut. Menerapkan laporan ini pada skenario tertentu akan meningkatkan nilainya. Laporan ini dilengkapi dengan lampiran yang berisi 143 pertanyaan. Meskipun konsep budaya keselamatan dibahas dalam kaitannya dengan orang dan organisasi, laporan ini tidak menetapkan hubungan antara pengukuran kinerja keselamatan dan budaya keselamatan. Menurut Liang dkk (2020), manajemen keselamatan pada dasarnya adalah struktur sosial yang sepenuhnya tergantung pada pekerja yang menjalankannya. Luasnya sistem, pengetahuan pekerja tentang sistem tersebut, dan keinginan pekerja untuk menggunakannya adalah tiga faktor yang menentukan keberhasilan. Gagasan ini berubah untuk mengatasi dan membentuk fokus baru ini. Kita akan membahas model-model budaya keselamatan di sesi mendatang.

Tabel 1. Daftar dan Sinopsis Tinjauan Literatur tentang Budaya Keselamatan

Referensi	Ringkasan Penelitian
Schulman (2020)	Artikel ini menguraikan seluk-beluk budaya keselamatan dan menawarkan rekomendasi untuk bagian-bagian penyusunnya
Murata (2021)	Menyinggung karya inovatif Barry Turner, yang bukunya *Man-made Disasters* (Turner, 2978) merupakan buku pertama yang menyoroti prosedur organisasi yang diperlukan untuk mendapatkan budaya keselamatan yang kuat dengan belajar dari kesalahan dan pengalaman masa lalu
Man, dkk (2024)	Hasil survei dan gambaran mental risiko yang disajikan dalam model menyoroti beberapa aspek budaya keselamatan perusahaan industri Norsk Hydro, perilaku

	karyawan, persepsi risiko, dan tindakan karyawan. Model yang disajikan menghubungkan tindakan pengendalian risiko dengan elemen budaya keselamatan
Choi, dkk (2020)	Studi ini menyajikan sikap, perilaku, dan tindakan yang dinyatakan. Studi ini melihat perbedaan budaya di dalam dan di antara perusahaan serta di antara subpopulasi di dalam organisasi yang sama. Studi ini juga menawarkan skala penilaian yang dapat dipercaya
Adjekum & Tous (2020)	Studi ini menawarkan model sistem manajemen keselamatan yang telah diperbarui dan melihat hubungan antara berbagai aspek budaya keselamatan dan sistem manajemen keselamatan
He, dkk (2020)	Pandangan fungsionalis tentang prosedur *top-down* yang strategis dan pendekatan bottom-up, berbasis data, dan interpretatif terhadap budaya keselamatan disajikan dalam esai ini sebagai kontras yang bermanfaat
Bisbey, dkk (2021)	Penulis berpendapat bahwa budaya organisasi berputar di sekitar budaya dan menyajikan analisis komprehensif dari lima belas penelitian yang menunjukkan kerumitan ide iklim keselamatan
Alkaissy, dkk (2020)	Menjelaskan konsep budaya keselamatan dan tawarkan kerangka kerja teoretis untuk menganalisis bagaimana hal tersebut mempengaruhi praktik keselamatan organisasi
Ehiaguina & Moda (2020)	Untuk memahami sifat budaya keselamatan yang dinamis, kompleks, dan mencakup semua hal, penulis memberikan model timbal balik dari budaya keselamatan
He, dkk (2020)	Studi ini menciptakan metrik observasi tindakan untuk kinerja keselamatan dan menggambarkan kerangka kerja budaya keselamatan. Namun demikian, investigasi ini tidak dapat menemukan hubungan antara metrik kinerja keselamatan yang diukur dengan observasi tindakan dan iklim keselamatan
Tear, dkk (2020)	Menentukan peran budaya keselamatan dalam mengendalikan prioritas keselamatan di dalam organisasi
Boakye, dkk (2023)	Menawarkan sebuah konsep di mana budaya keselamatan yang ada di lokasi konstruksi mempengaruhi praktik kerja yang aman
Singh, dkk (2022)	Untuk menilai budaya organisasi dan membandingkannya dengan sistem terbaik yang saat ini sedang dikembangkan, buku ini merekomendasikan penggunaan rubrik secara konsisten. Buku ini menjelaskan bahwa perusahaan dapat meningkatkan kinerja keselamatan mereka dengan memilih dan menilai pengukuran dari empat sudut pandang yang berbeda: manajemen, operasi, pelanggan, dan pembelajaran
Platania, dkk (2021)	Meneliti validitas dan reliabilitas kuesioner OSCE (*Organization and Safety Climate Inventory*) untuk menampilkan fitur-fitur iklim keselamatan dan organisasi di 15 perusahaan industri
Bernard (2021)	Membicarakan berbagai sudut pandang yang berbeda mengenai ambiguitas, keragaman, dan inklusi dalam budaya keselamatan
Chen, dkk (2021)	Menganalisis hubungan antara tindakan pencegahan keselamatan dan iklim
Wu, dkk (2020)	Menentukan komponen iklim keselamatan untuk meningkatkan budaya keselamatan konstruksi dan mempelajari dinamika budaya keselamatan kerja pada proyek-proyek bangunan
Bernard (2021)	Membangun sistem, iklim keselamatan, dan model budaya keselamatan kerja berbasis perilaku di sektor konstruksi
Boakye, dkk (2023)	Menentukan bagaimana budaya keselamatan kerja perusahaan konstruksi mempengaruhi kinerjanya sebagaimana ditentukan
Boakye, dkk (2023)	Menentukan bagaimana budaya keselamatan kerja perusahaan konstruksi mempengaruhi kinerjanya sebagaimana ditentukan untuk menciptakan budaya keselamatan kerja, para pemimpin perusahaan perlu menyadari elemen-elemen penting dan tantangan
Ehiaguina & Moda (2020)	Mengenali elemen-elemen yang berkontribusi terhadap budaya keselamatan kerja di sektor konstruksi Malaysia
He, dkk (2020)	Integrasi peserta proyek konstruksi yang penting, seperti pemilik, kontraktor, dan sub-kontraktor, dengan mereka yang menciptakan budaya keselamatan kerja
Singh, dkk (2022)	Mengetahui perasaan para pemangku kepentingan terhadap keselamatan kerja menggunakan analisis bentuk fasad bangunan dengan metodologi

Tabel 2. Definisi Budaya Keselamatan

Referensi	Definisi Budaya Keselamatan
Wu, dkk (2020)	Sebuah gagasan yang abstrak dan memberikan alternatif terhadap metode organisasi tertentu yang didukung oleh pertemuan perspektif individu dan kolektif, proses mental, emosi, dan perilaku. Bagian yang lebih kecil dari keseluruhan budaya organisasi adalah definisi ini.
Schulman (2020)	Istilahbudaya" mengacu pada perilaku, kepercayaan, dan persepsi bersama dari kelompok-kelompok masyarakat adat, yang mendefinisikan norma-norma dan nilai-nilai yang menentukan tindakan dan reaksi mereka terhadap risiko dan sistem pengendalian risiko.
Adjekum & Tous (2020)	Hal ini mencakup perilaku, perbuatan, standar dan prinsip, akuntabilitas individu, dan aspek sumber daya manusia termasuk pendidikan dan akreditasi.
Bisbey, dkk (2021)	Elemen budaya organisasi yang akan mempengaruhi bagaimana orang berperilaku dan melakukan kegiatan yang meningkatkan dan mengurangi risiko.
Ehiaguina & Moda (2020)	Budaya aman adalah tingkat upaya yang dapat diamati di mana semua anggota

	organisasi memusatkan perhatian dan kegiatan mereka untuk meningkatkan keselamatan dengan cara-cara konvensional. Budaya didefinisikan sebagai hasil dari interaksi multiguna antara manusia, pekerjaa, dan organisasi.
Singh, dkk (2022)	Aspek budaya organisasi yang berpengaruh terhadap perilaku dan keputusan karyawan berkaitan dengan kinerja keselamatan organisasi yang ada.
Bernard (2021)	Belajar dari satu sama lain tentang pengalaman, makna, dan interpretasi kerja dan keselamatan, beberapa diantaranya diwakili melalui simbol-simbol yang menginformasikan keputusan tentang risiko, kecelakaan, dan pencegahan.
Ehiaguina & Moda (2020)	Kumpulan indikator, sikap, dan keyakinan keselamatan yang luas yang dimiliki oleh organisasi.

3. MODEL BUDAYA KESELAMATAN

Kekurangan utama dari sebagian besar model budaya keselamatan adalah kurangnya kesesuaian dengan model budaya organisasi yang lebih luas. Budaya organisasi didefinisikan oleh Bernard (2021) sebagai keyakinan, perilaku, dan artefak bersama yang diekspresikan dalam nilai-nilai organisasi, pola perilaku, dan interaksi sosial di antara para anggotanya. Keyakinan-keyakinan ini tertanam kuat dalam sifat manusia, aktivitas manusia, dan hubungan sosial. Model budaya keselamatan terkadang membuat klaim bahwa bagaimana sistem sosio-teknis terstruktur tidak berpengaruh terhadap bagaimana keselamatan dipersepsikan atau dipromosikan. Model budaya keselamatan sosio-teknis ditawarkan oleh Ehiaguina & Moda (2020), dan model ini menghubungkan budaya keselamatan dan sistem manajemen dengan struktur organisasi secara keseluruhan. Namun demikian, model skematik ini tidak memiliki alat yang diperlukan untuk mengevaluasi kapasitas keselamatan dengan obyektif.

Tiga komponen dinamis dan interaktif dibedakan berdasarkan paradigma yang dikemukakan oleh Wu dkk (2020), lingkungan, perilaku, dan orang. Dia membahas sepuluh ide yang menjadi landasan budaya keselamatan yang komprehensif. Kesepuluh prinsip ini, jika dipraktikkan, dapat membantu menciptakan budaya keselamatan yang lengkap di tempat kerja. Kesepuluh prinsip tersebut meliputi memotivasi pekerja melalui kebijakan dan prosedur keselamatan, mengambil pendekatan berbasis perilaku, menekankan pada proses daripada hasil, menyadari bahwa tindakan memiliki konsekuensi, berfokus pada keberhasilan daripada kegagalan, mengamati dan memberikan umpan balik tentang praktik kerja, memberikan umpan balik yang efektif melalui pelatihan berbasis perilaku, mengakui bahwa pengamatan dan pelatihan adalah kegiatan yang sangat penting, menekankan nilai harga diri, memberdayakan rasa memiliki, dan menempatkan keselamatan di atas segalanya. Tiga tahun kemudian, Bisbey dkk (2021) mengusulkan model Budaya Keselamatan Total yang mengkaji hubungan yang dinamis dan interaktif antara perilaku, lingkungan, dan manusia. Konsep ini terdiri dari tiga untaian keselamatan. Sekali lagi, ia mempresentasikan sepuluh nilai atau prinsip yang berfungsi sebagai landasan budaya keselamatan yang mencakup semuanya.

Chen dkk (2021) menawarkan sebuah model yang menunjukkan adanya hubungan timbal balik atau interaksi antara variabel psikologis, perilaku budaya keselamatan, dan kejadian. Banyak interaksi yang diarahkan pada tujuan antara individu (psikologi), pekerjaan mereka (perilaku), dan perusahaan (konteks) menghasilkan budaya organisasi. Manusia tidak sepenuhnya berada di bawah kendali lingkungannya atau kehendaknya sendiri, tetapi mereka terus berinteraksi secara dinamis dengan keduanya (Tear dkk., 2020) Konsep budaya keselamatan dua arah. Daftar periksa yang dibuat sebagai bagian dari tahapan perilaku keselamatan awal dapat digunakan untuk mengukur perilaku nyata yang berhubungan dengan keselamatan; inspeksi sistem manajemen keselamatan dapat mengukur keadaan; dan kuesioner iklim keselamatan dapat mengukur perilaku dan persepsi.

Budaya keselamatan dapat diukur dengan menggunakan paradigma timbal balik ini karena bagian-bagian penyusunnya dapat dinilai secara terpisah atau dikombinasikan. Penggunaan terminologi lingkungan dan bukan terminologi situasional merupakan satu-satunya perbedaan antara model Man dkk (2024) dan model resiprokal. Dampak timbal balik tidak harus memiliki kekuatan yang sama atau berjalan secara serempak, menurut Platania dkk., 2021. Rangkaian aksi dan reaksi ini sebagai “interaksi dinamis yang kekal”. Sebagai hasilnya, para peneliti mencari hubungan antara kinerja keselamatan, iklim, dan budaya. Model-model ini menekankan pada perilaku, khususnya kemauan dan keterlibatan. Setiap individu dalam suatu organisasi memiliki otonomi untuk memutuskan apakah akan menyesuaikan diri dan berpartisipasi atau tidak. Di sisi lain, pengetahuan tentang komponen psikologis dari kinerja pekerjaan dan keselamatan dapat membantu merancang pembelajaran, desain ulang pekerjaan, dan strategi pelatihan yang dapat mengurangi aspek-aspek yang membuat stres dalam pekerjaan dan meningkatkan perilaku keselamatan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menemukan paradigma budaya keselamatan yang sesuai.

Model terbaru dari budaya keselamatan kerja disebut dengan *Safety Culture Interaction* (SCI). Untuk menciptakan budaya keselamatan kerja pada proyek konstruksi dengan lingkup lingkungan, persepsi, dan perilaku, interaksi antara pemilik, kontraktor, dan subkontraktor diseimbangkan dalam model SCI ini sebagai pemegang peran penting atau pemangku kepentingan utama. Tokoh-tokoh kunci ini bertanggung jawab untuk mengawasi inisiatif budaya keselamatan dan karakteristik pekerja. Untuk mengevaluasi budaya keselamatan yang ada, model ini menggunakan metode survei iklim kerja dan keselamatan berbasis perilaku yang merupakan singkatan dari behaviour-based safety. Untuk meningkatkan keterlibatan pemangku kepentingan dengan budaya keselamatan di proyek, SCI ini merupakan model budaya keselamatan yang perlu dibangun.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setiap organisasi dapat meningkatkan keselamatan dengan menciptakan dan mempertahankan budaya keselamatan

yang sehat (Al-Bayati, 2022). Menciptakan budaya positif yang mendorong kinerja keselamatan yang kuat adalah bagian yang sulit. Schulman (2021) menyebutkan beberapa komponen budaya keselamatan yang efektif. Komponen-komponen tersebut adalah: komunikasi yang terbuka, keyakinan akan peningkatan keselamatan, kepedulian (bahwa semua pihak memiliki perhatian dan siap sedia untuk menangani kesalahan kecil dan kesalahan yang tidak dapat dihindari), pentingnya keselamatan, keterlibatan karyawan pada semua tingkatan, peran staf keselamatan, dan integrasi keselamatan di dalam organisasi. Konstruksi membutuhkan budaya keselamatan yang kuat, terutama mengingat catatan keselamatan yang buruk di industri ini (Bisbey dkk., 2021). Komite Peninjauan Industri Konstruksi (Bernard, 2021) diimplementasikan di Wilayah Administratif Khusus Hong Kong (SAR), dan membuat beberapa rekomendasi yang matang, salah satunya adalah persyaratan penting untuk menciptakan budaya keselamatan dalam industri di semua tingkatan. Sebagai bagian dari komitmen manajemen terhadap keselamatan, para penulis menyatakan bahwa studi saat ini sangat penting dalam menganalisis penciptaan dan penilaian tekanan manajemen produksi, yang seharusnya tidak mendorong pekerja untuk bekerja secara sembrono atau mengambil jalan pintas.

5. KESIMPULAN

Pengembangan gagasan, model, dan tingkat pengukuran budaya saat ini, serta pembentukan budaya keselamatan yang positif di sektor konstruksi, secara signifikan dibantu oleh penelitian literatur tentang budaya keselamatan kerja. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa semakin banyak perusahaan, terutama yang bergerak di bidang konstruksi, yang mempertimbangkan konsep pengembangan budaya keselamatan kerja sebagai cara untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan, bencana, insiden, atau kejadian lain di tempat kerja.

Model budaya keselamatan kerja yang telah dipaparkan menunjukkan bagaimana mengevaluasi dan meningkatkan kinerja keselamatan pada proyek-proyek konstruksi secara dinamis, tahan lama, multi-aset, dan holistik. Namun, daripada hanya mengkonseptualisasikan budaya keselamatan kerja, para peneliti harus lebih berkonsentrasi untuk mempraktikkannya dalam rangka mencapai tingkat kecelakaan nihil. Membangun hubungan di antara para pemangku kepentingan lebih disarankan oleh penulis sebagai komponen sistem manajemen keselamatan konstruksi. Hal ini akan memungkinkan untuk penelitian di masa depan untuk menggabungkan pemangku kepentingan dan model budaya keselamatan kerja ke dalam satu sistem manajemen keselamatan konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

Aboubakar, B. O. and Li, H. (2024). "Influence of safety culture on Chinese overseas hydropower project workers' safety performance: a case study in Cameroon". *International Journal of Reliability and Safety*, Vol. 18(3), 266-301.

Adjekum, D. K. and Tous, M. F. (2020). "Assessing the relationship between organizational management factors and a resilient safety culture in a collegiate aviation program with Safety Management Systems (SMS)". *Safety science*, Vol. 131.

Al-Bayati, A. (2022). "Construction safety culture & climate: The relative importance of contributing factors". *Professional Safety*, Vol. 67(02), 24-28.

Alfarisyi, S. and Satrio, B. (2021). "Hubungan pengaruh keterampilan, pengetahuan, kemampuan, sikap, dan budaya kerja terhadap produktivitas karyawan". *Jurnal Ilmu Dan Riset Manajemen (JIRM)*, Vol. 10(6).

Alkaissy, M., Arashpour, M., Ashuri, B., Bai, Y., and Hosseini, R. (2020). "Safety management in construction: 20 years of risk modeling". *Safety science*, Vol. 129.

Arman, U. D. A., Melasari, J., dan Saputri, S. E. (2020). "Identifikasi Faktor-Faktor Penyebab Berkontribusi Terjadinya Kegagalan Konstruksi Jalan dengan Metode Fault Tree Analysis (FTA)". *Civil Engineering Collaboration*, 53-63.

Basahel, A. M. (2021). "Safety leadership, safety attitudes, safety knowledge and motivation toward safety-related behaviors in electrical substation construction projects". *International journal of environmental research and public health*, Vol. 18(8), 4196.

Berglund, L., Johansson, J., Johansson, M., Nygren, M., and Stenberg, M. (2023). "Safety culture development in the construction industry: The case of a safety park in Sweden". *Heliyon*, Vol. 9(9).

Bernard, B. (2021). "Regulating nuclear safety through safety culture". *Journal of safety science and resilience*, 2(3), 172-178.

Bilqis, K., Sultan, M., and Ramdan, I. M. (2021). "Hubungan antara Budaya Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) dengan Perilaku Tidak Aman Pekerja Konstruksi di PT. X Kabupaten Kutai Kartanegara". *Jurnal Kesehatan Masyarakat Mulawarman (JKMM)*,Vol. 3(1).

Bisbey, T. M., Kilcullen, M. P., Thomas, E. J., Ottosen, M. J., Tsao, K., and Salas, E. (2021). "Safety culture: An integration of existing models and a framework for understanding its development". *Human factors*, Vol. 63(1), 88-110.

Boakye, M. K., Adanu, S. K., Adzivor, E. K., Coffie, G. H., and Ayimah, J. C. (2023). "Factors influencing health and safety performance at construction sites in Ghana: the perspective of building artisans". *International journal of occupational safety and ergonomics*, Vol. 29(3), 1121-1127.

Chen, H., Li, H., and Goh, Y. M. (2021). "A review of construction safety climate: Definitions, factors, relationship with safety behavior and research agenda". *Safety science*, Vol. 142.

Choi, J., Gu, B., Chin, S., and Lee, J. S. (2020). "Machine learning predictive model based on national data for fatal accidents of construction workers". *Automation in Construction*, Vol. 110.

Djaelani, M. and Retnowati, E. (2022). "Pengaruh Pengawasan Kerja Dan Penerapan Program Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Terhadap Produktivitas Pekerja Proyek Konstruksi". *Jurnal Ilmiah Satyagraha*, Vol. 5(2), 32-38.

Duryan, M., Smyth, H., Roberts, A., Rowlinson, S., and Sherratt, F. (2020). "Knowledge transfer for occupational health and safety: Cultivating health and safety learning culture in construction firms". *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 139.

Ehiaguina, E. and Moda, H. (2020). "Improving the safety performance of workers by assessing the impact of safety culture on workers' safety behaviour in nigeria oil and gas industry: A pilot study in the niger delta region". *International Journal of Medical and Health Sciences*, Vol. 14(6), 152-156.

Fang, D., Huang, Y., Guo, H., and Lim, H. W. (2020). "LCB approach for construction safety". *Safety science*, Vol. 128.

Gamil, Y. and Abdul-Rahman, I. (2020). "Assessment of critical factors contributing to construction failure in Yemen". *International Journal of Construction Management*, Vol. 20(5), 429-436.

He, C., McCabe, B., Jia, G., and Sun, J. (2020). "Effects of safety climate and safety behavior on safety outcomes between supervisors and construction workers". *Journal of construction engineering and management*, Vol. 146(1).

Karima, A. and Koesyanto, H. (2021). "Penerapan Budaya Keselamatan Dan Perilaku Keselamatan Pada Pekerja Spun Pile Di Pt. X Plant Cibitung". *Jurnal Health Sains*, Vol. 2(3), 273-285.

Liang, H., Zhang, S., and Su, Y. (2020). "The structure and emerging trends of construction safety management research: a bibliometric review". *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 26(3), 469-488.

Malasyi, S., Rauzana, A., dan Afifuddin, M. (2021). "Analisis Faktor-Faktor Risiko yang Mempengaruhi Mutu Pada Proyek Konstruksi di Aceh Utara". *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 11(1), 223-232.

Man, S. S., Chang, F., and Chan, A. H. S. (2024). "Affective risk perception index as a screening tool for construction

workers". *Safety science*, Vol. 175.
Manik, K., Putri, O. N., Azzahra, S. F., Anda, M., and Wijayanti, Y. (2021). "Sustainability in construction work: A perspective on accidents and building failure mitigation in Indonesia". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 794(1).
Mohammed, A. K. and Ishak, M. S. B. (2024). "Identification of project cultural factors affecting the performance of UAE construction projects". *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 86, 205-216.
Muafiq, R. (2021). "Pengaruh Budaya Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Terhadap Kinerja Proyek Konstruksi". *Jurnal Teknik Sipil dan Teknologi Konstruksi*, Vol. 7(1), 27-39.
Murata, A. (2021). "Cultural aspects as a root cause of organizational failure in risk and crisis management in the Fukushima Daiichi disaster". *Safety science*, Vol. 135.
Nugroho, A. dan Fadhilah, M. (2023). "Customer-Centric Strategy Dalam Menghadapi Persaingan Perusahaan Jasa Konstruksi". *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, Vol. 2(4), 316-325.
Peñaloza, G. A., Formoso, C. T., and Saurin, T. A. (2021). "A resilience engineering-based framework for assessing safety performance measurement systems: a study in the construction industry". *Safety science*, Vol. 142.
Platania, S., Paolillo, A., and Silva, S. A. (2021). "The Italian validation of OSCI: The organizational and safety climate inventory". *Safety*, Vol. 7(1).
Sanni-Anibire, M. O., Mahmoud, A. S., Hassanain, M. A., and Salami, B. A. (2020). "A risk assessment approach for enhancing construction safety performance". *Safety science*, Vol. 121, 15-29.
Sarifah, S., Rachman, M. M., and Sulistyawan, E. (2022). "Pengaruh budaya kerja, pengawasan, dan motivasi kerja terhadap disiplin kerja". *Journal of Sustainability Bussiness Research (JSBR)*, Vol. 3(2), 74-77.
Sarkar, D. and Singh, M. (2022). "Risk analysis by integrated fuzzy expected value method and fuzzy failure mode and effect analysis for an elevated metro rail project of Ahmedabad, India". *International Journal of Construction Management*, Vol. 22(10), 1818-1829.
Schulman, P. R. (2020). "Organizational structure and safety culture: Conceptual and practical challenges". S*afety science*, Vol. 126.
Singh, A., Misra, S. C., Kumar, V., and Kumar, U. (2022). "Identification and ordering of safety performance indicators using fuzzy TOPSIS: A case study in Indian construction company". *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 39(1), 77-114.
Sousa, R. L. dan Einstein, H. H. (2021). "Lessons from accidents during tunnel construction". *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 113.
Surbakti, L. S. B., Marseto, M., dan Sishadiyati, S. (2021). "Analisis Pengembangan Sektor Ekonomi Unggulan Dalam Pertumbuhan Ekonomi Di Kota Medan". *Jambura Economic Education Journal*, Vol. 3(2), 143-151.
Suryadi, D., Sulistio, H., dan Megawati, L. A. (2021). "Analisis Risiko Kegagalan Konstruksi Infrastruktur Permukiman". *Bentang: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, Vol. 9(2), 129-138.
Tear, M. J., Reader, T. W., Shorrock, S., and Kirwan, B. (2020). "Safety culture and power: Interactions between perceptions of safety culture, organisational hierarchy, and national culture". *Safety science*, Vol. 121, 550-561.
Trinh, M. T. and Feng, Y. (2020). "Impact of project complexity on construction safety performance: Moderating role of resilient safety culture". *Journal of construction engineering and management*, Vol. 146(2).
Vlachakis, G., Vlachaki, E., and Lourenço, P. B. (2020). "Learning from failure: Damage and failure of masonry structures, after the 2017 Lesvos earthquake (Greece)". *Engineering Failure Analysis*, Vol. 117.
Williams, J., Fugar, F., and Adinyira, E. (2020). "Assessment of health and safety culture maturity in the construction industry in developing economies: A case of Ghanaian construction industry". *Journal of Engineering, Design and Technology*, Vol. 18(4), 865-881.
Wu, C., Luo, X., Wang, T., Wang, Y., and Sapkota, B. (2020). "Safety challenges and improvement strategies of ethnic minority construction workers: A case study in Hong Kong". *International journal of occupational safety and ergonomics*.
Yao, H. (2023). "A model for establishing resilience safety culture for the construction industry". *International journal of occupational safety and ergonomics*, Vol. 29(2), 931-940.
Yidi, M. S. A. (2023). "Building Technology Education Lecturers and Project Managers' Perception on the Impact of Safety Culture in Construction Site in Gombe State". *ATBU Journal of Science, Technology and Education*, Vol. 11(2), 39-47.
Zhang, Q., Chan, A. P., Yang, Y., Guan, J., and Choi, T. N. (2023). "Influence of learning from incidents, safety information flow, and resilient safety culture on construction safety performance". *Journal of Management in Engineering*, Vol. 39(3).

PENGARUH BESARNYA BUNGA PINJAMAN TERHADAP MALL X DI GARUT

Hazairin[1]
Muhammad Taufikqurrohman[2]

[1] *Dosen Jurusan Teknik Sipil,Institut Teknologi Nasional,Jl.PH.H.Mustapa No.23,Bandung*
@gmail.com
[2] *Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil,Institut Teknologi Nasional,Jl.PH.H.Mustapa No.23,Bandung*
Mtaufikqurrohman311@gmail.com

ABSTRACT

Penelitian ini tentang pengaruh besarnya bunga pinjaman terhadap investasi Mall X di Kota Garut, analisis dilakukan pada tiga proyeksi pinjaman yaitu 48,13%, 50% dan 65%, dimana dari ketiga proyeksi tersebut diperlukan analisis *Capital Budgeting* guna penetapan harga sewa tenan dan biaya operasional terealisasikan secara maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besar kecilnya bunga pinjaman terhadap laba dan untuk menentukan harga sewa tenan. Untuk melaksanakan rencana tersebut dibutuhkan analisis capital budgeting dimana didalamnya terdiri dari Payback Periode dan Profitability Index. Berdasarkan analisis tersebut proyek pembangunan Mall X layak dilaksanakan dengan pinjaman modal maksimal sebesar 60,08% dari total investasi.

Kata kunci: Investasi, Pinjaman, Analisis Capital Budgeting

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, industri ritel di Indonesia telah menunjukan pertumbuhan yang signifikan seiring dengan meningkatnya daya beli masyarakat dan urbanisasi yang pesat. Pusat perbelanjaan atau Mall telah menjadi destinasi utama tidak hanya untuk berbelanja, tetapi juga sebagai tempat rekreasi dan sosialisai. Pemilihan lokasi juga menjadi faktor kunci dalam keberhasilan investasi Mall. Lokasi yang strategis, dekat dengan area perumahan, perkantoran, dan transportasi umum, akan meningkatkan pengunjung. Desain Mall juga harus mempertimbangkan kenyamanan, estetika, dan fungsi, dengan menyediakan fasilitas yang lengkap dan modern. Dalam upaya menentukan keberhasilan dari suatu investasi maka dapat dilakukan dengan mengukur tingkat kemampuan laba (*profitability*) suatu proyek menggunakan metode *Payback Period* dan *Profitability Index*.

Berdasakan deskripsi permasalahan di atas, maka dari itu saya mengangkat judul "Pengaruh Besarnya Bunga Pinjaman Terhadap Mall X di Kota Garut", yang didalamnya melibatkan analisis proyeksi biaya operasional, proyeksi pendapatan, proyeksi depresiasi, pendapatan bersih Mall dan proyeksi pinjaman. untuk itu, pemilihan lokasi, desain Mall, dan harga tenan yang di jual perlu di analisis sehingga investasi pada Mall dapat terealisasikan secara maksimal.

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah, bagaimanakah proyeksi penjualan tenan dan biaya operasional 20 tahun kedepan sesuai umur proyek?, apakah rencana investasi pembangunan Mall X ini layak dilaksanakan ? dan berapa persen modal pinjaman yang relevan dipinjam dari total biaya investasi di tahun 2024 Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui kelayakan rencana investasi Mall X dengan melakukan perhitungan terhadap inflasi dimasa sekarang dan masa mendatang, memberikan pertimbangan keputusan rencana pembangunan Mall X di Garut, memberikan pertimbangan peminjaman modal investasi pada tahun 2024, agar tetap dapat memberikan keuntungan bagi perusahaan. Manfaat penelitian yaitu dapat menjadi salah satu dasar dalam penentuan keputusan investasi bagi investor.

2. LANDASAN TEORI

Investasi

Investasi sering disebut penanaman modal (Kurniawan, 2019). Investasi juga yaitu proses mengalokasikan sumber daya, seperti uang untuk tujuan mendapatkan keuntungan di masa depan, menurut Taswan dan Soliha (2002), Investasi juga dapat dilakukan oleh individu dan badan usaha yang memiliki kelebihan dana, yang dilakukan di pasar uang maupun pasar modal selain itu juga dapat dijadikan sebagai kredit dalam masyarakat yang membutuhkan. Kegitanan tersebut merupakan salah satu faktor yang strategis dalam kehidupan perekonomian

Inflasi

Menurut Bank Indonesia, Inflasi adalah kenaikan harga barang dan jasa secara umum dan terus menerus dalam jangka waktu tertentu. Kenaikan harga dari satu atau dua barang saja tidak dapat disebut inflasi kecuali bila kenaikan itu

meluas atau mengakibatkan kenaikan harga pada barang lainnya.

Depresiasi

Depresiasi adalah proses pengalokasian biaya suatu aset tetap sepanjang umur manfaatnya. Ini mencerminkan penurunan nilai aset tersebut seiring berjalannya waktu akibat penggunaan, keausan, atau faktor lain. Depresiasi digunakan dalam akuntansi untuk mencatat penurunan nilai aset tetap seperti mesin, kendaraan, bangunan, dan peralatan. Menurut Zainuri (2021) Depresiasi adalah penurunan nilai suatu aset disebabkan oleh penggunaan terus-menerus sehingga aus dan atau diakibatkan oleh perkembangan teknologi sehingga aset yang lama sudah tidak dapat dipakai lagi. Sedangkan menurut Libby (2008) depresiasi adalah proses alokasi biaya terhadap bangunan dan peralatan selama masa manfaat produktif aset menggunakan metode tertentu, tersusun secara sistematik dan rasional.

Payback periode

Payback Period adalah metode sederhana untuk mengevaluasi kelayakan suatu investasi atau proyek dengan menghitung berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal dari arus kas yang dihasilkan oleh proyek tersebut. *Payback Period* memberikan gambaran tentang risiko likuiditas dari sebuah proyek, tetapi tidak mempertimbangkan nilai waktu dari uang seperti metode *Net Present Value* (NPV).
Rumus yang dipakai untuk menghitung PP adalah:

$$P = (NCF_1 + NCF_2 + NCF_3 + \ldots + NCF_{np}) \quad (1)$$

Profitability index

Profitability Index atau Indeks Profitabilitas adalah metode untuk mengevaluasi kelayakan suatu proyek investasi dengan membandingkan nilai sekarang dari arus kas masuk yang diharapkan dengan nilai sekarang dari arus keluar (investasi awal). PI memberikan rasio yang menunjukan seberapa besar keuntungan yang dihasilkan per unit investasi dan ini sangat berguna dalam pengembalian keputusan investasi, terutama Ketika sumber daya terbatas, Kriteria untuk Profitabilitas indeks yaitu Proyek dinilai layak jika PI > 1,00 sebaliknya dinilai tidak layak jika PI < 1,00.
Rumus yang dipakai untuk menghitung PI adalah:

$$PI = \frac{Jumlah\ PV\ CF\ (PV\ kas\ bersih\ )}{Investasi} \times 100\% \quad (2)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini luas tanah sebesar 28.000 m^2 dan rencana bangunan Mall X 3 lantai dengan luas gedung sebesar 32.000 m^2.dengan rincian total biaya proyek pada pembangunan Mall X dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rincian Data Biaya Proyek

TABEL BIAYA PEMBANGUNAN MALL X

NO	URAIAN	AREA/BOBOT	HARGA SATUAN	JUMLAH
1	**TANAH**	28000 m²	Rp 1,000,000.00	**Rp 28.000.000.000,00**
2	**BANGUNAN**			
2,1	**Pekerjaan Persiapan**	3,9522		**Rp 3,003,600,789.18**
2,2	**Pekerjaan Struktur**	28,3185		**Rp 21,521,549,756.70**
2,3	**Pek. Struktur Atas**	34,6946		**Rp 26,367,270,872.00**
2,4	**Pekerjaan Arsitektur**	33,0347		**Rp 25,105,776,780.11**
	TOTAL			**Rp 103.998.198.198,00**

Pada tabel 1 didapatkan nilai total pembangunan sebesar Rp 103.998.198.198 (Seratus Tiga Miliar Sembilan Ratus Sembilan Puluh Delapan Juta Seratus Sembilan Puluh Delapan Ribu Seratus Sembilan Puluh Delapan Rupiah)

Tabel 2. Perkiraan Sewa Tenan dan Parkiran

PERKIRAAN PENDAPATAN GEDUNG

NO	ITEM	TYPE	UNIT	m²	PER m²	PER UNIT
1	LANTAI 1	1	3	128		Rp 21.760.000,00

		2	5	80		Rp	13.600.000,00
		3	8	64		Rp	10.880.000,00
		area		4281	Rp 200.000,00		
2	LANTAI 2	1	1	128		Rp	21.760.000,00
		2	12	80		Rp	13.600.000,00
		3	4	64		Rp	10.880.000,00
		area		4593	Rp 200.000,00		
3	LANTAI 3	1	0	128		Rp	21.760.000,00
		2	6	80		Rp	13.600.000,00
		3	6	64		Rp	10.880.000,00
		area		5150	Rp 200.000,00		
4	PARKIRAN	Motor	315			Rp	4.000,00
		Mobil	240			Rp	8.000,00
		JUMLAH				**Rp**	**41.989.440.000,00**

Pada tabel 2 didapatkan nilai pendapatan Gedung sebesar Rp 41.989.440.000 per tahun, jumlah tersebut jika semua tenan tersewa semua.

Tabel 3. Perkiraan Biaya Operasional

No.	Keterangan	jumlah	Nilai	BIAYA	
				Per Bulan	Per Tahun
			(Rupiah)	(Rupiah)	(Rupiah)
1	GAJI MANAGER	1	Rp 10.000.000	Rp 10.000.000	Rp 120.000.000
2	ASISTEN MANAGER	1	Rp 5.000.000	Rp 5.000.000	Rp 60.000.000
3	STAF KARYAWAN	3	Rp 3.500.000	Rp 10.500.000	Rp 126.000.000
4	PETUGAS PARKIR	4	Rp 2.200.000	Rp 8.800.000	Rp 105.600.000
5	SECURITY	4	Rp 2.200.000	Rp 8.800.000	Rp 105.600.000
6	PETUGAS KEBERSIHAN	6	Rp 2.200.000	Rp 13.200.000	Rp 158.400.000
7	PAKAIAN DINAS	19	Rp 400.000		Rp 7.600.000
8	SEPATU	19	Rp 200.000		Rp 3.800.000
9	LISTRIK	-	Rp 8.000.000	Rp 8.000.000	Rp 96.000.000
10	PEMELIHARAAN	-	Rp 2.000.000	Rp 2.000.000	Rp 24.000.000
11	ASURANSI	-	Rp 76.793.180		Rp 76.793.180
12	LAIN LAIN	-	Rp 1.000.000	Rp 1.000.000	Rp 12.000.000
	JUMLAH BIAYA OPERASIONAL				Rp 895.793.180

Pada tabel 3 terlihat bahwa jumlah totalbiaya operasional sebesar Rp 895.793.180 (Delapan Ratus Sembilan Puluh Lima Juta Tujuh Ratus Sembilan Puluh Tiga Ribu Seratus Delapan Puluh Rupiah).

Analisis data ini diproyeksikan naik 15% setiap 5(lima) tahun (kecuali parkiran) dan untuk pemasukan tenan pada periode 1 sampai 5 tahun sebesar 25%, periode 6 sampai 10 tahun sebesar 50% dan periode 11 sampai 20 tahun sebesar 80% dari total pendapatan, dan untuk pendapatan parkiran diasumsikan mendapat 40% dari total dan biaya operasional diproyeksikan naik 2,57% dari tahun ke tahun. Adapun beberapa proyeksi tingkat bunga pinjaman yang dipakai pada analisis ini sebesar 48,13%, 50% dan 65% dapat dilihat pada Tabel 4-7 untuk proyeksi 48,13%, Tabel 8-12 untuk proyeksi 50% dan Tabel 13-16 untuk proyeksi bunga pinjaman 65%.

Tabel 4. Proyeksi Laba pada pinjaman 48,13% dengan pemasukan 25%

	Tahun 0	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4	Tahun 5
In Flow						
Loan	Rp 50.056.579.143					
Capital	Rp 53.941.619.055					
Sewa Tenan		Rp12.241.728.000	Rp12.241.728.000	Rp12.241.728.000	Rp12.241.728.000	Rp12.241.728.000
Parkiran		Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000
Total In Flow	Rp103.998.198.198	Rp12.697.488.000	Rp12.697.488.000	Rp12.697.488.000	Rp12.697.488.000	Rp12.697.488.000
Out Flow						
Tanah	Rp 28.000.000.000					
Gedung	Rp 75.998.198.198					
Gaji Karyawan		Rp 675.600.000	Rp 692.962.920	Rp 710.772.067	Rp 729.038.909	Rp 747.775.209
Pakaian Dinas		Rp 11.400.000	Rp 11.692.980	Rp 11.993.490	Rp 12.301.722	Rp 12.617.877
Listrik		Rp 96.000.000	Rp 98.467.200	Rp 100.997.807	Rp 103.593.451	Rp 106.255.802
Asuransi Bangunan		Rp 76.793.180	Rp 78.766.765	Rp 80.791.071	Rp 82.867.401	Rp 84.997.093
Pajak Bumi Bangunan		Rp 114.387.018	Rp 106.027.216	Rp 98.503.395	Rp 91.731.955	Rp 85.637.660
Angsuran Pokok Pinjaman		Rp 7.243.187.002	Rp 7.006.169.100	Rp 6.769.151.197	Rp 6.532.133.295	Rp 6.295.115.393
Pajak Penghasilan		Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800
Pemeliharaan Bangunan		Rp 24.000.000	Rp 24.616.800	Rp 25.249.452	Rp 25.898.363	Rp 26.563.951
Lain-lain		Rp 12.000.000	Rp 12.308.400	Rp 12.624.726	Rp 12.949.181	Rp 13.281.975
Total Out Flow	Rp 103.998.198.198	Rp 12.697.488.000	Rp 12.475.132.181	Rp 12.254.204.004	Rp12.034.635.078	Rp11.816.365.760
Net Cash Flow	Rp -	Rp -	Rp 222.355.819	Rp 443.283.996	Rp 662.852.922	Rp 881.122.240
Cash Balance Beginning		Rp -	Rp -	Rp 222.355.819	Rp 665.639.815	Rp 1.328.492.738
Cash Balance End		Rp -	Rp 222.355.819	Rp 665.639.815	Rp 1.328.492.738	Rp 2.209.614.978

Tabel 5. Proyeksi Laba pada pinjaman 48,13% dengan pemasukan 50%

	Tahun 6	Tahun 7	Tahun 8	Tahun 9	Tahun 10
In Flow					
Loan					
Capital					
Sewa Tenan	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000
Parkiran	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000
Total In Flow	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000
Out Flow					
Tanah					
Gedung					
Gaji Karyawan	Rp 766.993.032	Rp 786.704.753	Rp 806.923.065	Rp 827.660.988	Rp 848.931.875
Pakaian Dinas	Rp 12.942.156	Rp 13.274.769	Rp 13.615.931	Rp 13.965.860	Rp 14.324.783
Listrik	Rp 108.986.576	Rp 111.787.531	Rp 114.660.471	Rp 117.607.245	Rp 120.629.751
Asuransi Bangunan	Rp 87.181.519	Rp 89.422.084	Rp 91.720.231	Rp 94.077.441	Rp 96.495.231
Pajak Bumi Bangunan	Rp 80.152.794	Rp 75.216.414	Rp 70.773.673	Rp 66.775.206	Rp 63.176.585
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp 6.058.097.491	Rp 5.821.079.589	Rp 5.584.061.686	Rp 5.347.043.784	Rp 5.110.025.882
Pajak Penghasilan	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200
Pemeliharaan Bangunan	Rp 27.246.644	Rp 27.946.883	Rp 28.665.118	Rp 29.401.811	Rp 30.157.438
Lain-lain	Rp 13.623.322	Rp 13.973.441	Rp 14.332.559	Rp 14.700.906	Rp 15.078.719
Total Out Flow	Rp 15.781.670.734	Rp 15.565.852.665	Rp 15.351.199.934	Rp 15.137.680.441	Rp 14.925.267.465
Net Cash Flow	Rp 8.865.321.266	Rp 9.081.139.335	Rp 9.295.792.066	Rp 9.509.311.559	Rp 9.721.724.535
Cash Balance Beginning	Rp 2.209.614.978	Rp 11.074.936.244	Rp 20.156.075.580	Rp 29.451.867.646	Rp 38.961.179.205
Cash Balance End	Rp 11.074.936.244	Rp 20.156.075.580	Rp 29.451.867.646	Rp 38.961.179.205	Rp 48.682.903.740

Tabel 6. Proyeksi Laba pada pinjaman 48,13% dengan pemasukan 80%

	Tahun 11	Tahun 12	Tahun 13	Tahun 14	Tahun 15
In Flow					
Loan					
Capital					
Sewa Tenan	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080
Parkiran	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000
Total In Flow	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080
Out Flow					
Tanah					
Gedung					
Gaji Karyawan	Rp 870.749.424	Rp 893.127.685	Rp 916.081.066	Rp 939.624.350	Rp 963.772.695
Pakaian Dinas	Rp 14.692.930	Rp 15.070.538	Rp 15.457.851	Rp 15.855.118	Rp 16.262.594
Listrik	Rp 123.729.936	Rp 126.909.795	Rp 130.171.377	Rp 133.516.781	Rp 136.948.163
Asuransi Bangunan	Rp 98.975.159	Rp 101.518.820	Rp 104.127.854	Rp 106.803.940	Rp 109.548.801
Pajak Bumi Bangunan	Rp 59.937.827	Rp 57.022.944	Rp 54.399.549	Rp 52.038.495	Rp 49.913.545
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp 4.873.007.980	Rp 4.635.990.077	Rp 4.398.972.175	Rp 4.161.954.273	Rp 3.924.936.371
Pajak Penghasilan	Rp 15.524.660.928	Rp 15.524.660.928	Rp 15.524.660.928	Rp 15.524.660.928	Rp 15.524.660.928
Pemeliharaan Bangunan	Rp 30.932.484	Rp 31.727.449	Rp 32.542.844	Rp 33.379.195	Rp 34.237.041
Lain-lain	Rp 15.466.242	Rp 15.863.724	Rp 16.271.422	Rp 16.689.598	Rp 17.118.520
Total Out Flow	Rp 21.612.152.909	Rp 21.401.891.961	Rp 21.192.685.067	Rp 20.984.522.677	Rp 20.777.398.658
Net Cash Flow	Rp 22.744.021.171	Rp 22.954.282.119	Rp 23.163.489.013	Rp 23.371.651.403	Rp 23.578.775.422
Cash Balance Beginning	Rp 48.682.903.740	Rp 71.426.924.911	Rp 94.381.207.030	Rp 117.544.696.043	Rp 140.916.347.445
Cash Balance End	Rp 71.426.924.911	Rp 94.381.207.030	Rp 117.544.696.043	Rp 140.916.347.445	Rp 164.495.122.867

Tabel 7. Proyeksi Laba pada pinjaman 48,13% dengan pemasukan 80%

	Tahun 16	Tahun 17	Tahun 18	Tahun 19	Tahun 20
In Flow					
Loan					
Capital					
Sewa Tenan	Rp 49.648.368.192	Rp 49.648.368.192	Rp 49.648.368.192	Rp 49.648.368.192	Rp 49.648.368.192
Parkiran	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000
Total In Flow	Rp 50.832.048.192	Rp 50.832.048.192	Rp 50.832.048.192	Rp 50.832.048.192	Rp 50.832.048.192
Out Flow					
Tanah					
Gedung					
Gaji Karyawan	Rp 988.541.654	Rp 1.013.947.174	Rp 1.040.005.616	Rp 1.066.733.761	Rp 1.094.148.818
Pakaian Dinas	Rp 16.680.543	Rp 17.109.233	Rp 17.548.940	Rp 17.999.948	Rp 18.462.547
Listrik	Rp 140.467.731	Rp 144.077.751	Rp 147.780.549	Rp 151.578.510	Rp 155.474.077
Asuransi Bangunan	Rp 112.364.205	Rp 115.251.965	Rp 118.213.941	Rp 121.252.039	Rp 124.368.217
Pajak Bumi Bangunan	Rp 48.001.091	Rp 46.279.882	Rp 44.730.793	Rp 43.336.614	Rp 42.081.853
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp 3.687.918.468	Rp 3.450.900.566	Rp 3.213.882.664	Rp 2.976.864.762	Rp 2.739.846.859
Pajak Penghasilan	Rp 17.791.216.867	Rp 17.791.216.867	Rp 17.791.216.867	Rp 17.791.216.867	Rp 17.791.216.867
Pemeliharaan Bangunan	Rp 35.116.933	Rp 36.019.438	Rp 36.945.137	Rp 37.894.627	Rp 38.868.519
Lain-lain	Rp 17.558.466	Rp 18.009.719	Rp 18.472.569	Rp 18.947.314	Rp 19.434.260
Total Out Flow	Rp 22.837.865.958	Rp 22.632.812.595	Rp 22.428.797.078	Rp 22.225.824.442	Rp 22.023.902.017
Net Cash Flow	Rp 27.994.182.234	Rp 28.199.235.597	Rp 28.403.251.114	Rp 28.606.223.750	Rp 28.808.146.175
Cash Balance Beginning	Rp 164.495.122.867	Rp 192.489.305.102	Rp 220.688.540.698	Rp 249.091.791.813	Rp 277.698.015.563
Cash Balance End	Rp 192.489.305.102	Rp 220.688.540.698	Rp 249.091.791.813	Rp 277.698.015.563	Rp 306.506.161.738
Average Cash Flow	Rp				15.325.308.087

Tabel 8. Proyeksi Laba pada pinjaman 50% dengan pemasukan 25%

	Tahun 0	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4	Tahun 5
In Flow						
Loan	Rp 60.110.958.558					
Capital	Rp 43.887.239.640					
Sewa Tenan		Rp 12.241.728.000	Rp12.241.728.000	Rp 12.241.728.000	Rp12.241.728.000	Rp 12.241.728.000
Parkiran		Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000

Total In Flow	Rp 103.998.198.198	Rp 12.697.488.000	Rp12.697.488.000	Rp12.697.488.000	Rp12.697.488.000	Rp 12.697.488.000
Out Flow						
Tanah	Rp 28.000.000.000					
Gedung	Rp 75.998.198.198					
Gaji Karyawan		Rp 675.600.000	Rp692.962.920	Rp710.772.067	Rp 729.038.909	Rp 747.775.209
Pakaian Dinas		Rp 11.400.000	Rp11.692.980	Rp 11.993.490	Rp 12.301.722	Rp 12.617.877
Listrik		Rp 96.000.000	Rp98.467.200	Rp 100.997.807	Rp 103.593.451	Rp 106.255.802
Asuransi Bangunan		Rp 76.793.180	Rp 78.766.765	Rp 80.791.071	Rp 82.867.401	Rp 84.997.093
Pajak Bumi Bangunan		Rp 114.387.018	Rp106.027.216	Rp98.503.395	Rp 91.731.955	Rp 85.637.660
Angsuran Pokok Pinjaman		Rp 7.524.269.640	Rp7.425.403.905	Rp 7.169.718.171	Rp 6.914.032.437	Rp 6.658.346.703
Pajak Penghasilan		Rp 4.444.120.800	Rp4.444.120.800	Rp4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800
Pemeliharaan Bangunan		Rp 24.000.000	Rp 24.616.800	Rp25.249.452	Rp 25.898.363	Rp 26.563.951
Lain-lain		Rp12.000.000	Rp12.308.400	Rp12.624.726	Rp 12.949.181	Rp 13.281.975
Total Out Flow	Rp 103.998.198.198	Rp12.978.570.638	Rp12.894.366.986	Rp12.654.770.978	Rp12.416.534.219	Rp 12.179.597.070
Net Cash Flow	Rp -	-Rp281.082.638	-Rp196.878.986	Rp 42.717.022	Rp 280.953.781	Rp 517.890.930
Cash Balance Beginning		Rp -	-Rp281.082.638	-Rp 477.961.624	-Rp 435.244.602	-Rp 154.290.821
Cash Balance End		-Rp281.082.638	-Rp477.961.624	-Rp 435.244.602	-Rp 154.290.821	Rp 363.600.110

Tabel 9. Proyeksi Laba pada pinjaman 50% dengan pemasukan 25% dan penambahan pinjaman

	Tahun 0	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4	Tahun 5
In Flow						
Loan	Rp 60.110.958.558	Rp 500.000.000				
Capital	Rp 43.887.239.640					
Sewa Tenan		Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000
Parkiran		Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000
Total In Flow	Rp 103.998.198.198	Rp 13.197.488.000	Rp 12.697.488.000	Rp 12.697.488.000	Rp 12.697.488.000	Rp 12.697.488.000
Out Flow						
Tanah	Rp 28.000.000.000					
Gedung	Rp 75.998.198.198					
Gaji Karyawan		Rp 675.600.000	Rp 692.962.920	Rp 710.772.067	Rp 729.038.909	Rp 747.775.209
Pakaian Dinas		Rp 11.400.000	Rp 11.692.980	Rp 11.993.490	Rp 12.301.722	Rp 12.617.877
Listrik		Rp 96.000.000	Rp 98.467.200	Rp 100.997.807	Rp 103.593.451	Rp 106.255.802
Asuransi Bangunan		Rp 76.793.180	Rp 78.766.765	Rp 80.791.071	Rp 82.867.401	Rp 84.997.093
Pajak Bumi Bangunan		Rp 114.387.018	Rp 106.027.216	Rp 98.503.395	Rp 91.731.955	Rp 85.637.660
Angsuran Pokok Pinjaman		Rp 7.524.269.640	Rp 7.425.403.905	Rp 7.169.718.171	Rp 6.914.032.437	Rp 6.658.346.703
Pajak Penghasilan		Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800
Pemeliharaan Bangunan		Rp 24.000.000	Rp 24.616.800	Rp 25.249.452	Rp 25.898.363	Rp 26.563.951
Lain-lain		Rp 12.000.000	Rp 12.308.400	Rp 12.624.726	Rp 12.949.181	Rp 13.281.975
Total Out Flow	Rp 103.998.198.198	Rp 12.978.570.638	Rp 12.894.366.986	Rp 12.654.770.978	Rp 12.416.534.219	Rp 12.179.597.070
Net Cash Flow	Rp -	Rp 218.917.362	-Rp 196.878.986	Rp 42.717.022	Rp 280.953.781	Rp 517.890.930
Cash Balance Beginning		Rp -	Rp 218.917.362	Rp 22.038.376	Rp 64.755.398	Rp 345.709.179
Cash Balance End		Rp 218.917.362	Rp 22.038.376	Rp 64.755.398	Rp 345.709.179	Rp 863.600.110

Tabel 10. Proyeksi Laba pada pinjaman 50% dengan pemasukan 50% dan penambahan pinjaman

	Tahun 6	Tahun 7	Tahun 8	Tahun 9	Tahun 10
In Flow					
Loan					
Capital					
Sewa Tenan	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000	Rp 23.463.312.000
Parkiran	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000
Total In Flow	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000	Rp 24.646.992.000
Out Flow					
Tanah					
Gedung					
Gaji Karyawan	Rp 766.993.032	Rp 786.704.753	Rp 806.923.065	Rp 827.660.988	Rp 848.931.875
Pakaian Dinas	Rp 12.942.156	Rp 13.274.769	Rp 13.615.931	Rp 13.965.860	Rp 14.324.783
Listrik	Rp 108.986.576	Rp 111.787.531	Rp 114.660.471	Rp 117.607.245	Rp 120.629.751
Asuransi Bangunan	Rp 87.181.519	Rp 89.422.084	Rp 91.720.231	Rp 94.077.441	Rp 96.495.231
Pajak Bumi Bangunan	Rp 80.152.794	Rp 75.216.414	Rp 70.773.673	Rp 66.775.206	Rp 63.176.585
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp 6.402.660.968	Rp 6.046.975.234	Rp 5.800.759.500	Rp 5.554.543.766	Rp 5.308.328.032
Pajak Penghasilan	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200	Rp 8.626.447.200
Pemeliharaan Bangunan	Rp 27.246.644	Rp 27.946.883	Rp 28.665.118	Rp 29.401.811	Rp 30.157.438
Lain-lain	Rp 13.623.322	Rp 13.973.441	Rp 14.332.559	Rp 14.700.906	Rp 15.078.719
Total Out Flow	Rp 16.126.234.211	Rp 15.791.748.310	Rp 15.567.897.748	Rp 15.345.180.423	Rp 15.123.569.614
Net Cash Flow	Rp 8.520.757.789	Rp 8.855.243.690	Rp 9.079.094.252	Rp 9.301.811.577	Rp 9.523.422.386
Cash Balance Beginning	Rp 863.600.110	Rp 9.384.357.898	Rp 18.239.601.588	Rp 27.318.695.840	Rp 36.620.507.417
Cash Balance End	Rp 9.384.357.898	Rp 18.239.601.588	Rp 27.318.695.840	Rp 36.620.507.417	Rp 46.143.929.803

Tabel 11. Proyeksi Laba pada pinjaman 50% dengan pemasukan 80% dan penambahan pinjaman

	Tahun 11	Tahun 12	Tahun 13	Tahun 14	Tahun 15
In Flow					
Loan					
Capital					
Sewa Tenan	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080	Rp 43.172.494.080
Parkiran	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000	Rp 1.183.680.000
Total In Flow	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080	Rp 44.356.174.080
Out Flow					
Tanah					
Gedung					
Gaji Karyawan	Rp 870.749.424	Rp 893.127.685	Rp 916.081.066	Rp 939.624.350	Rp 963.772.695
Pakaian Dinas	Rp 14.692.930	Rp 15.070.538	Rp 15.457.851	Rp 15.855.118	Rp 16.262.594
Listrik	Rp 123.729.936	Rp 126.909.795	Rp 130.171.377	Rp 133.516.781	Rp 136.948.163

Asuransi Bangunan	Rp	98.975.159	Rp	101.518.820	Rp	104.127.854	Rp	106.803.940	Rp	109.548.801
Pajak Bumi Bangunan	Rp	59.937.827	Rp	57.022.944	Rp	54.399.549	Rp	52.038.495	Rp	49.913.545
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp	5.062.112.297	Rp	4.815.896.563	Rp	4.569.680.829	Rp	4.323.465.095	Rp	4.077.249.360
Pajak Penghasilan	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928
Pemeliharaan Bangunan	Rp	30.932.484	Rp	31.727.449	Rp	32.542.844	Rp	33.379.195	Rp	34.237.041
Lain-lain	Rp	15.466.242	Rp	15.863.724	Rp	16.271.422	Rp	16.689.598	Rp	17.118.520
Total Out Flow	Rp	21.801.257.227	Rp	21.581.798.447	Rp	21.363.393.721	Rp	21.146.033.499	Rp	20.929.711.648
Net Cash Flow	Rp	22.554.916.853	Rp	22.774.375.633	Rp	22.992.780.359	Rp	23.210.140.581	Rp	23.426.462.432
Cash Balance Beginning	Rp	46.143.929.803	Rp	68.698.846.656	Rp	91.473.222.290	Rp	114.466.002.649	Rp	137.676.143.230
Cash Balance End	Rp	68.698.846.656	Rp	91.473.222.290	Rp	114.466.002.649	Rp	137.676.143.230	Rp	161.102.605.662

Tabel 12. Proyeksi Laba pada pinjaman 50% dengan pemasukan 80% dan penambahan pinjaman

	Tahun 16		Tahun 17		Tahun 18		Tahun 19		Tahun 20
In Flow									
Loan									
Capital									
Sewa Tenan	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192
Parkiran	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000
Total In Flow	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192
Out Flow									
Tanah									
Gedung									
Gaji Karyawan	Rp	988.541.654	Rp	1.013.947.174	Rp	1.040.005.616	Rp	1.066.733.761	Rp	1.094.148.818
Pakaian Dinas	Rp	16.680.543	Rp	17.109.233	Rp	17.548.940	Rp	17.999.948	Rp	18.462.547
Listrik	Rp	140.467.731	Rp	144.077.751	Rp	147.780.549	Rp	151.578.510	Rp	155.474.077
Asuransi Bangunan	Rp	112.364.205	Rp	115.251.965	Rp	118.213.941	Rp	121.252.039	Rp	124.368.217
Pajak Bumi Bangunan	Rp	48.001.091	Rp	46.279.882	Rp	44.730.793	Rp	43.336.614	Rp	42.081.853
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp	3.831.033.626	Rp	3.584.817.892	Rp	3.338.602.158	Rp	3.092.386.423	Rp	2.846.170.689
Pajak Penghasilan	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867
Pemeliharaan Bangunan	Rp	35.116.933	Rp	36.019.438	Rp	36.945.137	Rp	37.894.627	Rp	38.868.519
Lain-lain	Rp	17.558.466	Rp	18.009.719	Rp	18.472.569	Rp	18.947.314	Rp	19.434.260
Total Out Flow	Rp	22.980.981.115	Rp	22.766.729.921	Rp	22.553.516.571	Rp	22.341.346.103	Rp	22.130.225.847
Net Cash Flow	Rp	27.851.067.077	Rp	28.065.318.271	Rp	28.278.531.621	Rp	28.490.702.089	Rp	28.701.822.345
Cash Balance Beginning	Rp	161.102.605.662	Rp	188.953.672.738	Rp	217.018.991.009	Rp	245.297.522.630	Rp	273.788.224.719
Cash Balance End	Rp	188.953.672.738	Rp	217.018.991.009	Rp	245.297.522.630	Rp	273.788.224.719	Rp	302.490.047.064
Average Cash Flow	Rp									15.124.502.353

Tabel 13. Proyeksi Laba pada pinjaman 65% dengan pemasukan 25%

	Tahun 0	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4	Tahun 5
In Flow						
Loan	Rp 67.598.828.829					
Capital	Rp 36.399.369.369					
Sewa Tenan		Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000	Rp 12.241.728.000
Parkiran		Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000	Rp 455.760.000
Total In Flow	Rp 103.998.198.198	Rp 12.697.488.000	Rp 12.697.488.000	Rp 12.697.488.000	Rp 12.697.488.000	Rp 12.697.488.000
Out Flow						
Tanah	Rp 28.000.000.000					
Gedung	Rp 75.998.198.198					
Gaji Karyawan		Rp 675.600.000	Rp 692.962.920	Rp 710.772.067	Rp 729.038.909	Rp 747.775.209
Pakaian Dinas		Rp 11.400.000	Rp 11.692.980	Rp 11.993.490	Rp 12.301.722	Rp 12.617.877
Listrik		Rp 96.000.000	Rp 98.467.200	Rp 100.997.807	Rp 103.593.451	Rp 106.255.802
Asuransi Bangunan		Rp 76.793.180	Rp 78.766.765	Rp 80.791.071	Rp 82.867.401	Rp 84.997.093
Pajak Bumi Bangunan		Rp 114.387.018	Rp 106.027.216	Rp 98.503.395	Rp 91.731.955	Rp 85.637.660
Angsuran Pokok Pinjaman		Rp 9.781.550.532	Rp 9.461.470.077	Rp 9.141.389.623	Rp 8.821.309.168	Rp 8.501.228.713
Pajak Penghasilan		Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800	Rp 4.444.120.800
Pemeliharaan Bangunan		Rp 24.000.000	Rp 24.616.800	Rp 25.249.452	Rp 25.898.363	Rp 26.563.951
Lain-lain		Rp 12.000.000	Rp 12.308.400	Rp 12.624.726	Rp 12.949.181	Rp 13.281.975
Total Out Flow	Rp 103.998.198.198	Rp 15.235.851.530	Rp 14.930.433.158	Rp 14.626.442.429	Rp 14.323.810.950	Rp 14.022.479.080
Net Cash Flow	Rp -	-Rp 2.538.363.530	-Rp 2.232.945.158	-Rp 1.928.954.429	-Rp 1.626.322.950	-Rp 1.324.991.080
Cash Balance Beginning		Rp -	-Rp 2.538.363.530	-Rp 4.771.308.687	-Rp 6.700.263.116	-Rp 8.326.586.067
Cash Balance End		-Rp 2.538.363.530	-Rp 4.771.308.687	-Rp 6.700.263.116	-Rp 8.326.586.067	-Rp 9.651.577.147

Tabel 14. Proyeksi Laba pada pinjaman 65% dengan pemasukan 50%

	Tahun 6		Tahun 7		Tahun 8		Tahun 9		Tahun 10
In Flow									
Loan									
Capital									
Sewa Tenan	Rp	23.463.312.000	Rp	23.463.312.000	Rp	23.463.312.000	Rp	23.463.312.000	Rp	23.463.312.000
Parkiran	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000
Total In Flow	Rp	24.646.992.000	Rp	24.646.992.000	Rp	24.646.992.000	Rp	24.646.992.000	Rp	24.646.992.000
Out Flow									
Tanah									
Gedung									
Gaji Karyawan	Rp	766.993.032	Rp	786.704.753	Rp	806.923.065	Rp	827.660.988	Rp	848.931.875
Pakaian Dinas	Rp	12.942.156	Rp	13.274.769	Rp	13.615.931	Rp	13.965.860	Rp	14.324.783
Listrik	Rp	108.986.576	Rp	111.787.531	Rp	114.660.471	Rp	117.607.245	Rp	120.629.751
Asuransi Bangunan	Rp	87.181.519	Rp	89.422.084	Rp	91.720.231	Rp	94.077.441	Rp	96.495.231
Pajak Bumi Bangunan	Rp	80.152.794	Rp	75.216.414	Rp	70.773.673	Rp	66.775.206	Rp	63.176.585
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp	8.181.148.259	Rp	7.861.067.804	Rp	7.540.987.350	Rp	7.220.906.895	Rp	6.900.826.441

Pajak Penghasilan	Rp	8.626.447.200	Rp	8.626.447.200	Rp	8.626.447.200	Rp	8.626.447.200	Rp	8.626.447.200
Pemeliharaan Bangunan	Rp	27.246.644	Rp	27.946.883	Rp	28.665.118	Rp	29.401.811	Rp	30.157.438
Lain-lain	Rp	13.623.322	Rp	13.973.441	Rp	14.332.559	Rp	14.700.906	Rp	15.078.719
Total Out Flow	Rp	17.904.721.502	Rp	17.605.840.881	Rp	17.308.125.598	Rp	17.011.543.552	Rp	16.716.068.024
Net Cash Flow	Rp	6.742.270.498	Rp	7.041.151.119	Rp	7.338.866.402	Rp	7.635.448.448	Rp	7.930.923.976
Cash Balance Beginning	-Rp	9.651.577.147	-Rp	2.909.306.649	Rp	4.131.844.470	Rp	11.470.710.873	Rp	19.106.159.320
Cash Balance End	-Rp	2.909.306.649	Rp	4.131.844.470	Rp	11.470.710.873	Rp	19.106.159.320	Rp	27.037.083.297

Tabel 15. Proyeksi Laba pada pinjaman 65% dengan pemasukan 80%

	Tahun 11		Tahun 12		Tahun 13		Tahun 14		Tahun 15	
In Flow										
Loan										
Capital										
Sewa Tenan	Rp	43.172.494.080	Rp	43.172.494.080	Rp	43.172.494.080	Rp	43.172.494.080	Rp	43.172.494.080
Parkiran	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000
Total In Flow	Rp	44.356.174.080	Rp	44.356.174.080	Rp	44.356.174.080	Rp	44.356.174.080	Rp	44.356.174.080
Out Flow										
Tanah										
Gedung										
Gaji Karyawan	Rp	870.749.424	Rp	893.127.685	Rp	916.081.066	Rp	939.624.350	Rp	963.772.695
Pakaian Dinas	Rp	14.692.930	Rp	15.070.538	Rp	15.457.851	Rp	15.855.118	Rp	16.262.594
Listrik	Rp	123.729.936	Rp	126.909.795	Rp	130.171.377	Rp	133.516.781	Rp	136.948.163
Asuransi Bangunan	Rp	98.975.159	Rp	101.518.820	Rp	104.127.854	Rp	106.803.940	Rp	109.548.801
Pajak Bumi Bangunan	Rp	59.937.827	Rp	57.022.944	Rp	54.399.549	Rp	52.038.495	Rp	49.913.545
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp	6.580.745.986	Rp	6.260.665.532	Rp	5.940.585.077	Rp	5.620.504.623	Rp	5.300.424.168
Pajak Penghasilan	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928	Rp	15.524.660.928
Pemeliharaan Bangunan	Rp	30.932.484	Rp	31.727.449	Rp	32.542.844	Rp	33.379.195	Rp	34.237.041
Lain-lain	Rp	15.466.242	Rp	15.863.724	Rp	16.271.422	Rp	16.689.598	Rp	17.118.520
Total Out Flow	Rp	23.319.890.916	Rp	23.026.567.416	Rp	22.734.297.970	Rp	22.443.073.027	Rp	22.152.886.456
Net Cash Flow	Rp	21.036.283.164	Rp	21.329.606.664	Rp	21.621.876.110	Rp	21.913.101.053	Rp	22.203.287.624
Cash Balance Beginning	Rp	27.037.083.297	Rp	48.073.366.460	Rp	69.402.973.125	Rp	91.024.849.235	Rp	112.937.950.288
Cash Balance End	Rp	48.073.366.460	Rp	69.402.973.125	Rp	91.024.849.235	Rp	112.937.950.288	Rp	135.141.237.912

Tabel 16. Proyeksi Laba pada pinjaman 65% dengan pemasukan 80%

	Tahun 16		Tahun 17		Tahun 18		Tahun 19		Tahun 20	
In Flow										
Loan										
Capital										
Sewa Tenan	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192	Rp	49.648.368.192
Parkiran	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000	Rp	1.183.680.000
Total In Flow	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192	Rp	50.832.048.192
Out Flow										
Tanah										
Gedung										
Gaji Karyawan	Rp	988.541.654	Rp	1.013.947.174	Rp	1.040.005.616	Rp	1.066.733.761	Rp	1.094.148.818
Pakaian Dinas	Rp	16.680.543	Rp	17.109.233	Rp	17.548.940	Rp	17.999.948	Rp	18.462.547
Listrik	Rp	140.467.731	Rp	144.077.751	Rp	147.780.549	Rp	151.578.510	Rp	155.474.077
Asuransi Bangunan	Rp	112.364.205	Rp	115.251.965	Rp	118.213.941	Rp	121.252.039	Rp	124.368.217
Pajak Bumi Bangunan	Rp	48.001.091	Rp	46.279.882	Rp	44.730.793	Rp	43.336.614	Rp	42.081.853
Angsuran Pokok Pinjaman	Rp	4.980.343.714	Rp	4.660.263.259	Rp	4.340.182.805	Rp	4.020.102.350	Rp	3.700.021.896
Pajak Penghasilan	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867	Rp	17.791.216.867
Pemeliharaan Bangunan	Rp	35.116.933	Rp	36.019.438	Rp	36.945.137	Rp	37.894.627	Rp	38.868.519
Lain-lain	Rp	17.558.466	Rp	18.009.719	Rp	18.472.569	Rp	18.947.314	Rp	19.434.260
Total Out Flow	Rp	24.130.291.203	Rp	23.842.175.289	Rp	23.555.097.219	Rp	23.269.062.030	Rp	22.984.077.054
Net Cash Flow	Rp	26.701.756.989	Rp	26.989.872.903	Rp	27.276.950.973	Rp	27.562.986.162	Rp	27.847.971.138
Cash Balance Beginning	Rp	135.141.237.912	Rp	161.842.994.901	Rp	188.832.867.804	Rp	216.109.818.777	Rp	243.672.804.939
Cash Balance End	Rp	161.842.994.901	Rp	188.832.867.804	Rp	216.109.818.777	Rp	243.672.804.939	Rp	271.520.776.077
Average Cash Flow	Rp									13.576.038.804

Penilaian kelayakan dengan Payback Periode

Payback Periode adalah metode untuk menganalisa suatu investasi dimana dengan menghitung berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal dari arus kas yang dihasilkan oleh proyek tersebut.

Tabel 17. Payback Periode

Tahun	1	2	3	4	5	6	7
Aliran kas (Rp)	Rp -	Rp 222.355.819,32	Rp 443.283.996,02	Rp 662.852.922,39	Rp 881.122.240,15	Rp 8.865.321.266,34	Rp 9.081.139.335,44
Tahun	8	9	10	11	12	13	
Aliran kas (Rp)	Rp 9.295.792.065,94	Rp 9.509.311.558,94	Rp 9.721.724.535,48	Rp 22.744.021.170,82	Rp 22.954.282.119,01	Rp 23.163.489.012,74	

P = Rp 0 + Rp 222,355,819.32 + Rp 443,283,996.02 + Rp 662,852,922.39 +Rp 881,122,240.15 + Rp 8,865,321,266.34 + Rp 9,081,139,335.44 +Rp 9,295,792,065.94 + Rp 9,509,311,558.94 + Rp 9,721,724,535.48 +Rp 22,744,021,170.82 + Rp 22,954,282,119.01 = Rp 94,381,207,029.84

Periode pengembalian = $12 + \frac{\text{Rp } 103.998.198.198 - \text{Rp } 94,381,207,029.84}{\text{Rp } 23,163,489,012.74} = 12{,}41$

= 12 tahun 5 bulan

Dari hasil perhitungan di atas didapatkan waktu pengembalian investasi 12 tahun 5 bulan untuk pinjaman, dimana dapat dikatakan layak dikarenakan kurang dari umur Investasi rencana (20 Tahun).

Penilaian kelayakan dengan Profitability Index

Profitability Index atau Indeks Profitabilitas adalah metode untuk mengevaluasi kelayakan suatu proyek investasi dengan membandingkan nilai sekarang dari arus kas masuk yang diharapkan dengan nilai sekarang dari arus keluar (investasi awal). Proyek dinilai layak jika nilai PI lebih dari 1.

Tabel 18. Hasil Profitability Index

Analalisis Profitability Index	
Jumlah Present Value Cash Flow	Rp 115.733.989.222,89
Investasi	Rp 103.998.198.198,00
Profitability Index	1,113
Keterangan	>1 ; layak
Hasil	**LAYAK**

Perhitungan dari metode PI sebagai berikut:

$$PI = \frac{Jumlah\ PV\ CF\ (PV\ kas\ bersih\ )}{Investasi} \times 100\%$$

$$PI = \frac{\text{Rp } 115,733,989,222,89}{Rp\ 103.998.198.198} \times 100\% = 1{,}11$$

Maka dari hasil perhitungan dapat dikatakan proyek pembangunan layak dilaksanakan karena nilai Profitability Index lebih dari 1.

PEMBAHASAN

Pada hasil analisis dalam proyeksi investasi Mall X dengan menggunakan proyeksi dana pinjaman investasi sebesar 48,13%, 50% dan 65%, menunjukan bahwa semakin besar pinjaman maka dapat mempengaruhi kelayakan investasi tersebut.

Pada penelitian ini, terdapat beberapa proyeksi pinjaman yang menghasilkan nilai investasi untuk 20 tahun kedepan di antaranya 48,13%, 50% dan 65%, untuk proyeksi 48,13% adalah titik dimana nilai persentase pinjaman yang relevan bagi investasi Mall X ini karena nilai dari arus kas yang didapatkan pada perhitungan tidak dilakukan lagi pinjaman untuk biaya operasional dan hanya pada tahun pertama saja tidak mendapatkan laba. Hasil dari proyeksi ini menunjukan layak setelah dilakukan analisis *capital budgeting* dimana nilai PP yaitu 12,42 atau sekitar 12 tahun 5 bulan dan untuk nilai PI yaitu sebesar 1,11 dimana dari kedua hasil itu maka proyeksi pinjaman 48,13% dinyatakan layak untuk dipakai.

Pada proyeksi 50%, *Net Cash Flow* yang didapatkan pada tahun pertama sampai tahun ketiga bernilai minus sehingga dalam penelitian ini dilakukan pinjaman tambahan pada tahun pertama senilai Rp 500.000.000 (lima ratus juta rupiah) untuk menutupi biaya operasional. Hasil dari proyeksi setelah penambahan modal pinjaman ini layak setelah dilakukan analisis *capital budgeting* dimana nilai PP yaitu 12,54 atau sekitar 12 tahun 7 bulan dan untuk nilai PI yaitu sebesar 1,09 dimana dari nilai tersebut proyeksi pinjaman 50% dari total investasi layak untuk dipakai.

Pada proyeksi 65%, npv yang didapatkan sebesar -Rp 4.830.690.451 yang dimana pada proyeksi ini tidak dapat dipakai pada pengoprasian untuk mall x, setelah dilakukan ketiga proyeksi tersebut selanjutnya menginterpolasi nilai pinjaman 50% dan 65% untuk mendapatkan hasil NPV yang bernilai 0, dari hasil tersebut didapatkan batas untuk modal pinjaman investasi yaitu sebesar 60,09% atau sebesar Rp 62.483.609.994 ini adalah nominal maksimal yang dapat dipinjam untuk invetasi mall x di kota garut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dapat disimpulkan, rencana investasi Mall X layak dilaksanakan dengan pinjaman dibawah 60,09%, nilai pinjaman yang relevan berada di 48,13% dari total modal investasi, dan tingkat pinjaman dapat

mempengaruhi MARR dan IRR dimana semakin besar pinjaman maka akan semakin besar nilai MARR dan semakin kecil juga nilai IRR yang didapatkan.

REFERENSI

Kurniawan, C. (2019). Pengaruh Investasi Terhadap Perekonomian Indonesia. Jurnal Media Wahana Ekonomika, 12(4).

Robert Libby, dkk. 2008. Akutansi Keuangan. Ed. 1. Andi. Yogyakarta.

Soliha, Taswan. (2002). Pengaruh KebijakanH utang Terhadap Nilai Perusahaan Serta Beberapa Faktor Yang Mempengaruhinya. Jurnal Ekonomi dan Bisnis. STIE Stikubank : Semarang

Zainuri. (2021). Ekonomi Teknik, Padang : CV Jasa Surya

PENGARUH PENGAWASAN TERHADAP TINDAKAN PERILAKU TIDAK AMAN PARA PEKERJA KONSTRUKSI PADA TAHAP PELAKSANAAN PEMBANGUNAN PROYEK GEDUNG BERTINGKAT

Pingkan Scarlet[1], Nicholas Heda Ofridhio Asmara[1], Hermawan[2], Budi Setiadi[2]

[1]Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata,
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 – Bendan Duwur, Semarang 50234
e-mail: 17b10077@student.unika.ac.id; 17b10078@student.unika.ac.id
[2]Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata,
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1 – Bendan Duwur, Semarang 50234
e-mail: hermawan.mrk@unika.ac.id ; budi_setiadi@unika.ac.id

ABSTRAK

Pada diri manusia terdapat berbagai subfaktor yang memicu terjadinya kecelakaan kerja karena melakukan tindakan perilaku tidak aman. Tujuan penelitian ini mengidentifikasi kegiatan pengawasan dan perilaku tidak aman pekerja di bidang K3 (Keselamatan dan Kesehatan Kerja), dan menganalisa keterkaitan antara dua variabel tersebut. Pengumpulan data menggunakan teknik penyebaran kuesioner pada dua proyek yang berbeda dan diolah menggunakan aplikasi SPSS. Hasil dari jawaban kuesioner yang telah diisi oleh para responden pada dua proyek tersebut, didapatkan hasil 52.6% dari total pekerja menjawab bahwa pengawasan pada proyek X tergolong buruk, sedangkan 79.6% dari total pekerja di proyek Y memiliki pengawasan yang baik. Variabel perilaku tidak aman di Proyek X 63.9% menjawab telah bekerja secara aman, tetapi berbanding terbalik dengan fakta dilapangan, sedangkan pada proyek Y sebanyak 75.9% pekerja berpendapat bahwa telah bekerja dengan aman dan terbukti dengan fakta dilapangan.

Kata kunci: pengawasan, perilaku tidak aman, keselamatan dan kesehatan kerja

1. PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk sangat berhubungan dengan pelaksanaan pembangunan yang memang dibutuhkan oleh semua kalangan (Sulistiawati, 2021). Kegiatan pembangunan ada pada bidang konstruksi dan memiliki berbagai kebutuhan, serta aspek yang sangat berkaitan. Fakta dilapangan membuktikan bahwa bidang konstruksi merupakan salah satu dari sekian banyak pekerjaan yang rentan sekali terjadi kecelakaan kerja. Pengertian kecelakaan kerja yaitu suatu peristiwa yang tidak dikehendaki dan tidak direncakan (Sulistyaningtyas, 2021). Kecelakaan di lingkungan kerja disebabkan oleh tindakan tidak aman (unsafe act) dengan persentase sebesar 88%, kemudian kondisi tidak aman (unsafe condition) sebesar 10%, dan 2% sisanya disebabkan oleh diluar kehendak manusia (Isnaeni, dkk., 2017). Faktor utama kecelakaan kerja diakibatkan dari manusia itu sendiri (pekerja), maka dari itu diperlukan perhatian penting dalam segi pengawasan. Pengawasan adalah kegiatan untuk mengarahkan, membimbing, mengawasi, dan memberikan batasan kepada pekerja agar tidak bertindak ceroboh (Djaelani dan Retnowati, 2023). Kegiatan pengawasan yang buruk di proyek konstruksi akan berakibat fatal dan kurangnya ketegasan pengawasan akan membuat pekerja menjadi semena-mena dalam bekerja (Djaelani dan Retnowati, 2023).

2. KAJIAN PUSTAKA

Kecelakaan kerja tidak terpaku dengan seberapa banyak korban yang cidera ataupun meninggal, tetapi kecelakaan kerja dapat diperkirakan dari riwayat peristiwa kecelakaan yang sebelumnya (Nurmala, dkk., 2021). Pekerjaan konstruksi dilakukan oleh para pekerja yang memiliki peranan penting di lapangan, sehingga hal tersebut dapat menyebabkan para pekerja berada dalam kondisi yang berbahaya, contohnya terjatuh dari ketinggian, penggunaan alat yang tidak benar, terkena alat konstruksi yang berat, dan tersengat listrik (Hamudya, dkk., 2023). Dikutip dari ILO (International Labour Organization) mengungkapkan bahwa kegiatan konstruksi adalah kegiatan dengan pekerjaan yang berganti-ganti, lingkungan yang bersifat sementara, area proyek yang beragam, dan seringnya pergantian bagi para pekerja. Hal tersebut yang menjadi alasan kecelakaan kerja yang tinggi di bidang konstruksi.

2.1. Faktor kecelakaan kerja

Menurut Alfiyah, dkk., (2023) menyatakan bahwa penyebab dari kecelakaan kerja digolongkan menjadi 2 faktor yaitu *contributing causes of accident* dan *immediate causes of accident*. Pengertian dari *contributing causes of accident* adalah faktor yang disebabkan oleh berbagai faktor yang terjadi. Contoh *contributing causes of accident* yaitu:

1. Kinerja keselamatan pengawasan

Pengawasan dalam pekerjaan merupakan salah satu upaya untuk menjamin keamanan dan melindungi keselamatan pekerja. Apabila pengawas tidak profesional dalam mengawasi jalannya kegiatan, maka dapat memicu terjadinya kecelakaan kerja.

2. Kondisi mental pekerja
   Suatu kondisi mental atau kesehatan seorang pekerja yang terganggu akibat dari tuntutan yang berat seperti, waktu, tenaga, dan perhatian.
3. Kondisi fisik pekerja
   Keadaan kesehatan fisik para pekerja yang mempengaruhi kinerja dan dapat berkurangnya konsentrasi saat melakukan pekerjaan.

Faktor *immediate causes of accident* memiliki pengertian yaitu suatu faktor yang menjadi alasan utama kecelakaan secara spontan berada pada saat peristiwa terjadinya kecelakaan dan seringkali merupakan tindakan atau kondisi tidak aman, seperti contoh berikut:

1. Tindakan tidak aman (*Unsafe Act*)
   Rata-rata pekerja bertindak secara tidak aman untuk mempersingkat waktu dan menghemat tenaga.
2. Lingkungan yang tidak aman (*Unsafe Conditions*) merupakan sebuah keadaan yang tidak aman di area kerja yang berisiko timbulnya kecelakaan ringan maupun fatal.

Hasil survei menyatakan bahwa sebanyak 90% kasus kecelakaan kerja terjadi akibat dari *human error*. Faktor dari perilaku manusia merupakan faktor yang sangat penting sekali dalam terjadinya kecelakaan di lingkungan kerja (Mutmainah, dkk., 2024).

2.1. Pengawasan Keselamatan dan Kesehatan Kerja

Pengawasan memiliki pengertian yaitu sebuah kegiatan peninjauan pada setiap area proyek, dengan tujuan untuk mengetahui keadaan yang kurang sesuai dengan standar atau prosedur yang telah ditentukan (Magda, dkk., 2023). Pengawasan tidak dilakukan secara individu, melainkan bersama dengan tim K3 yang lain. Pengawasan dapat didekskripsikan sebagai proses pelaksanaan yang dilakukan, melakukan evaluasi dan melakukan pembetulan jika memang dibutuhkan, dengan tujuan agar pekerja tidak menormalisasi perilaku-perilaku tidak aman saat melakukan pekerjaan dan pekerjaan dapat tercapai sesua dengan rencana awal (Syahraini, dkk., 2023).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan untuk mengetahui dan memperkirakan seberapa besar pengaruh pengawasan terhadap perilaku tidak aman yang dilakukan pekerja konstruksi. Tujuan tersebut didasarkan dengan ditemukannya indikasi-indikasi bahwa kecelakaan kerja di bidang konstruksi berakar dari tindakan tidak aman manusia itu sendiri.

3.1. Jumlah pengambilan sample

Dalam pengambilan sampel menggunakan rumus *Isaac* dan *Michael* seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 1.

$$S = \frac{\lambda^2.N.P.Q}{d^2.(N-1) + \lambda^2.P.Q} \quad (1)$$

Keterangan:

S = Jumlah sampel
N = Jumlah populasi
λ = *Chi* kuadrat nilainya bergantung pada derajat kebebasan dan tingkat kesalahan. Jika derajat kebebasan 1 dan tingkat kesalahan 5%, maka nilai *Chi* kuadrat 3.841. Jika tingkat kesalahan 1%, nilai *Chi* kuadrat 6.634, dan untuk tingkat kesalahan 10%, nilai *Chi* kuadrat 2.706. (Tabel *Chi* kuadrat).
P = Peluang besar (0.5)
Q = Peluang salah (0.5)
d = Perbedaan antara sampel yang diinginkan dengan yang terjadi. Setiap perbedaan memiliki nilai sebesar 1%=001; 5%=0.05; dan 10%=0.10.

3.2. Uji validitas

Uji validitas merupakan pengujian dengan cara menghubungkan antara tiap-tiap skor pada *item* kuesioner dengan skor dari total jawaban responden. Responden yang digunakan dalam uji validitas minimal 30 responden. Ketentuan minimal agar *item* dapat memenuhi yaitu dengan cara membandingkan nilai r hitung dengan nilai r tabel. Nilai r tabel yang digunakan pada penelitian ini menggunakan acuan nilai r tabel sebesar 0.361. Acuan dalam menentukan keputusan yaitu apabila nilai r hitung > r tabel, maka *item* kuesioner dinyatakan valid, sebaliknya jika nilai r hitung < r tabel, maka *item* kuesioner dinyatakan tidak valid. Perhitungan uji validitas diperolah dengan Persamaan 2.

$$r_{xy} = \frac{N\,\Sigma XY - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{\sqrt{\{N\,(\Sigma X^2) - (\Sigma X)^2\}\{N(\Sigma Y^2) - (\Sigma Y)^2\}}} \quad (2)$$

Keterangan:

X = Skor setiap *item* pernyataan
Y =Skor total seluruh *item* pernyataan
N = Banyak responden
ΣX = Jumlah skor distribusi X
ΣY = Jumlah skor distribusi Y
ΣX^2 = Jumlah kuadrat skor distribusi X
ΣY^2 = Jumlah kuadrat skor distribusi Y

3.3. Uji reliabilitas

Uji reliabilitas merupakan pengujian pada pertanyaan atau pernyataan dari kuesioner, yang telah melewati tahap uji validitas. Jika ditemukan butir soal kuesioner yang tidak memenuhi syarat, maka butir soal tersebut diganti dan dilakukan uji validitas kembali, atau dapat dihilangkan. Tujuan dari uji reliabilitas ini dilakukan adalah untuk mengetahui kekonsistenan kuesioner agar hasil jawaban tetap konsisten. Uji reliabilitas di penelitian ini menggunakan metode *Cronbach's Alpha*, pengujian tersebut mengacu pada hasil dari nilai alpha. Merujuk dari uji *Cronbach's Alpha* yaitu jika nilai alpha > 0.70. Rumus *Cronbach's Alpha* ditunjukkan pada Persamaan 3.

$$r_{11} = \frac{k}{k-1}(1 - \frac{\Sigma\sigma_b^2}{\sigma_1^2} \quad (3)$$

Keterangan:
R = Koefisien reliabilitas *alpha*
N = Jumlah item
Sj = Varian responden untuk *item* 1
Sx = Jumlah varian total

4. Analisis Data

Analisis data merupakan prosedur yang runtut dalam menguraikan, menafsirkan, dan mengolah data dari penelitian ini. Adapun hasil uji validitas dan realibitas dapat diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapan Hasil Uji Reliabilitas

Variabel Pengawasan	
Cronbach's Alpha	*N of items*
0.894	15
Variabel Perilaku Tidak Aman	
Cronbach's Alpha	*N of items*
0.831	15

4.1 Analisis univariat

Merupakan analisis data dengan mendekskripsikan karakteristik variabel yang mencakup tendensi sentral (*mean*, modus, median) dan disperse (rentang, varian, maksimum, minimum). Analisis univariat di kedua proyek dijelaskan yakni sebagai berikut:

1. Proyek Pembangunan Gedung X
   Proyek X merupakan sebuah proyek pembangunan gedung sekolah 6 lantai yang terletak di Kota Semarang tepatnya di daerah Semarang Indah.
   Karakteristik Responden
   Sampel yang digunakan dari Proyek X sebanyak 97 responden. Hasil perhitungan distribusi frekuensi responden berdasarkan usia, pendidikan terakhir, dan pengalaman kerja seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik Responden Proyek X

Kategori Usia	**Frekuensi**	**Persentase**
20 – 29 Tahun	16	16.5 %
30 – 39 Tahun	53	54.6 %
≥ 40 Tahun	28	28.9 %
Total	**97**	**100 %**
Kategori Tingkat Pendidikan	**Frekuensi**	**Persentase**
SD	40	41.2 %
SMP	30	30.9 %
SMA/SMK	27	27.8 %
Total	**97**	**100 %**
Kategori Pengalaman Kerja	**Frekuensi**	**Persentase**

< 1 Tahun	37	38.1 %
1 – 2 Tahun	47	48.5 %
> 2 Tahun	13	13.4 %
Total	**97**	**100 %**

Karakteristik Variabel

Untuk menetapkan karakteristik variabel, variabel dibagi menjadi 2 kategori, untuk yang pertama yaitu variabel pengawasan dengan kategori baik dan kategori buruk, untuk yang kedua yaitu variabel perilaku tidak aman dengan kategori aman dan kategori tidak aman. Arti dari kategori didalam dua variabel tersebut menyatakan perilaku pekerja. Perhitungan terkait kategori dilakukan dengan menggunakan perhitungan nilai interval kelas. Interval kelas dihitung dengan mengacu dari jumlah *item* kuesioner dari masing-masing variabel. Jumlah *item* tiap variabel terdiri dari 13 butir *item*. Berikut contoh perhitungan persentase skor setuju yang terlihat pada Persamaan 5.

Persentase Skor Setuju

$$\frac{\Sigma skor\ perolehan}{\Sigma skor\ Maksimal} \times 100\% \quad (5)$$

$$= \frac{39}{52} \times 100\%$$

$$= 75\%$$

Langkah selanjutnya yaitu menentukan skor standar untuk menjadi kriteria penilaian karakteristik variabel. Sebelum melakukan perhitungan standar skor penilaian, pertama-tama harus menentukan interval kelas seperti yang diperlihatkan pada Persamaan 6**.**

$$\text{Interval} = \frac{Range}{Kategori} \quad (6)$$

$$= \frac{75\%}{2} = 37.5\ \%$$

Setelah menentukan interval kelas, maka langkah berikutnya yaitu melakukan perhitungan skor standar penentuan kriteria yang diperlihatkan pada Persamaan 7.

Skor standar =100% -interval (7)

= 100% - 37.5%

= 62.5%

Nilai standar skor penilaian dalam menentukan karakteristik variabel yakni 62.5%. Referensi penilaian kriteria dalam menentukan karakteristik variabel yaitu sebagai berikut:

a. Pada variabel pengawasan jika hasil skor dari jawaban responden ≥ 62.5%, maka dikategorikan baik, tetapi jika jawaban responden ≤ 62.5%, maka termasuk kategori yang buruk.
b. Pada variabel perilaku tidak aman jika hasil skor dari jawaban responden ≥ 62.5%, maka dikategorikan aman, tetapi jika jawaban responden ≤ 62.5%, maka termasuk kategori yang tidak aman. Hasil kategori jawaban dari para responden di Proyek X terlihat pada **Tabel 3.**

Tabel 3. Hasil Kategori Kuesioner Proyek X

Variabel	**Kategori**	**Frekuensi**	**Persentase (%)**
Pengawasan	Baik	46	47.4%
	Buruk	51	52.6%
	Total	**97**	**100%**
Variabel	**Kategori**	**Frekuensi**	**Persentase (%)**
Perilaku Tidak Aman	Aman	62	63.9%
	Tidak Aman	35	36.1%
	Total	**97**	**100%**

Berikut rumus perhitungan dari Tabel 3 diperlihatkan pada Persamaan 8**.**

$$P = \frac{f}{n} \times 100\% \quad (8)$$

$$= \frac{46}{97} \times 100\% = 47.4\ \%$$

2. Proyek Pembangunan Gedung Y

Proyek Y merupakan sebuah proyek gedung perkuliahan 7 lantai di Kota Semarang dan bertepat di daerah Bukit Semarang Baru atau biasa yang dikenal dengan nama BSB.

Karakteristik Responden

Pada proyek Y memiliki total keseluruhan pekerja sebanyak 150 orang. Pada penelitian ini sampel yang digunakan

sebanyak 108 orang. Dalam Proyek Y karakteristik responden akan meliputi beberapa bagian seperti umur, pendidikan terakhir, dan lama bekerja dari responden. Hasil distribusi frekuensi responden Proyek Y diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristik Responden Proyek Y

Kategori Usia	**Frekuensi**	**Persentase**
20 - 29 Tahun	20	18.5%
30 – 39 Tahun	78	72.2%
≥ 40 Tahun	10	9.3%
Total	**108**	**100%**
Kategori Tingkat Pendidikan	**Frekuensi**	**Persentase**
SD	7	6.5 %
SMP	31	28.7 %
SMA/SMK	70	64.8 %
Total	**108**	**100 %**
Kategori Pengalaman Kerja	**Frekuensi**	**Persentase**
< 1 Tahun	64	59.3 %
1 – 2 Tahun	38	35.2 %
> 2 Tahun	6	5.6 %
Total	**108**	**100 %**

Karakteristik Variabel

Untuk hasil kuesioner berdasarkan kategori di Proyek Y diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Kategori Kuesioner Proyek Y

Variabel	**Kategori**	**Frekuensi**	**Persentase (%)**
Pengawasan	Baik	86	79.6%
	Buruk	22	20.4%
	Total	**108**	**100%**
Variabel	**Kategori**	**Frekuensi**	**Persentase (%)**
Perilaku Tidak Aman	Aman	82	75.9%
	Tidak Aman	26	24.1%
	Total	**108**	**100%**

4.2. Analisis *Crosstabs* (Tabulasi Silang)

Analisis *Crosstabs* merupakan suatu analisis dengan menggolongkan dua kelompok data yang telah melewati pengklasifikasian silang yaitu karakteristik responden terhadap karakteristik variabel. Selanjutnya penjelasan mengenai analisis tabulasi silang pada masing-masing proyek.

1. Proyek Pembangunan Gedung X

   Pada Proyek X dilakukan tabulasi silang dengan menggunakan data yang meliputi usia, pendidikan terakhir, dan pengalaman kerja yang diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6. *Crosstabs* Karakteristik Responden dengn Kategori Pengawasan Proyek X

Data Usia		**Kategori Pengawasan**		**Total**
		Baik	**Buruk**	
20 - 29 Tahun	Frekuensi	7	9	16
	Percentage (%)	43.8	56.3	100
30 - 39 Tahun	Frekuensi	26	27	53
	Percentage (%)	49.1	50.9	100
≥ 40 Tahun	Frekuensi	13	15	28
	Percentage (%)	46.4	53.6	100
Total	**Frekuensi**	**46**	**51**	**97**
	***Percentage* (%)**	**47.4**	**52.6**	**100**
Data Pendidikan		**Kategori Pengawasan**		**Total**
		Baik	**Buruk**	
SD	Frekuensi	19	21	40
	Percentage (%)	47.5	52.5	100
SMP	Frekuensi	16	14	30
	Percentage (%)	53.3	46.7	100
SMA/ SMK	Frekuensi	11	16	27
	Percentage (%)	40.7	59.3	100

Total	**Frekuensi**	**46**	**51**	**97**
	***Percentage* (%)**	**47.4**	**52.6**	**100**
Data Pengalaman Bekerja		**Kategori Pengawasan**		**Total**
		Baik	**Buruk**	
< 1 Tahun	Frekuensi	20	17	37
	Percentage (%)	54.1	45.9	100
1 – 2 Tahun	Frekuensi	19	28	47
	Percentage (%)	40.4	59.6	100
> 2 Tahun	Frekuensi	7	6	13
	Percentage (%)	53.8	46.2	100
Total	**Frekuensi**	**46**	**51**	**97**
	***Percentage* (%)**	**47.4**	**52.6**	**100**

Berikutnya merupakan hasil data tabulasi silang karakteristik responden terhadap kategori perilaku tidak aman seperti yang diperlihatkan pada Tabel 7.

Tabel 7. *Crosstabs* Karakteristik Responden dengan Kategori Perilaku Tidak Aman Proyek X

Data Usia		**Kategori Perilaku Tidak Aman**		**Total**
		Aman	**Tidak Aman**	
20 - 29 Tahun	Frekuensi	14	2	16
	Percentage (%)	87.5	12.5	100
30 - 39 Tahun	Frekuensi	33	20	53
	Percentage (%)	62.3	37.7	100
≥ 40 Tahun	Frekuensi	15	13	28
	Percentage (%)	53.6	46.4	100
Total	**Frekuensi**	**62**	**35**	**97**
	***Percentage* (%)**	**63.9**	**36.1**	**100**
Data Pendidikan		**Kategori Perilaku Tidak Aman**		**Total**
		Aman	**Tidak Aman**	
SD	Frekuensi	25	15	40
	Percentage (%)	62.5	37.5	100
SMP	Frekuensi	18	12	30
	Percentage (%)	60	40	100
SMA/ SMK	Frekuensi	19	8	27
	Percentage (%)	70.4	29.6	100
Total	**Frekuensi**	**62**	**35**	**97**
	***Percentage* (%)**	**63.9**	**36.1**	**100**
Data Pengalaman Bekerja		**Kategori Perilaku Tidak Aman**		**Total**
		Aman	**Tidak Aman**	
< 1 Tahun	Frekuensi	25	12	37
	Percentage (%)	67.6	32.4	100
1 – 2 Tahun	Frekuensi	29	18	47
	Percentage (%)	61.7	38.3	100
> 2 Tahun	Frekuensi	8	5	13
	Percentage (%)	61.5	38.5	100
Total	**Frekuensi**	**62**	**35**	**97**
	***Percentage* (%)**	**63.9**	**36.1**	**100**

2. Proyek Pembangunan Gedung Y
   Pada Proyek Y dilakukan tabulasi silang karakteristik responden terhadap kategori pengawasan, seperti yang diperlihatkan pada Tabel 8.

Tabel 8. *Crosstabs* Karakteristik Responden dengan Kategori Pengawasan Proyek Y

Data Usia		**Kategori Pengawasan**		**Total**
		Baik	**Buruk**	
20 - 29 Tahun	Frekuensi	17	3	20
	Percentage (%)	85	15	100
30 - 39 Tahun	Frekuensi	60	18	78
	Percentage (%)	76.9	23.1	100
≥ 40 Tahun	Frekuensi	9	1	10
	Percentage (%)	90	10	100

Total	**Frekuensi**	**86**	**22**	**108**
	***Percentage* (%)**	**79.6**	**20.4**	**100**

Data Pendidikan		**Kategori Pengawasan**		**Total**
		Baik	**Buruk**	
SD	Frekuensi	7	0	7
	Percentage (%)	100	0	100
SMP	Frekuensi	23	8	31
	Percentage (%)	74.2	25.8	100
SMA/ SMK	Frekuensi	56	14	70
	Percentage (%)	80	20	100
Total	**Frekuensi**	**86**	**22**	**108**
	***Percentage* (%)**	**79.6**	**20.4**	**100**

Data Pengalaman Bekerja		**Kategori Pengawasan**		**Total**
		Baik	**Buruk**	
< 1 Tahun	Frekuensi	52	12	64
	Percentage (%)	81.3	18.8	100
1 – 2 Tahun	Frekuensi	30	8	38
	Percentage (%)	78.9	21.1	100
> 2 Tahun	Frekuensi	4	2	6
	Percentage (%)	66.7	33.3	100
Total	**Frekuensi**	**86**	**22**	**108**
	***Percentage* (%)**	**79.6**	**20.4**	**100**

Setelah diketahui hasil dari tabulasi silang kategori pengawasan, maka selanjutnya melakukan tabulasi silang karakteristik responden terhadap kategori perilaku tidak aman seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. *Crosstabs* Karakteristik Responden dengan Kategori Perilaku Tidak Aman Proyek Y

Data Usia		**Kategori Perilaku Tidak Aman**		**Total**
		Aman	**Tidak Aman**	
20 - 29 Tahun	Frekuensi	15	5	20
	Percentage (%)	75	25	100
30 - 39 Tahun	Frekuensi	59	19	78
	Percentage (%)	75.6	24.4	100
≥ 40 Tahun	Frekuensi	8	2	10
	Percentage (%)	80	20	100
Total	**Frekuensi**	**82**	**26**	**108**
	***Percentage* (%)**	**75.9**	**24.1**	**100**

Data Pendidikan		**Kategori Perilaku Tidak Aman**		**Total**
		Aman	**Tidak Aman**	
SD	Frekuensi	5	2	7
	Percentage (%)	71.4	28.6	100
SMP	Frekuensi	24	7	31
	Percentage (%)	77.4	22.6	100
SMA/ SMK	Frekuensi	53	17	70
	Percentage (%)	75.7	24.3	100
Total	**Frekuensi**	**82**	**26**	**108**
	***Percentage* (%)**	**75.9**	**24.1**	**100**

Data Pengalaman Bekerja		**Kategori Perilaku Tidak Aman**		**Total**
		Aman	**Tidak Aman**	
< 1 Tahun	Frekuensi	47	17	64
	Percentage (%)	73.4	26.6	100
1 – 2 Tahun	Frekuensi	31	7	38
	Percentage (%)	81.6	18.4	100
> 2 Tahun	Frekuensi	4	2	6
	Percentage (%)	66.7	33.3	100
Total	**Frekuensi**	**82**	**26**	**108**
	***Percentage* (%)**	**75.9**	**24.1**	**100**

4.3. Analisis Bivariat

Analisis bivariat adalah suatu metode analisis yang digunakan terhadap dua variabel yang diperkirakan berkaitan atau

berkorelasi. Dalam penelitian ini menggunakan metode *chi square*. Analisis bivariat mengacu pada nilai signifikansi berikut ini:

a. Apabila nilai *asymptotic significance* < 0.05, maka dinyatakan bahwa adanya hubungan yang signifikan pada kedua variabel.
b. Apabila nilai *asymptotic significance* < 0.05, maka dinyatakan bahwa tidak adanya hubungan yang signifikan pada kedua variabel.

Pada penelitian ini didapatkan data hasil analisis bivariat dari masing-masing proyek yaitu sebagai berikut:

1. Proyek Pembangunan Gedung X

   Proyek X menggunakan metode *chi square* untuk mendapatkan hasil analisis bivariat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 10**.**

Tabel 10. Hasil Analisis *Chi Square* Proyek X

	Asymptotic significance	Hubungan Signifikansi
Pearson *Chi-Square*	0.000	Saling Berhubungan

   Pada Tabel 10 dijelaskan bahwa hasil dari analisis *chi square* Proyek X menyatakan bahwa nilai *asymptotic significance* < (kurang dari) nilai 0.05, dikarenakan hasil nilai *asymptotic significance* yang dihasilkan Proyek X sebesar 0.000, yang berarti saling berhubungan secara signifikan antara kedua variabel tersebut.

2. Proyek Pembangunan Gedung X

   Data dari hasil analisis bivariat dengan menggunakan metode *chi square* pada Proyek X ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11. Hasil Analisis *Chi Square* Proyek Y

	Asymptotic significance	Hubungan Signifikansi
Pearson *Chi-Square*	0.131	Tidak Saling Berhubungan

   Pada Tabel 11 dijelaskan bahwa hasil dari analisis *chi square* Proyek X menyatakan bahwa nilai *asymptotic significance* > (lebih dari) nilai 0.05, dikarenakan hasil nilai *asymptotic significance* yang dihasilkan Proyek X sebesar 0.131, yang berarti tidak saling berhubungan secara signifikan antara kedua variabel tersebut.

5. Kesimpulan dan Saran

Hasil analisis data sdmaka dapat disimpulkan:

1. Pada Proyek X sebanyak 51orang atau 52.6% mengatakan Proyek X memiliki pengawasan yang buruk, sedangkan pada Proyek Y sebanyak 86 orang atau 79.6% mengatakan bahwa Proyek Y memiliki pengawasan yang baik.
2. Hasil jawaban kuesioner yang telah disebarkan didapatkan kesimpulan bahwa di Proyek X sebanyak 62 orang atau 63.9% mengatakan telah bekerja dengan aman, tetapi faktanya dilapangan masih sering ditemukan pekerja yang bekerja dengan berperilaku tidak aman. Untuk Proyek Y sebanyak 82 orang atau 75.9% mengatakan telah bekerja dengan berperilaku aman, hal tersebut terbukti dengan fakta yang ada di lapangan.
3. Diperoleh hubungan yang signifikan antara pengawasan terhadap perilaku tidak aman di Proyek X, dengan nilai acuan *asymptotic significance* < 0.05, sedangkan Proyek X memiliki nilai 0.000. Pada Proyek Y tidak adanya hubungan signifikan antara pengawasan terhadap perilaku tidak aman, terbukti dari nilai *asymptotic significance* yaitu 0.131.

Saran pada penelitian ini adalah:

1. Pada penelitian ini pengambilan responden terlalu banyak, sehingga menjadi kurang efisien dalam melakukan pengambilan data. Diharapkan untuk penelitian selanjutnya dapat lebih spesifik dalam menentukan jumlah responden yang akan digunakan.
2. Pembahasan pada penelitian ini hanya berpusat pada penjelasan mengenai distribusi frekuensi pengawasan dan perilaku tidak aman suatu proyek konstruksi. Diharapkan penelitian selanjutnya dapat menambahkan faktor-faktor lain seperti intervensi atau memberikan solusi dan melakukan evaluasi.

6. Daftar Pustaka

Agustiya, H., Listyandini, R., dan Ginanjar, R. (2020): Faktor-faktor yang mempengaruhi tindakan tidak aman (unsafe action) pada pekerja, *Jurnal Mahasiswa Kesehatan Masyarakat*, **3**(5), 473-487.

Alfiyah, C. Q., Asih, A. Y. P., Afridah, W., dan Fasya, A. H. Z. (2023): Analisis risiko kecelakaan kerja dengan metode failure mode dan effect analysis pada pekerja proyek kontruksi, *Jurnal Ilmu Psikologi dan Kesehatan*, **1**, 283-290.

Djaelani, M., dan Retnowati, E. (2023): Pengaruh pengawasan kerja dan penerapan program keselamatan dan kesehatan kerja terhadap produktivitas pekerja proyek konstruksi, *Jurnal Ilmiah Satyagraha*, **5**(2), 32-38.

Hamudya, T. P., Munggaran, G. A., Deli, A. P., dan Hardiman, S. G. (2023): Faktor-faktor yang berhubungan dengan kecelakaan kerja pada pekerja proyek konstruksi proyek the canary apartment Serpong tahun 2022, **4**(1), 1-14. Diperoleh dari situs internet: https://jurnal.umj.ac.id/ index.php/EOHSJ/article/view/13526. Diunduh pada tanggal 6 Desember 2023, pukul 16.34 WIB.

Isnaeni, K. M. A., Dahlan, Z., dan Komar, S. (2017): Analisis pengaruh risk asessment (penilaian risiko) terhadap kecelakaan tambang pada kegiatan penambangan batubara (Studi kasus di PT. Baturona Adimulya), *Jurnal Teknik Patra Akademika*, **8**(2), 19-25.

Magda, S., Yustiarini, D., dan Nurasiyah, S. (2023): Literature review analysis of potential work accidents in construction projects using the hazard identification, risk assessment, and risk control method, *Jurnal ilmiah pendidikan teknik kejuruan* (*JIPTEK*), **16**, 62-69.

Mutmainah, F. Z., Pramudya, A., dan Rufa'i, A. A. (2024): A study of cognitive aspects in minimizing human error in construction, *SHS Web Of Conferences*, **189**, 3-7. Diperoleh dari situs internet: https://www.shsconferences.org/articles/shsconf/abs/2024/09/shsconf_icesh2024_01023/shsconf_icesh2024_01023.html. Diunduh pada tanggal 14 November 2023, pukul 22.02 WIB.

Nurmala, R., Suwarno, S., dan Arifin, M. Z. (2021): Mengkategorikan resiko kecelakaan kerja konstruksi pada proyek pembangunan pon Kabupaten Trenggalek menggunakan matriks penilaian resiko, *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*, **4**(2), 200-213.

Putri, V.R., dan Ferdianto. (2023): Teknik pengumpulan data kuesioner. *Binus University School Of Information System*. Diperoleh dari situs: https://sis.bi nus.ac.id/2023/10/31/teknik-peng umpulan-data-kuesioner/. Diunduh pada tanggal 21 Mei 2023, pukul 15.34 WIB.

Sulistiawati, R. (2021): Transisi demografi dan pertumbuhan ekonomi di Kalimantan Barat, *Prosiding seminar nasional SATIESP 2021*, 978-602. Diperoleh dari situr internet:https://feb.untan.ac.id/wpcontent/uploads/2022/03/16.pdf. Diunduh pada tanggal 27 Januari 2023, pukul 21.51 WIB.

Sulistyaningtyas, N. (2021): Analisis Faktor – faktor penyebab kecelakaan akibat kerja pada pekerja konstruksi: literature review, *Journal Of Health Quality Development*, **1**, 51-59.

Syahraini, Bachri, S., dan Makkasau, S. (2023): Pengaruh pengawasan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) terhadap kinerja karyawan PT. Bumi Mineral Sulawesi Kabupaten Luwu, *Management Studies and Entrepreneurship Journal*, **4**, 3679-3686

PENGARUH RISIKO TERHADAP PIHAK TERKAIT PADA PROYEK JALAN TOL X

Katarina Rini Ratnayanti[1*], dan Falya Alya Rohmah[2]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl.PH.H. Mustofa No.23, Bandung*
e-mail: rini@itenas.ac.id
[2]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Jl.PH.H. Mustofa No.23, Bandung
e-mail: falyaalya48@gmail.com

ABSTRAK

Transportasi merupakan sarana yang sangat penting dalam pertumbuhan perekonomian di suatu wilayah. Proyek jalan tol seringkali melibatkan berbagai risiko yang dapat mempengaruhi semua pihak terkait, yaitu *owner* dan kontraktor. Risiko-risiko yang dihadapi dalam Proyek Jalan Tol X sangat beragam, mulai dari risiko teknis, finansial, lingkungan, hingga risiko sosial dan politik. Risiko-risiko tersebut memberikan dampak yang signifikan terhadap berbagai pihak terkait, seperti keterlambatan proyek, pembengkakan biaya, penurunan kualitas pekerjaan, konflik sosial, dan kerusakan lingkungan. Dengan adanya berbagai risiko yang dapat mempengaruhi banyak pihak. Implementasi pengelolaan risiko yang komprehensif dan komunikasi yang transparan di antara *owner* dan kontraktor sangat penting untuk memastikan kelancaran proyek dan mencapai hasil yang diinginkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh risiko yang paling berdampak besar terhadap pihak terkait dalam Pembangunan Proyek Jalan Tol X. Pada penelitian ini dengan cara wawancara dan penyebaran kuesioner terhadap pihak terkait. Hasil penelitian dilakukan dengan penyebaran kuesioner untuk identifikasi risiko yang mungkin terjadi pada Proyek Jalan Tol X. Kemudian analisis pengaruh risiko terhadap pihak terkait didapatkan dari kuesioner yaitu, terdapat 17 risiko dari 3 pekerjaan. Maka dari itu, dari 17 item risiko yang berpengaruh lebih besar terhadap kontraktor terdiri dari 8 (delapan) risiko dan 9 (sembilan) risiko lainnya berpengaruh sama besar terhadap *owner* dan kontraktor.

Kata kunci: risiko, pihak terkait, pengaruh risiko

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara berkembang yang dimana perekonomiannya merupakan salah satu sektor yang perlu terus ditingkatkan. Salah satunya adalah perluasan infrastruktur, seperti jalan tol. Namun, kompleksitas dan skala besar proyek ini membawa berbagai risiko yang dapat mempengaruhi berbagai pihak terkait. Setiap pihak memiliki kepentingan dan peran yang berbeda, sehingga dampak risiko yang mereka hadapi juga bervariasi. Risiko dalam proyek jalan tol dapat muncul dari berbagai aspek, mulai dari pembengkakan biaya, keterlambatan jadwal, masalah teknis, perubahan kebijakan, dan gangguan lingkungan. Setiap risiko ini memiliki potensi untuk mengganggu jalannya proyek dan merugikan pihak-pihak terkait.

Maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah siapa yang berpengaruh risiko paling besar terhadap pihak terkait pada Pembangunan Proyek Jalan Tol X. Kemudian tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh risiko terhadap pihak terkait dalam Pembangunan Proyek Jalan Tol X.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Risiko

Menurut Darmawi (2006), risiko dihubungkan dengan kemungkinan terjadinya akibat buruk (kerugian) yang tidak diinginkan atau tidak terduga. Hal ini didukung pendapat (Djojosoedarso., 1999), bahwa risiko mempunyai karakteristik yaitu:

1. Merupakan ketidakpastian atas terjadinya suatu perisitiwa.
2. Merupakan ketidakpastian yang bila terjadi akan menimbulkan kerugian.

Manajemen risiko

Manajemen risiko adalah semua rangkaian kegiatan yang berhubungan dengan risiko yaitu perencanaan (*planning*), penilaian (*assessment*), penanganan (*handling*) dan pemantauan (*monitoring*) risiko. Manajemen resiko harus dilakukan sedini mungkin dengan didukung informasi tersebut. Prosesnya merupakan tindak preventif dimana kondisi

usaha sesungguhnya dapat menjadi jelas sebelum terlambat dan dapat terhindar dari kegagalan yang lebih besar (Kerzner, 2001).

Pengaruh risiko terhadap pihak terkait

Pengaruh risiko terhadap pihak terkait melibatkan berbagai dimensi dan *stakeholder* yang mungkin terpengaruh oleh berbagai risiko yang timbul selama pelaksanaan proyek. Pihak terkait dalam Proyek Jalan Tol X mencakup *owner* dan kontraktor.

1. *Owner*
   Owner dalam proyek pembangunan jalan tol merupakan pihak yang memiliki peran sentral dalam keberhasilan proyek. Mereka bertanggung jawab atas perencanaan, pendanaan, dan pengawasan proyek. Namun, proyek jalan tol seperti proyek infrastruktur besar lainnya rentan terhadap berbagai risiko yang dapat berdampak signifikan terhadap *owner*.
2. Kontraktor
   Kontraktor sebagai pelaksana fisik proyek jalan tol juga menghadapi berbagai risiko yang dapat berdampak signifikan terhadap keberlangsungan usahanya. Risiko-risiko ini dapat berasal dari faktor internal maupun eksternal, dan jika tidak dikelola dengan baik, dapat mengakibatkan kerugian finansial, kerusakan reputasi, bahkan kegagalan bisnis.

***Jobdesk* pihak terkait**

1. *Owner*
   Pemilik proyek atau biasa disebut dengan *owner* adalah seseorang atau instansi yang memiliki proyek dan memberikan pekerjaannya kepada pihak lain yang mampu melaksanakannya sesuai dengan perjanjian kontrak kerja untuk merealisasikan tujuan akhir yang diharapkan pada proyek. Memiliki peran sebagai *owner* dengan tugas dan tanggung jawab antara lain:
   a. Memberikan biaya rencana dan pelaksanaan proyek.
   b. Membuat kegiatan mengenai administrasi proyek.
   c. Memberi tugas pada pimpinan proyek.
   d. Permintaan tanggung jawaban kepada konsultan pengawas terkait pekerjaan proyek dan Manajemen Konstruksi (MK).
   e. Mendapatkan proyek yang telah diselesaikan oleh kontraktor utama.
   f. Membuat Surat Perintah Mulai Kerja (SPMK).
   g. Menerima ataupun tidak menerima perubahan pada pekerjaan yang telah direncanakan.
   h. Meminta pertanggung jawaban kepada pelaksana proyek atas hasil pekerjaan.
   i. Menghentikan hubungan pekerjaan dengan pihak pelaksana proyek yang tidak dapat melaksanakan pekerjaannya sesuai denga nisi surat perjanjian kontrak.
2. Kontraktor
   Kontraktor berperan sebagai pelaksana proyek yang melaksanakan pekerjaan sesuai dengan peraturan maupun spesifikasi yang telah direncanakan dan ditetapkan dalam kontrak. Kontraktor juga membuat dan melaporkan kemajuan proyek yang meliputi laporan harian hingga bulanan kepada pemilik proyek. Memiliki peran sebagai kontraktor dengan tugas dan tanggung jawab antara lain:
   a. Melaksanakan pekerjaan sesuai dengan peraturan dan syarat-syarat yang telah ditetapkan dalam dokumen kontrak.
   b. Memahami gambar desain, konsep, dan spesifikasi sebagai acuan di dalam proyek.
   c. Membuat dokumen tentang pekerjaan yang telah dilaksanakan dan diserahkan kepada *owner*.
   d. Menyusun kembali metode pelaksanaan konstruksi dan jadwal pelaksanaan pekerjaan bersama *site engineering* dan *structural engineering.*
   e. Melakukan perbaikan atas kerusakan atau kekurangan pekerjaan akibat kelalaian selama pelaksanaan dengan menanggung seluruh biayanya.
   f. Menyelesaikan proyek sesuai dengan waktu yang telah ditentukan.

3. METODOLOGI

Pengumpulan data

Penelitian ini dilakukan menggunakan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh secara langsung dari sumber datanya dengan cara penyebaran kuesioner. Sedangkan untuk data sekunder berasal dari studi literatur dan Proyek Jalan Tol X, seperti tahapan pekerjaan.

Pengolahan data

Identifikasi risiko

Identifikasi risiko dilakukan untuk menemukan potensi risiko dengan cara mempelajari studi literatur dari penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan. Setelah itu, variabel dan kategori risiko yang relevan diidentifikasi dan dianalisis sesuai dengan tahapan pekerjaan dalam proyek, sehingga dapat disesuaikan dengan kondisi yang mungkin terjadi pada Proyek Pembangunan Jalan Tol X. Hasil analisis ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam penyusunan kuesioner penelitian.

Tabel 1. Identifikasi risiko

Variabel	Indikator
Risiko Alam	Kondisi cuaca
	Terjadi bencana alam saat pelaksanaan proyek
Risiko Material dan Peralatan	Kerusakan peralatan
	Kesulitan mendatangkan peralatan
	Keterlambatan pengiriman material
	Material tidak sesuai dengan spesifikasi
	Kenaikan harga material
	Kerusakan material saat pengiriman
	Peralatan tidak lengkap
	Kelangkaan bahan material
Risiko Tenaga Kerja	Kemampuan/*skill* tenaga kerja yang kurang
	Ketersediaan tenaga kerja yang kurang
	Produktivitas tenaga kerja kurang
Risiko Kecelakaan Kerja	Terjadi kecelakaan karena kesalahan manusia
	Terjadi kecelakaan karena kegagalan peralatan
	Prosedur Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3) yang kurang baik
Risiko Teknis	Pekerjaan tidak memenuhi spesifikasi
	Adanya perubahan spesifikasi
	Keterlambatan pelaksanaan
	Metode pelaksanaan yang salah
	Pemilihan metode konstruksi yang kurang tepat
Finansial	Ketidaktepatan estimasi biaya
	Cara pembayaran yang tidak tepat waktu
	Tidak memperhatikan biaya tidak terduga
	Kemacetan arus kas
Risiko Sosial dan Lingkungan	Kemacetan lalu lintas
	Kerusakan lingkungan akibat proyek
	Mogok kerja

Analisis pengaruh risiko terhadap pihak terkait

Analisis ini melibatkan penilaian bagaimana risiko yang ada dalam sebuah proyek dapat mempengaruhi pihak yang terlibat seperti *owner* dan kontraktor dengan cara penyebaran kuesioner dan wawancara. Maka, data yang diperoleh dapat menjabarkan seberapa pengaruhnya setiap risiko terhadap pihak terkait.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh risiko proyek terhadap pihak terkait

Pengaruh risiko terhadap pihak terkait ini mengacu pada dampak yang timbul akibat terjadinya risiko pada entitas atau individu yang terlibat dalam suatu kegiatan atau proses. Untuk membandingkan pengaruh risiko terhadap pihak terkait yang utama ini yaitu kepada *owner* dan kontraktor, yang dimana menggunakan kuesioner. Skala yang digunakan dalam kuesioner penelitian ini menggunakan skala *likert* dengan ketentuan sebagai berikut:

Berpengaruh Sangat Besar = Skala 4
Berpengaruh Besar = Skala 3
Berpengaruh Kecil = Skala 2
Berpengaruh Sangat Kecil = Skala 1

Terkait dengan kontrak yang dilaksanakan menggunakan *modified turn key*, dimana proyek sepenuhnya dibiayai di awal oleh kontraktor. Meskipun pemilik proyek masih memiliki beberapa tanggung jawab dan risiko, namun sebagian besar risiko tetap berada di pihak kontraktor. Dari 17 (tujuh belas) item risiko yang didapatkan dari hasil kuesioner kepada pihak terkait ini, berpengaruh lebih besar terhadap kontraktor terdiri dari 8 (delapan) risiko dan 9 (sembilan) risiko memiliki pengaruh yang sama besar terhadap kontraktor dan *owner*. Berikut adalah tabel pengaruh risiko yang menimbulkan pengaruh pada pihak kontraktor dan *owner* berdasarkan hasil kuesioner yang sudah didapatkan.

Tabel 2. Pengaruh risiko terhadap pihak terkait

Pekerjaan	***Risk Event***	***Owner***	**Kontraktor**
Pekerjaan Timbunan	Kondisi cuaca	Dapat mengakibatkan keterlambatan dalam pelaksanaan proyek, kerusakan pada material, dan tambahan biaya untuk perbaikan.	Kontraktor mungkin menghadapi kesulitan dalam memenuhi target waktu yang telah disepakati, serta kebutuhan untuk mengimplementasikan strategi mitigasi cuaca yang dapat menambah beban biaya dan memperpanjang waktu pengerjaan. Juga dapat meningkatkan risiko kerusakan material dan mempengaruhi kualitas
	Keterlambatan pengiriman material		Terlambatnya material menghambat jadwal konstruksi, memaksa kontraktor untuk menyesuaikan rencana dan biaya tambahan untuk mempercepat proses atau mencari alternatif, serta risiko denda akibat pelanggaran jadwal.
	Kerusakan peralatan		Peralatan yang rusak dapat menyebabkan keterlambatan proyek akibat perbaikan atau penggantian peralatan yang dapat memperlambat kemajuan pekerjaan, mengakibatkan penundaan dalam jadwal penyelesaian, dan memerlukan biaya tambahan.
	Adanya perubahan spesifikasi	Dapat mengakibatkan peningkatan biaya dan perpanjangan atau memperpendek waktu proyek. Perubahan ini dapat memicu negosiasi ulang kontrak, potensi *klaim* dari kontraktor, dan kemungkinan penambahan biaya yang substansial.	Perubahan spesifikasi terhadap kontraktor memerlukan sumber daya tambahan, seperti bahan, peralatan, dan tenaga kerja, serta menghadapi penundaan yang disebabkan oleh penyesuaian desain dan proses.
	Ketersediaan tenaga kerja yang kurang		Kontraktor akan menghadapi tantangan dalam memenuhi target waktu dan kualitas pekerjaan yang dapat berdampak pada reputasi. Selain itu, menyebabkan penurunan produktivitas dan efisiensi kerja sehingga meningkatkan biaya operasional kontraktor.
	Cara pembayaran yang tidak tepat waktu	Dapat menyebabkan penundaan dalam pelaksanaan proyek, gangguan alur kerja, dan potensi peningkatan biaya akibat keterlambatan.	Cara pembayaran yang tidak tepat waktu dapat mengakibatkan masalah arus kas seperti kemampuan untuk membayar gaji pekerja dan membeli material. Hal ini berpotensi memperlambat kemajuan proyek dan meningkatkan biaya tambahan.

Tabel 2. Pengaruh risiko terhadap pihak terkait (lanjutan)

Pekerjaan *Rigid Pavement*	Kondisi cuaca	Dapat mengakibatkan keterlambatan dalam pelaksanaan proyek, kerusakan pada struktur yang sedang dibangun, dan tambahan biaya untuk perbaikan.	Kontraktor mungkin menghadapi kesulitan dalam memenuhi target waktu yang telah disepakati, serta kebutuhan untuk mengimplementasikan strategi mitigasi cuaca yang dapat menambah beban biaya dan memperpanjang waktu pengerjaan. Kondisi cuaca yang buruk juga dapat meningkatkan risiko kerusakan material dan mempengaruhi kualitas.
	Keterlambatan pengiriman material		Terlambatnya material menghambat jadwal konstruksi, memaksa kontraktor untuk menyesuaikan rencana dan biaya tambahan untuk mempercepat proses atau mencari alternatif, serta risiko denda akibat pelanggaran jadwal.
	Kerusakan peralatan		Peralatan yang rusak dapat menyebabkan keterlambatan proyek akibat perbaikan atau penggantian peralatan yang dapat memperlambat kemajuan pekerjaan, mengakibatkan penundaan dalam jadwal penyelesaian, dan memerlukan biaya tambahan.
	Kerusakan material saat pengiriman	Dapat menyebabkan penundaan proyek dan tambahan biaya untuk penggantian atau perbaikan material. Juga menyebabkan mutu/kualitas menurun.	Kerusakan material saat pengiriman ini memerlukan penggantian, menghambat kemajuan proyek, dan memaksa kontraktor menanggung biaya tambahan serta menyesuaikan jadwal. Hal ini menurunkan efisiensi kerja dan berisiko merusak reputasi kontraktor akibat penundaan dan biaya ekstra yang tidak terduga.
	Kenaikan harga material		Kenaikan harga material dapat meningkatkan biaya operasional dan bahan, yang sering kali melebihi anggaran yang telah ditetapkan. Memaksa kontraktor untuk menanggung biaya tambahan sendiri atau menegosiasikan perubahan kontrak dengan *owner*.
	Ketersediaan tenaga kerja yang kurang		Kontraktor akan menghadapi tantangan dalam memenuhi target waktu dan kualitas pekerjaan yang dapat berdampak pada reputasi. Selain itu, menyebabkan penurunan produktivitas dan efisiensi kerja sehingga meningkatkan biaya operasional kontraktor.
	Cara pembayaran yang tidak tepat waktu	Dapat menyebabkan penundaan dalam pelaksanaan proyek, gangguan alur kerja, dan potensi peningkatan biaya akibat keterlambatan.	Keterlambatan pembayaran dapat mengakibatkan masalah arus kas seperti kemampuan untuk membayar gaji pekerja dan membeli material. Hal ini berpotensi memperlambat kemajuan proyek dan meningkatkan biaya tambahan.

Tabel 2. Pengaruh risiko terhadap pihak terkait (lanjutan)

Pekerjaan Drainase	Kondisi cuaca	Dapat mengakibatkan keterlambatan dalam pelaksanaan proyek, kerusakan pada struktur yang sedang dibangun, dan tambahan biaya untuk perbaikan.	Kontraktor mungkin menghadapi kesulitan dalam memenuhi target waktu yang telah disepakati, serta kebutuhan untuk mengimplementasikan strategi mitigasi cuaca yang dapat menambah beban biaya dan memperpanjang waktu pengerjaan. Kondisi cuaca yang buruk juga dapat meningkatkan risiko kerusakan material dan mempengaruhi kualitas.
	Ketersediaan tenaga kerja yang kurang		Kekurangan tenaga kerja dapat menyebabkan keterlambatan proyek yang berujung pada denda keterlambatan, juga meningkatkan risiko kecelakaan kerja karena pekerja dipaksa bekerja lebih keras dan lebih lama. Akibatnya produktivitas menurun, biaya operasional meningkat.
	Adanya perubahan spesifikasi	Dapat mengakibatkan peningkatan biaya dan perpanjangan atau memperpendek waktu proyek. Perubahan ini dapat memicu negosiasi ulang kontrak, potensi *klaim* dari kontraktor, dan kemungkinan penambahan biaya yang substansial.	Perubahan spesifikasi terhadap kontraktor memerlukan sumber daya tambahan, seperti bahan, peralatan, dan tenaga kerja, serta menghadapi penundaan yang disebabkan oleh penyesuaian desain dan proses.
	Cara pembayaran yang tidak tepat waktu	Dapat menyebabkan penundaan dalam pelaksanaan proyek, gangguan alur kerja, dan potensi peningkatan biaya akibat keterlambatan.	Keterlambatan pembayaran dapat mengakibatkan masalah arus kas seperti kemampuan untuk membayar gaji pekerja dan membeli material. Hal ini berpotensi memperlambat kemajuan proyek dan meningkatkan biaya tambahan.

5. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa dengan kontrak yang dilaksanakan menggunakan *modified turn key*, dimana proyek sepenuhnya dibiayai di awal oleh kontraktor. Meskipun pemilik proyek masih memiliki beberapa tanggung jawab dan risiko dalam kontrak *modified turnkey*, seperti perubahan ruang lingkup atau beberapa aspek desain konseptual, sebagian besar risiko tetap berada di pihak kontraktor. Maka dari itu, dari 17 item risiko yang berpengaruh lebih besar terhadap kontraktor terdiri dari 8 (delapan) risiko dan 9 (sembilan) risiko lainnya berpengaruh sama besar terhadap *owner* dan kontraktor.

DAFTAR PUSTAKA

Ari Sandyavitri. (2009). Manajemen Resiko di Proyek Konstruksi. Media Komunikasi Teknik Sipil.

Darmawi, Hermawan, 2011. Manajemen Risiko, Bumi Aksara, Jakarta.

Djojosoedarso. 1999. Prinsip-prinsip Manajemen Risiko dan Asuransi. Jakarta

Hatmoko, D., Hidayat, A., Zachari, M., Merukh H. S. S., 2022. Investigasi Pengaruh Keterlambatan Pembayaran Proyek Konstruksi dari Owner kepada Kontraktor. TEKNIK, 43 (2), 2022, 168-177.

Kerzner, H., 2001, *Project Management. Seventh Edition. John Wiley &Sons, Inc, New York*.

Muzaki, L. (2023) Tugas Konsultan Perencana, Konsultan Pengawas, dan Kontraktor, Ekonomi Bergerak.

Son'aniy, Irham., 2023. Manajemen Risiko Pada Pelaksanaan Gedung Instalasi Bedah Sentral RSUD Wonosari.

Tyagita, N. C. F., Susilowati, F., Jannah, M. R., Chrishnawati, Y., 2023. Risiko Proyek Konstruksi pada Tahap Pelaksanaan Pembangunan Jalan Tol (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan Tol Solo-Jogja). Media Komunikasi Teknik Sipil Volume 29, No.1, 2023, 132-140.

PERENCANAAN DAN ESTIMASI BIAYA K3 PADA PEMBANGUNAN JALAN DAN JEMBATAN SINGARAJA-MENGWITANI TITIK 7D DAN 7E

I Putu Ari Sanjaya[1], I Gusti Ngurah Oka Suputra [2], I Made Denick Wira Prayogi [3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung Bali
e-mail: iputuarisanjaya@unud.ac.id
[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung Bali
e-mail:okasuputra@unud.ac.id
[3]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Unud Bukit Jimbaran Badung Bali
e-mail: denickwira21@gmail.com

ABSTRAK

Pembangunan Jalan dan Jembatan Batas Kota Singaraja Mengwitani Titik 7D dan 7E berlokasi di Desa Gitgit, Kecamatan Sukasada, Buleleng yang berada pada daerah dataran tinggi yang pada umumnya memiliki tanah lempung. Pembangunan ini mengalami permasalahan K3 yaitu terjadi tanah longsor pada pekerjaan galian pondasi jembatan yang mengakibatkan terhambatnya pekerjaan. Berdasarkan data Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK) PT. Sinar Bali, tingkat risiko dari proyek ini adalah tingkat risiko sedang. Maka penelitian ini bertujuan menganalisis perencanaan kebutuhan peralatan dan upaya pencegahan dalam menangani permasalahan K3 serta mengestimasi biaya pencegahan (*prevention cost*) dan biaya pengawasan (*inspection cost*). Perencanaan K3 mencakup Identifikasi Bahaya, Penilaian Risiko, Penentuan Pengendalian Risiko dan Peluang (IBPRP) hasil dari perencanaan ini mendapatkan kebutuhan peralatan K3 berupa Alat Pelindung Diri (APD), banner K3, rambu petunjuk, larangan, peringatan, kewajiban, informasi, kerucut lalu lintas, tongkat pengatur lalu lintas, lampu penerangan, peralatan P3K, *rotary lamp*, APAR, bendera K3, terpal pencegahan longsor, dan poster. Upaya yang dilakukan untuk mencegah terjadi permasalahan K3 yaitu dengan *safety briefing*, *safety induction*, *safety talk/tool box meeting*, pelatihan keselamatan kontruksi, asuransi (*Construction All Risk/CAR*), pengujian mutu air dan mutu udara. Dari hasil perencanaan ini mendapatkan biaya pencegahan (*prevention cost*) sebesar Rp 203,890,000.00 dan biaya pengawasan (*inspection cost*) sebesar Rp 1,081,920,000.00. Biaya pengawasan di dapat dari gaji personel K3 selama kontrak pembangunan berlangsung. Personel K3 pada pembangunan ini mencakup: Ahli K3 Muda, HSE Supervisi Pengawasan, K3 Administrasi, K3 Lapangan, Koordinator Manajemen dan Keselamatan Lalu Lintas (KMKL) dan Petugas Lalu Lintas.

Kata kunci: Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3), Biaya Pengawasan dan Pencegahan, Risiko

1. PENDAHULUAN

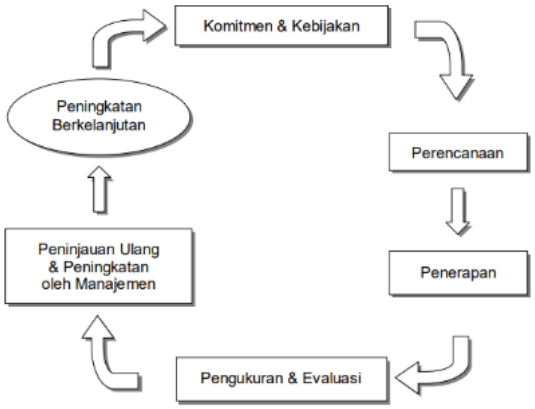
Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) didefinisikan sebagai hal terpenting pada perusahaan maupun pada proyek konstruksi. Kegiatan ini wajib dilaksanakan dan diterapkan pada perusahaan agar para pekerja terlindungi dari kecelakaan yang dapat menghambat produktivitas, aktivitas pekerjaan, dan juga berdampak pada kerugian biaya proyek konstruksi. Produktivitas perusahaaan akan dipengaruhi oleh kejadian kecelakaan kerja. Dalam prosesnya, produktivitas akan didukung oleh tiga pilar: kuantitas, kualitas, dan keamanan. Ketika ketiga faktor di atas seimbang akan tercipta Produktivitas. (Ramli, 2010). Proyek Pembangunan Jalan serta Jembatan Batas Kota Singaraja-Mengwitani Titik 7D dan 7E yang berlokasi di Desa Gitgit, Kecamatan Sukasada, Kabupaten Buleleng yang berada pada daerah dataran tinggi yang pada umumnya memiliki topografi pegunungan dan perbukitan memiliki kondisi tanah yang cenderung butiran kohesif (lempung). Kondisi ruas jalan sebelum pembangunan shortcut ini memiliki panjang eksisting 6,99 km dengan jumlah tikungan sebanyak 58 titik dan tingkat kelandaian jalan rata-rata sebesar 27%. Pembangunan shortcut di Kabupaten Buleleng bertujuan untuk mengurangi panjang eksisting menjadi 6,25 km dan mengurangi tikungan menjadi 21 titik dan tingkat kelandaian jalan ideal rata-rata menjadi maksimal 10%. Pembangunan ini mengalami sedikit masalah K3 yaitu terjadinya tanah longsor pada pekerjaan galian pondasi jembatan pada pilar 3 yang mengakibatkan terhambatnya pekerjaan dikarenakan pembesian pile cap yang sudah siap cor menjadi hancur akibat tertimbun tanah longsor. Terdapat berbagai faktor yang menyebabkan kelongsoran, meliputi kondisi geologis dan lingkungan, seperti curah hujan yang tinggi, penebangan hutan, gempa bumi, tekanan air tanah, dan kurangnya pengendalian risiko. Penyebab dari kecelakaan kerja pada pembangunan ini berupa tanah longsor adalah kurangnya pengendalian air hujan yang masuk kedalam area pekerjaan, dengan kondisi tanah cenderung butiran kohesif (lempung) yang menyebabkan berat tanah galian menjadi bertambah. Dalam analisa ini akan mendapatkan bahaya apa saja yang akan terjadi dan hasil tingkat risiko K3. Penelitian ini juga menghitung prevention cost dan inspection cost K3 pada proyek Pembangunan Jalan serta Jembatan Batas Kota Singaraja – Mengwitani Titik 7D dan 7E. Data-data dalam penelitian ini menggunakan data berupa Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK)

penyedia jasa, Rencana Anggaran Biaya (RAB), Perundangan dan Persyaratan Pemerintah Tentang Pedoman Penyusunan Sistem Manajemen K3.

2. TINJAUAN PUSTAKA DAN METODA

Sistem Manajemen K3

Sesuai PERMEN PUPR No. 10 Thn 2021, SMKK merupakan salah satu dari sistem manajemen pada konstruksi guna memastikan keselamatannya. Standar keselamatan, kesehatan, dan keberlanjutan merupakan pedoman K3 di lokasi pekerjaan, perlindungan sosial pekerja, administrasi lingkungan setempat, dan pengelolaan lingkungan hidup dalam penyediaan jasa konstruksi. Perancangan konsep SMKK dibuat pada tahap evaluasi, perencanaan dan perancangan. Selama fase desain ini, dilakukan pertimbangan IBPRP (identifikasi bahaya, penilaian risiko, manajemen risiko, dan penentuan peluang). Langkah-langkah dalam proses SMK3 bersifat siklus, dimulai dari pengembangan kebijakan → perencanaan → pelaksanaan/implementasi → pengukuran dan evaluasi → tinjauan & perbaikan manajemen, dilanjutkan dengan proses perbaikan berkelanjutan (continuous Improvement). sehingga proses perbaikan berlangsung secara inheren di dalam sistem, seperti terlihat dalam bagan sebagai berikut:



Gambar 1. Siklus SMK3

Perencanaan K3

Biaya keselamatan mencakup semua biayayang telah dikeluarkan, baik dalam upaya pencegahan kecelakaan maupun jika terjadi kecelakaan, termasuk akibat yang ditimbulkannya. Biaya keamanan dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok: biaya keamanan langsung dan biaya keamanan tidak langsung (Asiyanto, 2005). Dari PERMEN PUPR No 10 Thn 2021 mengenai Pedoman SMK3 pasal 40 mengenai biaya pada penerapan SMKK dalam pekerjaan konstruksi yang mencakup: Perencanaan K3 merupakan langkah lanjutan dalam menerapkan dan menjalankan kebijakan K3 yang telah ditsetuju dan ditetapkankan manajemen pusat. Proses ini melibatkan evaluasi hasil audit sebelumnya, berbagai masukan dari pihak-piahak terkait, serta hasil pengukuran pada kinerja K3. Hasil dari perencanaan ini akan menjadi pedoman dalam pelaksanaan dan oeperasional program K3 di masa mendatang (Ramli, 2010). IBPRP (identifikasi Bahaya, Penilaian Risiko, Manajemen Risiko dan Penentuan Peluant) berkaitan erat dengan pelaksanaan pekerjaan konstruksi yang telah disiapkan Kepala Keselamatan Konstruksi dan telah disetujui oleh Manajer Konstruksi. Tahapan kegiatan dalam IBPRP meliputi pekerjaan rutin (diagram rincian kerja) dan pekerjaan non-rutin (pekerjaan yang tidak termasuk dalam diagram rincian kerja). Uraian tugas IBPRP, seperti halnya dokumen RMPK, diintegrasikan ke dalam rencana kerja dan langkah kerja.

Biaya Penyelenggaraan K3

Biaya keselamatan mencakup semua biaya yang telah dikeluarkan, baik dalam upaya pencegahan kecelakaan maupun jika terjadi kecelakaan, termasuk akibat yang ditimbulkannya. Biaya keamanan dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok: biaya keamanan langsung dan biaya keamanan tidak langsung (Asiyanto, 2005). Dari PERMEN PUPR No 10 Thn 2021 mengenai Pedoman SMK3 pasal 40 mengenai biaya pada penerapan SMKK dalam pekerjaan konstruksi yang mencakup:

a) penyusunan RKK, RKPPL, dan RMLLP.
b) Sosialisasi, dukungan dan pelatihan.
c) Perlengkapan keselamatan kerja dan alat pelindung diri.

d) Asuransi dan kelengkapan perizinan.
e) Petugas Keselamatan Konstruksi.
f) Sarana, prasarana dan peralatan kesehatan.
g) Rambu dan perlengkapan lalu lintas yang diperlukan
h) Konsultasi dengan ahli di bidang keselamatan konstruksi.
i) Kegiatan dan peralatan yang berkaitan dengan pengelolaan risiko keselamatan konstruksi, termasuk biaya pengujian/inspeksi lingkungan.

Biaya keselamatan juga dapat dikategorikan ke dalam pendekatan lain yang terdiri dari biaya pada pencegahan, biaya inspeksi, serta biaya untuk kecelakaan. Jika sistem keselamatan belum ada atau program keselamatan belum ada, biaya pencegahan dan inspeksi biasanya tidak disediakan atau tersedia tetapi rendah (tidak mencukupi) dan biaya kecelakaan akan tinggi. Disisi lain, jika Anda mempunyai sistem atau program keselamatan, seringkali terdapat biaya pencegahan dan inspeksi yang cukup, sehingga Anda dapat menekan biaya kecelakaan tetap rendah. Jumlah biaya ketiga kelompok ini disebut total biaya keamanan (Jawat & Suwitanujaya, 2018).

Biaya pencegahan, yaitu:
1. Alat-alat untuk keamanan.
2. Berbagai bangunan pengaman, seperti rambu dan fasilitas untuk kesehatan.
3. Biaya lain berkaitan dengan upaya pencegahan jika terjadi kecelakaan.

Biaya inspeksi, yaitu:
1. Biaya untuk pengawas yang mengawasi.
2. Biaya lain terkait upaya pengawasan terhadap kecelakaan.

Biaya kecelakaan, yaitu:
1. Biaya rumah sakit pada korban kecelakaan.
2. Biaya pengganti untuk alat yang rusak akibat terjadinya kecelakaan
3. Biaya lain akibat dampak terjadinya kecelakaan.

Metode Penelitian

Lokasi penelitian terletak di Desa Gitgit, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali. Pelaksana proyek pada Pembangunan Jalan serta Jembatan Batas Kota Singaraja- Mengwitani Titik 7D dan 7E adalah PT. Sinarbali Binakarya PT. Agung Kusuma KSO, nilai kontrak sebesar Rp 82.090.682.000,00,- dengan masa pelaksanaan selama 360 hari kalender. Pembangunan ini merupakan lanjutan dari titik sebelumnya yakni titk 7A, 7B, dan 7C. Pada pembangunan titik 7D dan 7E ini memiliki ruas jalan sepanjang 555 meter dengan pembangunan jalan baru sepanjang 400 meter dan galian sedalam 60 meter. Selain itu juga akan dilengkapi dengan pembangunan jembatan sepanjang 155 meter yang berada pada titik 7D dengan super elevasi dan tikung



Gambar 2. Lokasi *Shortcut* Singaraja-Mengwitani Titik 7D dan 7E

Adapun tipe data yang akan digunakan adalah sebagai berikut:
1. Data Primer
   Data primer yang diperoleh: berupa informasi proyek seperti data staf pekerja penyedia jasa, staf pekerja supervisi pengawasan, pekerja lapangan, dan pekerja operator.

Tabel 1. Jumlah Pekerja Pembangunan Shortcut 7D dan 7E

Pekerja	Jumlah

Staff PT Sinar Bali Binakarya	32
Staff Supervisi Konsultan Pengawasan	9
Operator	16
Tukang	55
Kepala Tukang	4
Mandor	1
Tamu dan Magang	12
Total	**129**

2. Data Sekunder
   Adapun data sekunder yang diperoleh yaitu:
   a) Time Schedule (Rencana Waktu Penyelesaian). Dengan time schedule dapat mengetahui urutan tugas yang akan dilakukan, durasi setiap aktivitas, bobot setiap tugas, dan waktu untuk menyelesaikan proyek.
   b) Rencana Anggaran Biaya (RAB). Dari RAB ini dapat diketahui harga satuan dalam biaya penyelenggaraan K3, biaya pengawasan K3 berupa gaji dari petugas K3.
   c) Scope pekerjaan, dipergunakan mengidentifikasi berbagai kegiatan yang berkaitan dengan proses konstruksi.
   d) Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK), ini digunakan untuk analisa perencanaan kesehatan dan keselamatan kerja (K3). Isi dari RKK ini meliputi perencanaan pada keselamatan konstruksi misalnya, identifikasi bahaya, penilaian risiko, identifikasi peluang dan pengendalian risiko, manajemem, dan tenaga kerja, standar dan peraturan perundang-undangan dalam perencanaan keselamatan kontruksi, dukungan keselamatan konstruksi, evaluasi kinerja penerapan SMKK.

Adapun teknik analisis yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Bahaya
   Menganalisis segala potensi terhadap bahaya pada setiap item pekerjaan pada sebuah proyek pembangunan tersebut. Analisis menggunakan OHSAS 18001 mengenai SMK3 serta data sekunder Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK).
2. Penilaian Risiko
   Memberikan nilai terhadap potensi bahaya yang sudah di analisis. Skala penilaian berdasarkan Permen PUPR Nomor 21 Tahun 2021 yang berskala 1-5. Menentukan penilaian kemungkinan terjadinya risiko dan nilai keparahan terhadap risiko itu. Kemudian nilai kemungkinan (F) dikali dengan nilai keparahan (A) akan mendapatkan Tingkat Risiko K3 (TR) nilai ini akan dimasukan kedalam tabel matriks dan mendapatkan persentase tingkat risiko pada pembangunan shortcut. Nilai ini akan berpengaruh terhadap estimasi biaya pengawasan (*inspection cost*).
3. Penentuan Pengendalian Risiko
   Penentuan pengendalian risiko dengan mengikuti hierarki pengendalian bahaya seperti substitusi administrasi, atau APD. Penentuan pengendalian risiko ini akan menghasilkan peralatan apa saja yang akan dibutuhkan dalam upaya pencegahan (*prevention*).
4. *Prevention Cost* dan *Inspection Cost*
   Prevention cost atau Biaya pencegahan meliputi peralatan keselamatan, bangunan keselamatan termasuk signage, serta biaya lainnya terkait upaya pencegahan potensi kecelakaan. *Inspection cost* atau biaya inspeksi mencakup biaya untuk personel pengawasan K3 yang berupa gaji HSE supervisi pengawasan, Ahli K3 konstruksi, K3 Administrasi, K3 Lapangan, Koordinator Manajemen Keselamatan Lalu Lintas (KMKL) dan Petugas Lalu Lintas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Bahaya, Kebutuhan Peralatan K3 dan Peringkat Risiko

Dalam perencanaan Identifikasi Bahaya, Penilaian Risiko dan Penentuan Pengendalian Risiko dan Peluang (IBPRP) berdasarkan data Rencana Keselamatan Konstruksi (RKK) dari PT. Sinarbali sebagai penyedia jasa pada

pembangunan ini mendapatkan hasil pada Tabel 2.

Tabel 2. Identifikasi Bahaya, Kebutuhan Peralatan K3 dan Peringkat Risiko

Uraian	Identifikasi Bahaya	Tingkat Risiko Kecil	Tingkat Risiko Sedang	Tingkat Risiko Besar	Peralatan dan Upaya Pencegahan
Divisi Umum	Tertabrak kendaraan proyek	0	0	3	Rambu peringatan, rambu Larangan, *safety line*, pengawasan Personel K3 sepatu keselamatan, sarung tangan, pelatihan keselamatan konstruksi
	Terjepit saat menaikan alat berat				
Divisi Drainase	Tertabrak kendaraan proyek	0	6	1	Rambu peringatan, rambu larangan, *safety line*, pengawasan personel K3
	Terjepit material				Sepatu keselamatan, sarung tangan, pelatihan keselamatan konstruksi
Divisi Pekerjaan Tanah	Tertimpa excavator	0	19	11	Rambu larangan, informasi, *safety briefing*, pelatihan analisis keselamatan pekerjaan
	Terjadi tanah longsor				Terpal pencegahan longsor, pengawasan terhadap kondisi tanah, safety line, rambu peringatan
	Bising alat berat				*Ear muff*
	Alat berat terguling				Pelatihan terhadap operator, papan informasi prosedur kerja.
	Tangan terluka				Sarung tangan, *safety induction*, peralatan P3K
	Tertimpa pohon				*Safety line*, rambu larangan, rambu peringatan, pelatihan bekerja pada ketinggian
Divisi Perkerasan Berbutir	Ceceran agregat pondasi	2	4	0	Rambu informasi, rambu kewajiban, pengawasan terhadap muatan
	Terhirup debu agregat				Masker dan kaca pelindung mata
Divisi Perkerasan Aspal	Terpecik aspal tanah	12	5	0	Rompi keselamatan, rambu larangan, peringatan, informasi, *safety briefing*
	Terpleset aspal panas				Sepatu keselamatan, *safety line*, rambu larangan, peringatan dan informasi
	ISPA				Masker
Divisi Struktur	Terjatuh saat pengecoran	9	19	28	Pelatihan prosedur kerja aman, *safety helmet, body harnes, fall anester*, lampu penerangan
	Robohnya bekisting				*Safety helmet*, pengawasan K3, rambu larangan, peringatan
	Pekerja sakit akibat pengecoran Non-stop				Asuransi (*Construction All Risk/CAR*), pengaturan jadwal kerja, P3K
	Jatuh saat pekerjaan PCI				*Body harnes, fall arnester*, pelatihan bekerja dalam ketinggian, *safety talk, safety helmet*

Uraian	Identifikasi Bahaya	Tingkat Risiko Kecil	Tingkat Risiko Sedang	Tingkat Risiko Besar	Peralatan dan Upaya Pencegahan
	Tertusuk kabel strands				Sarung tangan, pelatihan budaya berkeselamatan konstruksi
	Terjatuh ke dalam lubang bor				*Safety line*, rambu larangan
	Tertusuk, tersayat, terpotong saat pekerjaaan pembesian				Sarung tangan, sepatu keselamatan, pelindung mata, pengawasan K3
Divisi Finishing	Tertabrak kendaraan lalu lintas	2	6	5	Tongkat pengatur lalu lintas, *rotary lamp*, KMKL, petugas lalu lintas
	Kemacetan pada lalu lintas				Kerucut lalu lintas, Tongkat pengatur lalu lintas, *rotary lamp*, KMKL, petugas lalu lintas
	Tersengat arus listrik				Pelatihan prosedur kerja aman, *safety gloves*, sepatu keselamatan, *safety briefing*.
	Kebakaran				APAR

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa terdapat 59 penilaian risiko dengan tingkat risiko sedang, maka dapat disimpulkan bahwa Pembangunan Jalan serta Jembatan Titik 7D dan 7E ini memiliki tingkat risiko sedang. Berdasarkan Permen PUPR No. 10 Tahun 2021 pasal 21 ayat 7 menyebutkan pengelola keselamatan konstruksi untuk proyek konstruksi yang risiko keselamatan konstruksinya sedang terdiri dari ahli keselamatan dan kesehatan kerja tingkat menengah atau atau dengan Ahli Keselamatan Konstruksi Muda yang memiliki pengalaman minimal 3 (tiga) tahun.

Identifikasi Bahaya, Kebutuhan Peralatan K3 dan Peringkat Risiko

Tabel 3. Rekapitulasi Biaya Pencegahan (*Prevention Cost*)

Uraian	Total Biaya	
Alat Pelindung Diri (APD)	Rp	64,815,000.00
Penyiapan Dokumen Penerapan SMKK	Rp	4,000,000.00
Sosialisasi, Promosi, dan Pelatihan	Rp	6,800,000.00
Asuransi dan Perizinan Keselamatan Konstruksi	Rp	85,000,000.00
Fasilitas Sarana, Prasarana, dan Alat Kesehatan	Rp	9,000,000.00
Rambu dan Perlengkapan Lalu Lintas Yang Diperlukan Atau Manajemen Lalu Lintas	Rp	21,650,000.00
Kegiatan dan Peralatan Terkait Dengan Pengendalian Risiko Keselamatan Konstruksi	Rp	12,625,000.00
Total	**Rp**	**203,890,000.00**

Inspection cost

Menghitung estimasi biaya *prevention cost* dan *inspection cost* menggunakan data berupa harga *survey* harga APD di

Kota Denpasar, Rencana Anggaran Biaya (RAB) penyedia jasa, harga satuan mengacu pada Surat Edaran No. 11/SE/M/2019 mengenai Petunjuk Teknis Biaya Penyelenggaraan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi dan gaji personel pengawasan K3.

Prevention cost

Menghitung biaya pencegahan (prevention cost) K3 dilakukan dengan menghitung jumlah pekerja yang ada pada proyek. Harga satuan mengacu pada Surat Edaran No. 11/SE/M/2019 mengenai Petunjuk Teknis Biaya Penyelenggaraan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi. Perhitungan Biaya Alat Pelindung Diri dan Biaya Perlengkapan K3, harga satuan didapat dengan melakukan survey harga di wilayah Kota Denpasar. Uraian item pekerjaan di dapat berdasarkan PERMEN PUPR No. 10 Thn 2021 pasal 40 ayat 1 mengenai biaya penerapan SMKK dan Rencana Anggaran Biaya (RAB) K3 penyedia jasa. Hasil perhitungan untuk biaya pencegahan (prevention cost) dapat dilihat dalam Tabel 3.

4. KESIMPULAN

Kebutuhan peralatan yang dibutuhkan berdasarkan identifikasi bahaya dalam pembangunan shortcut 7D dan 7E berupa Alat Pelindung Diri (APD), Asuransi (Construction All Risk)/CAR, Peralatan P3K, Rambu petunjuk, larangan, kewajiban, informasi, pekerjaan sementara, kerucut lalu lintas Tongkat pengatur lalu lintas, lampu penerangan, Alat Pemadam Api Ringan (APAR), Bendera K3, Terpal pencegahan longsor. Pembangunan ini memiliki kategori tingkat risiko sedang, terdapat sebanyak 59 penilaian tingkat risiko dari total 132 identifikasi bahaya dalam perencanaan keselamatan konstruksi dengan nilai persentase 44,7%. Perhitungan estimasi biaya kesehatan dan keselamatan kerja pada proyek ini memperoleh nilai biaya pengawasan (inspection cost) sebesar Rp 1,081,920,000.00 dan nilai biaya pencegahan (prevention cost) sebesar Rp 203,890,000.00 Persentase total biaya penyelenggaraan K3 sebesar 1,53% dari total nilai kontrak penyedia jasa dan konsultan pengawasan dengan total sebesar Rp 83,822,932,000.00 (delapan puluh tiga miliyar delapan ratus dua puluh dua juta sembilan ratus tiga puluh dua ribu rupiah).

5. DAFTAR PUSTAKA

Arif, S. (2019). Job Safety Analysis dan Rencana Anggaran Biaya Dalam Rangka Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja di PT. Tebo Agung International, Kabupaten Tebo, Provinsi Jambi. Jurnal Bina Tambang, Vol. IV No. 1, ISSN: 2302-3333, 287-296.

Anonim. (2014). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum. Jakarta.

Asiyanto. (2005). Manajemen Produksi untuk Jasa Konstruksi. Jakarta: Pradnya Paramita.

BPJS Ketenagakerjaan. (2023). "Jumlah Kecelakaan Kerja di Indonesia Masih Tinggi". Retrieved from https://www.bpjsketenagakerjaan.go.id/berita/5769/Jumlah-kecelakaan-kerja-di-Indonesiamasih-tinggi.html (accessed 15/05).

International Labour Organization. (2005). ILO Encyclopaedia of Occupational Health and Safety.

Jawat., Suwitanujaya. (2018). "Estimasi Biaya Pencegahan K3 Pada Proyek Konstruksi".

Mangkunegara. (2002). Manajemen Sumber Daya Manusia. Cetakan keduabelas. Bandung.

OHSAS 18001. (2007). Occupational Health and Safety Assessment Series. OH&S Safety Management System Requirements.

Parisaraswanta, K. (2022). "Kajian Biaya Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Proyek".

PUPR. (2014). Permen PUPR Nomor 05/PRT/M/2014 Tentang Pedoman Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum.

PUPR. (2019). Surat Edaran Nomor 11/SE/M/2019 tentang Petunjuk Teknis Biaya Penyelenggaraan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi.

PUPR. (2021). Permen PUPR No. 10 Tahun 2021 Tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi.

Ramli, S. (2010). Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja OHSAS 18001. Dian Rakyat, Jakarta.

Widyastana, K. (2019). "Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja OHSAS 18001:2007 Pada PT. Tunas Jaya Sanur (Studi Kasus: Proyek Impiana Hotel Ubud, Gianyar)".

Arif, S. (2019). Job Safety Analysis dan Rencana Anggaran Biaya Dalam Rangka Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja di PT. Tebo Agung International, Kabupaten Tebo, Provinsi Jambi. Jurnal Bina Tambang, Vol. IV No. 1, ISSN: 2302-3333, 287-296.
Anonim. (2014). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum. Jakarta.
Asiyanto. (2005). Manajemen Produksi untuk Jasa Konstruksi. Jakarta: Pradnya Paramita.
BPJS Ketenagakerjaan. (2023). "Jumlah Kecelakaan Kerja di Indonesia Masih Tinggi". Retrieved from https://www.bpjsketenagakerjaan.go.id/berita/5769/Jumlah-kecelakaan-kerja-di-Indonesiamasih-tinggi.html (accessed 15/05).
International Labour Organization. (2005). ILO Encyclopaedia of Occupational Health and Safety.
Jawat., Suwitanujaya. (2018). "Estimasi Biaya Pencegahan K3 Pada Proyek Konstruksi".
Mangkunegara. (2002). Manajemen Sumber Daya Manusia. Cetakan keduabelas. Bandung.
OHSAS 18001. (2007). Occupational Health and Safety Assessment Series. OH&S Safety Management System Requirements.
Parisaraswanta, K. (2022). "Kajian Biaya Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Proyek".
PUPR. (2014). Permen PUPR Nomor 05/PRT/M/2014 Tentang Pedoman Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum.
PUPR. (2019). Surat Edaran Nomor 11/SE/M/2019 tentang Petunjuk Teknis Biaya Penyelenggaraan Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi.
PUPR. (2021). Permen PUPR No. 10 Tahun 2021 Tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi.
Ramli, S. (2010). Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja OHSAS 18001. Dian Rakyat, Jakarta.
Widyastana, K. (2019). "Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja OHSAS 18001:2007 Pada PT. Tunas Jaya Sanur (Studi Kasus: Proyek Impiana Hotel Ubud, Gianyar)".

TINJAUAN POTENSI PEREKAT PATI SORGUM DAN KITOSAN DALAM PRODUKSI PAPAN PARTIKEL RAMAH LINGKUNGAN

Rosalia Sira Sarungallo[1*], Muh. Wihardi Tjaronge[1], Ahyar Ahmad[2] dan Muralia Hustim[3]

[1]Program Studi Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino Km. 6, Gowa*
***e-mail**: rsarongallo@yahoo.com*
[1]Program Studi Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino Km. 6, Gowa
e-mail: tjaronge@yahoo.co.jp
[2]Departemen Kimia FMIPA, Universitas Hasanuddin, Jl. Perintis Kemerdekaan Km. 10, Makassar
e-mail: ahyarahmad@gmail.com
[3]Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Jl. Poros Malino Km. 6, Gowa
e-mail: muraliahustim@ft.unhas.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kesadaran lingkungan dan kebutuhan industri terhadap produk ramah lingkungan telah meningkatkan perhatian mengembangkan alternatif perekat alami yang dapat menggantikan perekat sintetis berbasis formaldehida. Produk kayu rekayasa banyak digunakan dalam industri konstruksi, umumnya diproduksi menggunakan perekat berbasis formaldehida yang memiliki dampak merugikan terhadap lingkungan. Artikel ini bertujuan untuk meninjau potensi penggunaan pati sorgum yang dimodifikasi dengan kitosan sebagai perekat ramah lingkungan dalam produksi papan partikel. Kelemahan utama pati sorgum, yaitu sifat hidrofiliknya yang tinggi dan kekuatan mekanik yang rendah, dapat diatasi melalui berbagai metode modifikasi kimia, seperti oksidasi, esterifikasi, eterifikasi, dan penggunaan *cross-linking*. Modifikasi kimia tersebut bertujuan untuk meningkatkan hidrofobisitas, kekuatan mekanik, serta ketahanan perekat terhadap kelembapan. Pati sorgum yang dikombinasikan dengan kitosan, yang memiliki sifat antimikroba dan kemampuan membentuk ikatan hidrogen dengan substrat kayu, dapat meningkatkan sifat adhesi perekat, ketahanan termal, dan stabilitas dalam kondisi lingkungan yang basah. Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan yang telah dimodifikasi memenuhi standar kekuatan mekanik yang dibutuhkan dalam produksi papan partikel, biodegradabilitas dan sifat non-toksik, sehingga lebih aman bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Dengan demikian, kombinasi pati sorgum dan kitosan yang dimodifikasi memiliki potensi besar untuk menggantikan perekat sintetis dalam industri kayu, serta berkontribusi pada pengurangan emisi bahan kimia berbahaya dan limbah industri yang sulit terurai.

Kata kunci: Pati sorgum, kitosan, perekat alami

1. PENDAHULUAN

Ketergantungan industri terhadap perekat sintetis berbasis formaldehida telah menimbulkan kekhawatiran akan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Emisi *Volatile Organic Compounds* (VOCs) yang berbahaya, resistensi terhadap proses biodegradasi, dan kesulitan dalam daur ulang merupakan beberapa masalah utama yang terkait dengan perekat jenis ini. VOCs, atau senyawa organik volatil, adalah zat kimia yang mudah menguap dan dapat mencemari udara serta berkontribusi pada pembentukan ozon troposfer dan berkontribusi pada pemanasan global (Kristak et al., 2023; Vineeth and Gadhave, 2020). Dalam industri konstruksi, papan partikel merupakan salah satu produk kayu rekayasa yang paling banyak digunakan karena sifatnya yang kuat, ringan, dan mudah dibentuk (Poleto et al., 2020; Uemura Silva et al., 2021). Perekat yang digunakan dalam pembuatan papan partikel berperan dalam menentukan kualitas dan daya tahan produk akhir. Saat ini penggunaan perekat sintetis berbasis formaldehida telah menjadi sorotan karena dampak negatifnya terhadap lingkungan. Untuk mengatasi isu-isu tersebut, industri perekat terus mengembangkan perekat alternatif yang lebih ramah lingkungan. Perekat berbasis biopolymer berpotensi untuk menggantikan perekat sintetis dalam industri konstruksi. Dengan sifatnya yang dapat diperbarui dan mudah terurai, perekat biopolimer tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga membuka peluang untuk menghasilkan produk konstruksi yang lebih berkelanjutan (Gadhave et al., 2019; Triveni Soubam and Arun Gupta, 2021). Perekat biopolymer umumnya terbuat dari bahan-bahan alami seperti pati, kitosan, dan protein nabati, yang membuatnya lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan perekat sintetis berbasis formaldehida. Meskipun demikian, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi, seperti pengembangan formulasi untuk mencapai kinerja adhesi yang setara dengan perekat sintetis, serta ketersediaan bahan baku dalam skala besar dan harga yang kompetitif (J. Li et al., 2022; Siebert and Wilker, 2019; Solt et al., 2019) .

Perekat biopolimer, yang terbuat dari pati sorgum dan kitosan, memiliki potensi besar sebagai alternatif perekat sintetis alami. Kandungan amilosa pada pati sorgum memberikan sifat adhesif yang baik (Peiris et al., 2021; Yan et al., 2023), sementara kitosan, sebagai polimer alami dengan sifat antimikroba, meningkatkan daya tahan perekat terhadap degradasi biologis memberikan kekuatan dan fleksibilitas (Confederat et al., 2021; Matica et al., 2019).

Meskipun pati memiliki potensi sebagai bahan perekat yang ramah lingkungan, terdapat juga kelemahannya seperti sifat hidrofilik yang tinggi, kekuatan adhesi yang rendah, dan rentan terhadap serangan mikroba merupakan kendala utama yang perlu diatasi. Gugus hidroksil (-OH) pada molekul pati menyebabkan pati mudah menyerap air, sehingga mengurangi daya tahan perekat dalam kondisi lembab. Demikian juga dengan struktur polimer pati yang relatif lemah dan kurangnya interaksi kovalen dengan substrat juga berkontribusi pada kekuatan adhesi yang rendah. Selain itu, material berbasis pati rentan terhadap serangan jamur dan bakteri karena pati merupakan sumber makanan bagi berbagai jenis mikroorganisme, yang dapat menyebabkan degradasi dan penurunan kinerja (Maulana et al., 2022; Zhang et al., 2019). Mengatasi kelemahan pati tersebut dan dan untuk meningkatkan potensinya sebagai bahan perekat, perlu diatasi melalui modifikasi dan formulasi, seperti oksidasi, esterifikasi, eterifikasi, dan penambahan cross-linker, untuk meningkatkan hidrofobisitas, kekuatan mekanik, dan kompatibilitas dengan substrat (Peidayesh et al., 2021; X. Wang et al., 2020). Kitosan yang berasal dari kulit udang dan kerang, dapat bersinergi dengan pati sorgum untuk pembuatan perekat. Kitosan memiliki gugus amino yang bersifat basa, sehingga dapat berinteraksi dengan berbagai jenis substrat dan meningkatkan kekuatan adhesi (Boudouaia et al., 2019; Ningsi et al., 2019). Kombinasi pati sorgum dan kitosan dalam formulasi perekat dapat mengatasi kelemahan masing-masing komponen, menghasilkan perekat dengan kinerja yang lebih baik. Penelitian ini bertujuan untuk meninjau potensi penggunaan pati sorgum dan kitosan sebagai perekat alternatif yang ramah lingkungan dalam pengembangan papan partikel.

2. SIFAT PATI SORGUM

Biji sorgum mengandung pati dengan persentase 55,6-75,2% (Palacios et al., 2021), dengan karakteristik yang mirip dengan maizena (Shaikh et al., 2019; Sira and Amaiz, 2004). Pati sorgum memiliki kandungan amilosa dan amilopektin yang mempengaruhi sifat fisikokimianya, termasuk kemampuan adhesinya. Kandungan amilosa dalam genotipe sorgum bervariasi, antara 24-33% amilosa, lebih rendah dibandingkan dengan pati jagung. Amilosa berkontribusi pada pembentukan struktur gel dan stabilitas pasta, di mana peran amilosa dalam aplikasi terkait proses gelatinisasi dan retrogradasi, yang mempengaruhi sifat fisikokimia pati sorgum (Zhu, 2014). Proses gelatinisasi dan retrogradasi pati sangat mempengaruhi sifat adhesifnya. Gelatinisasi yang tidak sempurna dapat menyebabkan adhesi yang lemah, sedangkan retrogradasi yang berlebihan dapat menyebabkan pembentukan struktur yang keras dan rapuh. Namun, gugus hidroksil (-OH) pada pati menyebabkan sifat hidrofilik yang tinggi, yang berpotensi menurunkan ketahanan perekat di lingkungan yang lembab (Htet et al., 2022). Untuk mengatasi hal ini, modifikasi kimia melalui esterifikasi, eterifikasi, dan penambahan cross-linker telah dikembangkan untuk meningkatkan hidrofobisitas dan kekuatan adhesi pati (L. Chen et al., 2021). Selain itu, pati sorgum memiliki sifat *shear-thinning* (*breakdown*) dan viskositas puncak yang relatif lebih tinggi tetapi suhu pasta lebih rendah dibandingkan dengan pati jagung (Ai et al., 2011). Sifat *shear-thinning*, yaitu penurunan viskositas dengan peningkatan laju geser (Duan et al., 2024). Pati sorgum menunjukkan sifat penipisan geser (*shear-thinning*), yang dibutuhkan untuk menjaga kinerja perekat dengan menurunkan viskositas saat diterapkan tekanan selama proses pembuatan, sehingga memudahkan penyebaran dan penetrasi perekat (Ishaq et al., 2024). Sifat rheologi pada pati sorgum, yaitu viskositas puncak dan breakdown, menunjukkan potensi dalam aplikasi perekat industri. Meski belum ada pembahasan spesifik tentang sifat penipisan geser, viskositas pati sorgum dapat menyesuaikan selama proses aplikasi perekat terutama untuk pembuatan papan partikel. Modifikasi kimia ini pada pati sorgum berpotensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi industri, termasuk sebagai bahan perekat, film kemasan, dan bahan pengisi. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan kondisi reaksi modifikasi kimia, sehingga diperoleh sifat fisikokimia pati yang sesuai untuk aplikasi spesifik. Potensi pati sorgum sebagai bahan baku perekat alami dapat ditingkatkan, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan perekat sintetis yang berasal dari petrokimia.

3. KITOSAN SEBAGAI AGEN PENGHUBUNG

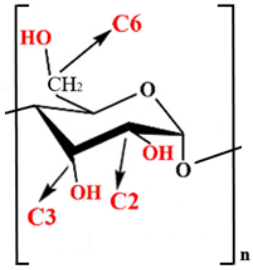
Kitosan, polimer alami yang diperoleh dari deasetilasi kitin (biasanya dari kulit udang dan kerang), memiliki sifat antimikroba dan bioaktif yang dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan perekat terhadap degradasi biologis. Gugus amino pada kitosan memungkinkan interaksi kimia yang kuat dengan substrat, memperkuat ikatan antara pati dan substrat (Mulaudzi et al., 2022). Kitosan memiliki sifat daya rekat yang kuat. Kemampuan kitosan untuk membentuk ikatan hidrogen dan ikatan ionik dengan berbagai substrat menjadikannya bahan yang ideal untuk aplikasi sebagai perekat. Daya rekat yang kuat dapat dimanfaatkan dalam pembuatan *bioadhesive*, di mana kitosan digunakan untuk mengikat komponen bersama-sama dalam formulasi yang ramah lingkungan.

Kitosan adalah padatan amorf berwarna putih kekuningan dengan sifat polielektrolit, sehingga dapat terionisasi dalam larutan Dalam larutan, terutama dengan asam asetat, kitosan berperilaku sebagai asam poli, menunjukkan tingkat ionisasi yang dapat dimodelkan secara matematis, mengungkapkan konstanta disosiasi nyata sekitar 6,44 (Giraldo and Rivas, 2021). Karena memiliki gugus amino bebas, kitosan bersifat basa dan dapat berinteraksi dengan senyawa lain melalui ikatan ionik atau ikatan hidrogen. Gugus amino bebas dalam struktur kitosan memberikan karakteristik khas sebagai polielektrolit. Dalam lingkungan asam, gugus amino bebas dapat mengalami protonasi, sehingga meningkatkan kelarutan kitosan dalam air dan memperluas fungsionalitasnya dalam berbagai aplikasi,

seperti pembentukan film dan agen pengikat. Memiliki sifat-sifat tersebut, kitosan sangat berpotensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi industri yang memerlukan bahan perekat yang kuat dan ramah lingkungan.

4. MODIFIKASI KIMIA PATI

Pati adalah homopolisakarida yang terdiri dari unit-unit glukosa dan digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena sifatnya yang *biodegradable* dan ketersediaannya yang melimpah. Pati *native* memiliki kelemahan yang membatasi penggunaannya dalam aplikasi yang membutuhkan kinerja tinggi, seperti perekat. Sifat fisikokimia dari pati *native* yaitu stabilitas termal, kelarutan, dan viskositas, belum memenuhi persyaratan yang diperlukan. Oleh karena itu, modifikasi kimia diperlukan untuk meningkatkan kinerja pati seperti kekuatan adhesi, ketahanan terhadap lingkungan, dan sifat mekanik lainnya. Modifikasi kimia bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat pati, seperti kekuatan ikatan, ketahanan terhadap air, dan kemampuan membentuk film. Melalui modifikasi, pati dapat diubah menjadi bahan perekat yang lebih kuat, fleksibel, dan tahan lama, sehingga dapat bersaing dengan perekat sintetis (Masina et al., 2017). Modifikasi kimia merupakan proses yang melibatkan perubahan struktur molekul pati melalui reaksi kimia dengan tujuan meningkatkan sifat fungsionalnya (Chen et al., 2017). Teknik modifikasi yang umum meliputi oksidasi, esterifikasi, eterifikasi, dan pembentukan ikatan silang (*Cross-linking*). Modifikasi ini umumnya melibatkan reaksi pada gugus hidroksil pati, sehingga mengubah sifat fisikokimia seperti kelarutan, viskositas, dan kemampuan membentuk gel (Haq et al., 2019; Wang et al., 2022; Wang et al., 2023). Ojogbo et al., (2020) lebih lanjut menjelaskan bahwa tujuan utama modifikasi pati adalah untuk memperoleh sifat yang lebih sesuai dengan aplikasi spesifik, baik dengan meningkatkan sifat yang sudah ada maupun dengan terbentuk sifat baru. Setiap metode modifikasi menghasilkan karakteristik pati termodifikasi yang berbeda. Pada modifikasi kimia, terdapat tiga gugus hidroksil (-OH) pada atom karbon C2, C3, dan C6 dari unit glukosa yang dapat disubstitusi oleh gugus fungsi dari reagen kimia, dengan derajat substitusi (DS) maksimal sebesar 3. Reaktivitas gugus -OH bervariasi, di mana gugus -OH pada atom karbon primer (C6) lebih reaktif dibandingkan dengan gugus -OH pada atom karbon sekunder (C2 dan C3) (Chi et al., 2008; Shen et al., 2021). Selain itu, karena adanya tiga gugus hidroksil aktif pada molekul glukosa (C2, C3, dan C6) yang ditunjukkan pada Gambar 1., dimungkinkan untuk melakukan modifikasi kimia pati untuk meningkatkan sifat hidrofobisitasnya, sehingga dapat diaplikasikan pada lingkungan dengan kadar air tinggi (Ojogbo et al., 2020; X. Wang et al., 2020; Yun et al., 2021).



Gambar 1. Gugus hidroksil aktif pada molekul glukosa (C2, C3, dan C6)

Pati *native* memiliki sifat hidrofilisitas yang kuat akibat adanya sejumlah besar gugus hidroksil, yang menyebabkan pati rentan terhadap kelembaban dan membatasi penggunaannya dalam berbagai aplikasi industri, termasuk dalam perekat untuk material hidrofobik (Wang et al., 2020). Hidrofilisitas ini juga menyebabkan pati tidak larut dalam air pada suhu kamar, serta cenderung beragregasi dalam media organik karena adanya ikatan hidrogen antarmolekul (Cao et al., 2019). Selain itu, pati yang tidak mudah bercampur dengan bahan yang tidak menyerap air, seperti plastik, menjadi masalah dalam penggunaannya. Mengatasi hal tersebut, dilakukan modifikasi pada pati untuk meningkatkan adhesi antarmuka (Meng et al., 2019).

Oksidasi Pati

Oksidasi adalah salah satu metode modifikasi kimia yang umum diterapkan pada pati untuk meningkatkan sifat fungsionalnya. Proses oksidasi pati menyebabkan perubahan kimia pada molekul pati, yang ditandai dengan pembentukan gugus karbonil (-C=O) dan karboksil (-COOH), yang mengubah sifat fisik dan kimia pati. Reaksi oksidasi dilakukan menggunakan agen pengoksidasi seperti hidrogen peroksida, natrium hipoklorit, atau periodat, yang secara selektif menyerang gugus hidroksil (-OH) pada rantai glukosa pati. Oksidasi meningkatkan kelarutan dan daya serap air dari pati yang dioksidasi. Gugus karbonil dan karboksil yang terbentuk selama proses oksidasi lebih bersifat hidrofilik dibandingkan dengan gugus hidroksil asli, yang menyebabkan peningkatan interaksi antara molekul pati dan air. Kelarutan yang lebih tinggi menyebabkan pati yang dioksidasi digunakan dalam berbagai produk pangan dan farmasi yang memerlukan bahan dengan kemampuan larut yang baik (Haq et al., 2019). Studi oleh Cao et al., (2019) juga menunjukkan bahwa pati yang dioksidasi dengan agen pengoksidasi seperti asam periodat meningkatkan kelarutan dalam air, bahkan pada suhu rendah, sehingga lebih mudah diolah dalam berbagai

aplikasi industri.

Oksidasi pati menghasilkan penurunan viskositas, yang disebabkan oleh pemutusan rantai polimer pati selama proses oksidasi. Pemutusan ini mengurangi berat molekul pati, serta menurunkan viskositasnya saat terdispersi dalam air. Penurunan viskositas dibutuhkan dalam industri makanan, di mana kontrol viskositas diperlukan untuk menghasilkan tekstur produk yang diinginkan. Selain itu, pati yang dioksidasi juga menunjukkan stabilitas yang lebih baik terhadap retrogradasi, yaitu fenomena di mana molekul pati kembali ke bentuk kristal setelah proses gelatinisasi dan pendinginan (Haq et al., 2019). Liu et al., (2023) dalam penelitiannya menemukan bahwa oksidasi pati dengan reagen Fenton memperkenalkan struktur *cross-linked*, yang meningkatkan stabilitas pati terhadap retrogradasi, terutama dalam aplikasi yang membutuhkan stabilitas selama penyimpanan. Salah satu keunggulan utama dari pati yang dioksidasi adalah kemampuannya untuk membentuk film yang fleksibel. Gugus karbonil dan karboksil yang terbentuk selama oksidasi membantu meningkatkan daya ikat antar molekul pati, yang menghasilkan film dengan kekuatan mekanis dan kejernihan yang lebih baik. Hal ini sangat penting dalam industri tekstil dan kemasan, di mana film pati yang dioksidasi digunakan sebagai pengganti bahan sintetis dalam aplikasi pengemasan ramah lingkungan(Wang et al., 2020). Menurut Liu et al., (2023), film yang dihasilkan dari pati yang dioksidasi melalui reagen Fenton menunjukkan hidrofobisitas yang lebih tinggi dan kekuatan tarik yang lebih baik, yang meningkatkan ketahanannya dalam kondisi basah dan lebih kompetitif dibandingkan bahan kemasan berbasis minyak bumi. Oksidasi juga mempengaruhi stabilitas termal dari pati. Menurut Liu et al., (2023), pati yang dioksidasi menunjukkan peningkatan stabilitas termal, terutama ketika digunakan sebagai bahan perekat dalam aplikasi kayu. Stabilitas termal yang lebih tinggi menyebabkan penggunaan pati dalam lingkungan dengan suhu tinggi tanpa degradasi yang cepat. Penambahan gugus karbonil dan karboksil membantu memperkuat struktur polimer pati, yang menyebabkan peningkatan suhu dekomposisi termal pada pati yang dioksidasi, dibandingkan dengan pati *native*. Modifikasi oksidatif memperkuat kemampuan ikatan pati, terutama dalam kondisi basah atau lembab, menjadikannya solusi ramah lingkungan untuk perekat kayu yang tahan lama dan tahan air.

Esterifikasi Pati

Esterifikasi adalah proses kimia yang melibatkan reaksi antara gugus hidroksil (-OH) pada molekul pati dengan gugus asam organik atau anhidrida asam, menghasilkan ester. Gugus hidroksil molekul pati yang berada pada atom karbon C2, C3, dan C6 dari unit glukosa dapat bereaksi dengan asam organik atau anhidrida. Proses ini dapat dilakukan dengan berbagai reagen esterifikasi, seperti anhidrida asetat atau anhidrida suksinat, tergantung pada sifat fungsional yang diinginkan. Esterifikasi digunakan untuk meningkatkan hidrofobisitas dan stabilitas termal pati, sehingga dapat diaplikasikan sebagai perekat dalam lingkungan dengan paparan kelembapan atau suhu tinggi. Hidrofobisitas Pati alami bersifat hidrofilik karena keberadaan gugus hidroksil, yang menyebabkan pati menyerap air dengan mudah. Sifat pati dapat menyebabkan masalah karena papan partikel sering kali digunakan di lingkungan yang lembap. Esterifikasi pati mengurangi hidrofilisitas dengan menggantikan gugus hidroksil dengan gugus asil yang lebih hidrofobik. Esterifikasi dengan anhidrida suksinat (*Octenyl Succinic Anhydride*, OSA) mengintroduksi gugus suksinil ke dalam molekul pati, memberikan karakteristik hidrofobik pada pati (Torres and De-la-Torre, 2022).

Proses pemadatan pada suhu tinggi menuntut perekat dengan stabilitas termal yang tinggi. Esterifikasi pati, dapat mengurangi kecenderungan degradasi dan menurunkan viskositas, meningkatkan stabilitas termal perekat, sehingga perekat berbasis pati teresterifikasi dapat mempertahankan kekuatan ikatannya selama proses pemanasan, yangdibutuhkan dalam aplikasi industri papan partikel. Esterifikasi menghasilkan penurunan viskositas dan mengurangi perubahan fase yang tidak diinginkan pada suhu tinggi (Wang et al., 2021). Modifikasi esterifikasi meningkatkan kemampuan molekul pati untuk membentuk film yang kuat dan fleksibel. Esterifikasi dengan anhidrida asetat menghasilkan pati terasetilasi yang memiliki kemampuan pembentukan film yang lebih baik, serta memberikan kekuatan mekanik yang lebih tinggi pada perekat (Zuo et al., 2015). Film yang terbentuk dari pati teresterifikasi juga lebih seragam dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap retak dibandingkan film yang terbentuk dari pati *native*. Proses esterifikasi mengubah struktur molekuler pati, sehingga meningkatkan kompatibilitasnya dengan bahan lain yang bersifat hidrofobik, seperti partikel kayu dalam papan partikel. Mekanisme adhesi terjadi melalui pembentukan ikatan kovalen atau ikatan hidrogen antara gugus asil pada pati yang teresterifikasi dengan permukaan partikel kayu. Ikatan hidrogen yang lebih kuat terjadi karena modifikasi pati mengurangi kristalinitas dan meningkatkan kelarutan, sehingga memberikan lebih banyak interaksi antarmolekul pada permukaan kontak (Zuo et al., 2015). Pada suhu tinggi, gugus yang terikat pada pati mengalami *cross-linking*, yang memperkuat jaringan polimer perekat dan meningkatkan kekuatan ikatan antar partikel kayu.

Penggunaan pati teresterifikasi sebagai bahan dasar perekat dalam pembuatan papan partikel memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan perekat berbasis formaldehida atau bahan sintetis lainnya. Pati teresterifikasi ramah lingkungan, dan memiliki biodegradabilitas yang lebih baik, sehingga lebih berkelanjutan dalam industri furnitur dan konstruksi. Selain itu, karena pati teresterifikasi memiliki daya tahan terhadap kelembapan yang lebih tinggi, produk papan partikel yang menggunakan perekat berbasis pati teresterifikasi memiliki umur pakai yang lebih lama, terutama di lingkungan yang lembap atau basah. Penelitian menunjukkan bahwa papan partikel yang

menggunakan perekat berbasis pati teresterifikasi menunjukkan peningkatan kekuatan geser dan ketahanan terhadap pengelupasan, dua sifat penting yang diharapkan dari produk furnitur atau konstruksi (Wang et al., 2021). Perekat ini juga lebih aman digunakan karena tidak mengandung formaldehida, yang merupakan bahan berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Eterifikasi Pati

Eterifikasi adalah proses kimia gugus hidroksil (-OH) pada molekul pati digantikan oleh gugus eter (R-O-R), menjadi sifat baru pada struktur pati. Modifikasi eterifikasi mengurangi kemampuan molekul pati untuk membentuk ikatan hidrogen antarmolekul, sehingga meningkatkan kelarutannya dalam air dan memperbaiki sifat mekaniknya. Reaksi eterifikasi dapat dilakukan menggunakan berbagai reagen, seperti epoksida, alkil halida, atau hidroksipropil, yang menggantikan gugus hidroksil dengan gugus eter yang lebih besar dan lebih fleksibel. Menurut Masina et al. (2017), eterifikasi memperkenalkan gugus eter ke dalam struktur pati, yang dapat meningkatkan kelarutan pati dalam air dan kemampuan interaksi antarmolekulnya dengan partikel kayu. Dalam aplikasi pembuatan papan partikel, dibutuhkan perekat dengan sifat kelarutan yang baik agar dapat diaplikasikan dengan mudah dan menyebar secara merata ke seluruh permukaan kayu. Adanya gugus eter, molekul pati menjadi lebih mudah terdispersi dalam air, yang mempercepat proses pelapisan kayu dengan perekat (Masina et al., 2017). Gugus eter yang ditambahkan selama proses eterifikasi, seperti gugus hidroksipropil atau karboksimetil, mengurangi kemampuan molekul pati untuk beragregasi, sehingga menghasilkan larutan yang lebih homogen dan stabil. Partikel kayu yang digunakan dalam papan partikel umumnya memiliki struktur berpori, yang memerlukan perekat dengan viskositas rendah dan kemampuan penetrasi yang baik untuk memastikan ikatan yang kuat (Ojogbo et al., 2020). Eterifikasi menghasilkan viskositas yang lebih rendah pada larutan perekat, yang memfasilitasi penyebaran perekat ke dalam pori-pori kayu, sehingga menghasilkan ikatan yang lebih kuat dan seragam.

Perekat untuk papan partikel harus tahan terhadap suhu tinggi selama proses pemadatan termal, yang biasanya melibatkan tekanan dan panas. Modifikasi eterifikasi menghasilkan peningkatan stabilitas termal karena adanya gugus eter yang lebih stabil terhadap suhu tinggi dibandingkan dengan gugus hidroksil asli pada pati. Hal ini mencegah degradasi molekul pati selama proses pemanasan dan kekuatan ikatan lebih konsisten (Zuo et al., 2015). Eterifikasi meningkatkan kelarutan pati dalam air, dan memperbaiki ketahanan terhadap air dalam produk jadi, seperti papan partikel. Produk papan partikel sering kali terpapar kelembapan dalam penggunaannya, seperti pada furnitur atau bangunan. Perekat yang tereterifikasi menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap air dibandingkan dengan pati *native*, karena interaksi eter yang stabil dengan substrat kayu mencegah degradasi ikatan perekat dalam kondisi lembap (Wang et al., 2021). Eterifikasi juga menghasilkan perubahan struktural yang meningkatkan kemampuan perekat untuk membentuk jembatan hidrogen antara gugus eter pada pati dan gugus hidroksil pada permukaan kayu. Selain itu, proses pengeringan perekat selama pembuatan papan partikel menyebabkan terjadi pembentukan jaringan yang lebih kuat di antara molekul pati yang dieterifikasi, yang mengarah pada pembentukan film yang lebih padat dan lebih stabil. Jaringan menjadi lebih tahan terhadap pergerakan molekul air dan fluktuasi suhu, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap delaminasi (terlepasnya lapisan) selama penggunaan produk papan partikel (Torres and De-la-Torre, 2022). Perekat berbasis pati yang telah dimodifikasi melalui eterifikasi menunjukkan kekuatan adhesi yang lebih baik, ketahanan terhadap kelembapan, dan stabilitas termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan perekat berbasis pati tanpa modifikasi. Hal ini menjadikannya pilihan yang layak untuk digunakan dalam pembuatan papan partikel, terutama di sektor konstruksi dan furnitur. Menurut penelitian oleh Wang et al., (2021), penggunaan perekat berbasis pati yang dieterifikasi menghasilkan papan partikel yang memiliki kekuatan mekanik yang memenuhi atau bahkan melebihi standar industri untuk ketahanan geser dan ketahanan terhadap kelembapan. Penggunaan perekat ini juga dapat mengurangi ketergantungan pada perekat berbasis formaldehida, yang lebih berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

Cross-linking Pati

Modifikasi *cross-linking* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan sifat fungsional pati, sehingga lebih sesuai digunakan dalam aplikasi perekat industri, termasuk pada papan partikel. Modifikasi ikatan silang (*cross-link*) antar molekul pati, dapat memperkuat struktur molekuler dan meningkatkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan dengan suhu tinggi dan lembap. Aplikasi perekat pada papan partikel, membutuhkan perekat yang memiliki stabilitas yang baik selama proses pemanasan dan pemadatan, serta daya rekat yang kuat antar partikel kayu. *Cross-linking* pati dapat meningkatkan ketahanan mekanis dan adhesi dalam perekat berbasis pati, yang dapat menggantikan perekat sintetis berbasis formaldehida yang berbahaya bagi lingkungan.

Cross-linking adalah proses di mana molekul pati dihubungkan oleh agen pengikat untuk membentuk jaringan tiga dimensi yang lebih stabil. Proses *cross-linking* mengubah sifat-sifat molekul pati, seperti viskositas, kekuatan mekanis, stabilitas terhadap panas, dan ketahanan terhadap air. Agen *cross-linking* yang umum digunakan adalah *sodium trimetaphosphate* (STMP), *epichlorohydrin* (EPI), dan fosfat. Setiap agen *cross-linking* bekerja dengan cara yang berbeda untuk membentuk jembatan kovalen antar molekul pati, yang mengubah sifat fisik dan kimia pati yang terlibat. *Sodium trimetaphosphate* (STMP) dan *sodium tripolyphosphate* (STPP) membentuk ikatan silang antara

gugus hidroksil dari molekul pati melalui reaksi esterifikasi. Ikatan silang meningkatkan resistensi pati terhadap degradasi termal dan mekanik, sehingga membuat perekat lebih stabil dalam kondisi lingkungan industri yang keras (Sandhu et al., 2021). *Epichlorohydrin* (EPI) bekerja dengan menggantikan gugus hidroksil pati dengan gugus epoksi, yang kemudian bereaksi dengan molekul pati lainnya untuk membentuk ikatan silang. Penggunaan EPI sebagai agen *cross-linking* meningkatkan kekuatan adhesi dan stabilitas termal pati dalam perekat industri (Yu et al., 2024).

Perekat berbasis pati yang di-*cross-link* menunjukkan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan pati *native*, karena jaringan tiga dimensi yang terbentuk melalui *cross-linking* lebih tahan terhadap degradasi pada suhu tinggi. Stabilitas termal ini juga penting untuk mencegah dekomposisi prematur perekat selama proses pemadatan. Sandhu et al., (2021) menunjukkan bahwa pati sorgum yang di-*cross-link* dengan STMP memiliki peningkatan stabilitas termal yang signifikan, ditunjukkan oleh penurunan viskositas breakdown dan peningkatan kekuatan ikatan antar partikel kayu. Stabilitas termal yang lebih tinggi ini mengurangi risiko delaminasi pada papan partikel, sehingga memperpanjang umur produk.

Pati alami memiliki sifat hidrofilik yang kuat karena keberadaan gugus hidroksil, yang menyebabkan absorpsi air berlebihan dan melemahnya ikatan perekat dalam kondisi basah. *Cross-linking* pati mengurangi kemampuan pati untuk menyerap air dengan mengikat sebagian besar gugus hidroksil yang ada, sehingga menghasilkan perekat yang lebih tahan terhadap kelembapan (Yu et al., 2024).

Kekuatan adhesi adalah salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam aplikasi perekat untuk papan partikel. *Cross-linking* pati menghasilkan peningkatan kekuatan mekanik perekat, karena ikatan silang memperkuat struktur granul pati, yang meningkatkan ikatan dengan partikel kayu. Peningkatan kekuatan adhesi ini ditunjukkan oleh uji kekuatan geser (*shear strength*), yang mengukur seberapa kuat perekat menahan tekanan setelah papan partikel dipadatkan. Yu et al., (2024) menunjukkan bahwa perekat berbasis pati yang di-*cross-link* dengan EPI memiliki kekuatan geser kering sebesar 6,46 MPa dan kekuatan geser basah sebesar 1,32 MPa, yang menunjukkan bahwa perekat mampu memberikan ikatan yang kuat bahkan dalam kondisi basah.

Perekat yang di-*cross-link* cenderung memiliki viskositas yang lebih rendah pada suhu aplikasi, tetapi meningkat kembali setelah suhu turun, yang membantu penetrasi yang lebih baik ke dalam pori-pori kayu dan membentuk ikatan yang lebih kuat. Sandhu et al. (2021) menunjukkan bahwa perekat berbasis pati sorgum yang di-*cross-link* menunjukkan perilaku *shear-thinning* yang lebih baik, sehingga perekat menyebar lebih efektif selama aplikasi dan meningkatkan kekuatan ikatan antar partikel kayu.

Penggunaan pati yang di-*cross-link* sebagai bahan perekat dalam pembuatan papan partikel memberikan beberapa keuntungan dibandingkan perekat berbasis formaldehida atau bahan kimia sintetis lainnya. Pati yang di-*cross-link* ramah lingkungan, tetapi juga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap air, panas, dan tekanan mekanis, yang sangat penting untuk produk papan partikel yang digunakan di lingkungan konstruksi atau furnitur.

Perekat berbasis pati yang di-cross-link memiliki potensi untuk menggantikan perekat sintetis karena sifatnya yang biodegradable dan non-toksik, serta menawarkan kekuatan adhesi yang sama atau lebih tinggi dibandingkan perekat konvensional. Pengembangan perekat berbasis pati dengan modifikasi *cross-linking* dapat membantu mengurangi dampak lingkungan dari industri kayu dan konstruksi, serta menawarkan produk yang lebih aman bagi konsumen.

Modifikasi Kimia Pati Sorgum dengan Kitosan

Modifikasi kimia pati sorgum dengan kitosan dapat dilakukan melalui beberapa metode, seperti *cross-linking* dan oksidasi, yang bertujuan untuk meningkatkan daya rekat dan ketahanan terhadap kelembapan. *Cross-linking* antara pati sorgum dan kitosan menghasilkan perekat yang lebih stabil, karena ikatan antar molekul lebih kuat, sehingga mengurangi kelemahan pati alami dalam kondisi lembap dan meningkatkan ketahanannya terhadap proses pelapukan. Sandhu et al., (2021) menjelaskan bahwa modifikasi pati sorgum melalui *cross-linking* menggunakan agen *sodium trimetaphosphate* (STMP) menghasilkan peningkatan dalam stabilitas termal dan ketahanan terhadap air, yang penting dalam aplikasi industri perekat. Penambahan kitosan meningkatkan kekuatan adhesi perekat dengan memperkuat ikatan hidrogen antara molekul pati dan substrat kayu, yang meningkatkan kekuatan ikatan pada papan partikel.

Sifat hidrofilik alami pati sorgum menyebabkan perekat berbasis pati mudah menyerap air, yang mengurangi kekuatannya dalam kondisi lembap. Modifikasi dengan menambahkan kitosan mengurangi daya serap air perekat karena kitosan mampu membentuk ikatan silang dengan gugus hidroksil pati, yang membatasi penetrasi air. Penelitian oleh Li et al., (2013) menunjukkan bahwa penambahan kitosan pada film komposit pati meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan menurunkan derajat pembengkakan. Modifikasi pati sorgum dengan kitosan menghasilkan peningkatan kekuatan adhesi pada papan partikel. Kitosan, yang bersifat kationik, berinteraksi dengan gugus karboksil pada pati yang teroksidasi, memperkuat ikatan antara perekat dan partikel kayu. Ji et al., (2020) menunjukkan bahwa interaksi elektrostatik antara pati teroksidasi dan kitosan meningkatkan daya rekat perekat, sehingga memudahkan dalam aplikasi. Sementara Sarungallo et al., (2024) menemukan bahwa modifikasi pati

sorgum dengan kitosan menghasilkan perekat yang memiliki stabilitas mekanik lebih tinggi dibandingkan dengan perekat berbasis pati tanpa modifikasi. Modifikasi kimia pati sorgum dengan kitosan dapat meningkatkan kekuatan mekanik, dan memperbaiki sifat reologi perekat, yang mempengaruhi kemampuannya untuk menyebar secara merata pada permukaan kayu. (Hasan et al., 2020) melaporkan bahwa campuran pati dan kitosan menghasilkan viskositas yang lebih rendah. Hal ini yang memudahkan perekat untuk menyebar dan menembus pori-pori kayu selama proses aplikasi papan partikel, sehingga meningkatkan daya rekat antar partikel kayu.

Modifikasi kimia pati sorgum dengan kitosan menghasilkan perekat yang lebih kuat, tahan air, dan stabil secara termal, sehingga sesuai untuk aplikasi dalam pembuatan papan partikel. Perekat berbasis pati-kitosan sebagai alternatif yang ramah lingkungan dan efektif dibandingkan perekat berbasis bahan kimia sintetis. Industri perekat dapat memanfaatkan polimer alami menggunakan teknik modifikasi kimia *cross-linking* dan oksidasi, untuk menghasilkan produk yang lebih berkelanjutan dan aman bagi lingkungan.

5. APLIKASI DAN POTENSI PEREKAT BERBASIS PATI SORGUM DAN KITOSAN

Perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan memiliki potensi aplikasi yang luas di berbagai sektor industri, khususnya dalam industri kayu. Kombinasi antara pati sorgum dan kitosan membentuk film biokomposit yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memiliki sifat mekanis dan termal yang unggul. Penelitian oleh Prasetiyo et al., (2021) menunjukkan bahwa film biokomposit berbasis pati sorgum dan kitosan mampu meningkatkan kekuatan tarik dan stabilitas termal.

Perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan menunjukkan potensi untuk menggantikan perekat sintetis yang selama ini digunakan dalam pembuatan papan partikel, kayu lapis, dan berbagai produk berbasis kayu lainnya. Papan partikel dan kayu lapis yang diproduksi menggunakan perekat alami memiliki kekuatan mekanik yang memadai serta sifat biodegradabilitas dari perekat alami tersebut memungkinkan limbah kayu yang dihasilkan lebih mudah terurai di lingkungan. Dalam jangka panjang, hal ini dapat membantu mengurangi akumulasi limbah industri kayu yang sulit terurai, serta mengurangi emisi zat berbahaya seperti formaldehida yang dihasilkan oleh perekat sintetis (Sarungallo et al., 2024). Keunggulan utama dari perekat berbasis pati sorgum dan kitosan adalah sifat biodegradabilitas dan non-toksiknya, yang menjadikannya alternatif yang lebih aman dibandingkan perekat berbasis bahan kimia sintetis. Dalam era di mana kesadaran akan dampak lingkungan semakin meningkat, penggunaan bahan perekat alami seperti ini menawarkan solusi berkelanjutan yang dapat mengurangi ketergantungan industri pada bahan berbasis minyak bumi yang sulit terurai. Dengan demikian, penerapan perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan di berbagai sektor industri untuk memenuhi kebutuhan fungsional, serta berkontribusi dalam mengurangi jejak karbon dan dampak lingkungan (Ji et al., 2020).

6. KESIMPULAN

Perekat alami berbasis pati sorgum dan kitosan memiliki potensi ekonomi dan ramah lingkungan. Penggunaan bahan baku yang berlimpah dan proses produksi yang lebih sederhana dapat mengurangi biaya produksi serta ketergantungan pada bahan impor. Selain itu, sifat biodegradabilitas dari perekat dapat mengurangi dampak lingkungan yang terkait dengan pembuangan limbah konstruksi. Dengan demikian, pengembangan perekat alami dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

Ai, Y., Medic, J., Jiang, H., Wang, D., and Jane, J. L. (2011). "Starch characterization and ethanol production of sorghum". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *59*(13), 7385–7392. https://doi.org/10.1021/jf2007584

Boudouaia, N., Bengharez, Z., and Jellali, S. (2019). "Preparation and characterization of chitosan extracted from shrimp shells waste and chitosan film: application for Eriochrome black T removal from aqueous solutions". *Applied Water Science*, *9*(4), 1–12. https://doi.org/10.1007/s13201-019-0967-z

Cao, C., Nian, B., Li, Y., Wu, S., and Liu, Y. (2019). "Multiple Hydrogen-Bonding Interactions Enhance the Solubility of Starch in Natural Deep Eutectic Solvents: Molecule and Macroscopic Scale Insights". *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *67*(45), 12366–12373. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04503

Chen, L., Din, Z. ud, Yang, D., Hu, C., Cai, J., and Xiong, H. (2021). "Functional nanoparticle reinforced starch-based adhesive emulsion: Toward robust stability and high bonding performance". *Carbohydrate Polymers*, *269*(118270), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118270

Chen, Y. F., Kaur, L., and Singh, J. (2017). "Chemical Modification of Starch". In *Starch in Food: Structure, Function and Applications*. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100868-3.00007-X

Chi, H., Xu, K., Wu, X., Chen, Q., Xue, D., Song, C., Zhang, W., and Wang, P. (2008). "Effect of acetylation on the properties of corn starch". *Food Chemistry*, *106*(3), 923–928. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.07.002

Confederat, L. G., Tuchilus, C. G., Dragan, M., Sha'at, M., and Dragostin, O. M. (2021). "Preparation and Antimicrobial Activity of Chitosan and Its Derivatives: A Concise Review". *Molecules (Basel, Switzerland)*, *26*(12), 1–17. https://doi.org/10.3390/molecules26123694

Duan, X., Liu, Q., Zhao, R., Liu, W., Zhang, L., and Hu, H. (2024). "Effects of particle properties, intermolecular forces, and molecular structure on the shear-thickening behavior of waxy starch dispersions". *Carbohydrate Polymers*, *334*(122004), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122004

Gadhave, R. V., Sheety, P., Mahanwar, P. A., Gadekar, P. T., and Desai, B. J. (2019). "Silane Modification of Starch-Based Wood Adhesive: Review". *Open Journal of Polymer Chemistry*, *09*(03), 53–62. https://doi.org/10.4236/ojpchem.2019.93005

Giraldo, J. D., and Rivas, B. L. (2021). "Direct ionization and solubility of chitosan in aqueous solutions with acetic acid". *Polymer Bulletin*, *78*(3), 1465–1488. https://doi.org/10.1007/s00289-020-03172-w

Haq, F., Yu, H., Wang, L., Teng, L., Haroon, M., Khan, R. U., Mehmood, S., Bilal-Ul-Amin, Ullah, R. S., Khan, A., and Nazir, A. (2019). "Advances in chemical modifications of starches and their applications". *Carbohydrate Research*, *476*, 12–35. https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.02.007

Hasan, M., Gopakumar, D. A., Olaiya, N. G., Zarlaida, F., Alfian, A., Aprinasari, C., Alfatah, T., Rizal, S., and Khalil, H. P. S. A. (2020). "Evaluation of the thermomechanical properties and biodegradation of brown rice starch-based chitosan biodegradable composite films". *International Journal of Biological Macromolecules*, *156*, 896–905. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.039

Htet, M. N. S., Wang, H., Tian, L., Yadav, V., Samoon, H. A., and Feng, B. (2022). "Integrated Starches and Physicochemical Characterization of Sorghum Cultivars for an Efficient and Sustainable Intercropping Model". *Plants*, *11*(12), 1–14. https://doi.org/10.3390/plants11121574

Ishaq, M. I., Lestari, E. G., Qonit, M. A., Susilawati, P. N., Widarsih, W., Syukur, C., Herawati, H., Arief, R., Santoso, B., Purba, R., Andoyo, R., Yurzak, Z., Tan, S. S., Musfal, M., Mubarok, S., and Haziman, M. L. (2024). "Sorghum starch review: Structural properties, interactions with proteins and polyphenols, and modification of physicochemical properties". *Food Chemistry*, *463*(P1 139810), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139810

Ji, Y., Lin, X., and Yu, J. (2020). Preparation and characterization of oxidized starch-chitosan complexes for adsorption of procyanidins". *Lwt*, *117*, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108610

Kristak, L., Antov, P., Bekhta, P., Lubis, M. A. R., Iswanto, A. H., Reh, R., Sedliacik, J., Savov, V., Taghiyari, H. R., Papadopoulos, A. N., Pizzi, A., and Hejna, A. (2023). "Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review". *Wood Material Science and Engineering*, *18*(2), 763–782. https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080

Li, H., Gao, X., Wang, Y., Zhang, X., and Tong, Z. (2013). "Comparison of chitosan/starch composite film properties before and after cross-linking". *International Journal of Biological Macromolecules*, *52*(1), 275–279. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.10.016

Li, J., Yu, X., Martinez, E. E., Zhu, J., Wang, T., Shi, S., Shin, S. R., Hassan, S., and Guo, C. (2022). "Emerging Biopolymer-Based Bioadhesives". *Macromolecular Bioscience*, *22*(2), 1–18. https://doi.org/10.1002/mabi.202100340

Liu, M., Yao, W., Zheng, H., Zhao, H., Shao, R., Tan, H., and Zhang, Y. (2023). "Preparation of a high-strength, hydrophobic performance starch-based adhesive with oxidative cross-linking via Fenton's reagent". *International Journal of Biological Macromolecules*, *253*(P5), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126995

Masina, N., Choonara, Y. E., Kumar, P., du Toit, L. C., Govender, M., Indermun, S., and Pillay, V. (2017). "A review of the chemical modification techniques of starch". *Carbohydrate Polymers*, *157*, 1226–1236.

https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.094
Matica, M. A., Aachmann, F. L., Tøndervik, A., Sletta, H., and Ostafe, V. (2019). "Chitosan as a wound dressing starting material: Antimicrobial properties and mode of action". *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(23), 1–33. https://doi.org/10.3390/ijms20235889
Maulana, M. I., Lubis, M. A. R., Febrianto, F., Hua, L. S., Iswanto, A. H., Antov, P., Kristak, L., Mardawati, E., Sari, R. K., Zaini, L. H., Hidayat, W., Lo Giudice, V., and Todaro, L. (2022). "Environmentally Friendly Starch-Based Adhesives for Bonding High-Performance Wood Composites: A Review". *Forests*, *13*(10), 1–24. https://doi.org/10.3390/f13101614
Meng, L., Li, S., Yang, W., Simons, R., Yu, L., Liu, H., and Chen, L. (2019). "Improvement of Interfacial Interaction between Hydrophilic Starch Film and Hydrophobic Biodegradable Coating". *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *7*(10), 9506–9514. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b00909
Mulaudzi, T., Nkuna, M., Sias, G., Doumbia, I. Z., Njomo, N., and Iwuoha, E. (2022). "Antioxidant Capacity of Chitosan on Sorghum Plants under Salinity Stress". *Agriculture (Switzerland)*, *12*(10), 1–20. https://doi.org/10.3390/agriculture12101544
Ningsi, D. W., Suhasman, and Saad, S. (2019). "Characteristic of Chitosan Adhesive from Shell Shrimp Litopenaeus vannamei and Their Application for Producing Particleboard". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *593*(1), 1–11. https://doi.org/10.1088/1757-899X/593/1/012015
Ojogbo, E., Ogunsona, E. O., and Mekonnen, T. H. (2020). "Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials". *Materials Today Sustainability*, *7–8*, 1–25. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100028
Palacios, C. E., Nagai, A., Torres, P., Rodrigues, J. A., and Salatino, A. (2021). "Contents of tannins of cultivars of sorghum cultivated in Brazil, as determined by four quantification methods. *Food Chemistry*, *337*(127970), 1–6. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127970
Peidayesh, H., Heydari, A., Mosnáčková, K., and Chodák, I. (2021). "In situ dual crosslinking strategy to improve the physico-chemical properties of thermoplastic starch". *Carbohydrate Polymers*, *269*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118250
Peiris, K. H. S., Wu, X., Bean, S. R., Perez-Fajardo, M., Hayes, C., Yerka, M. K., Krishna Jagadish, S. V., Ostmeyer, T., Aramouni, F. M., Tesso, T., Perumal, R., Rooney, W. L., Kent, M. A., and Bean, B. (2021). "Near infrared spectroscopic evaluation of starch properties of diverse sorghum populations". *Processes*, *9*(11), 1–15. https://doi.org/10.3390/pr9111942
Poleto, S. F. S., de Moura Aquino, V. B., Chahud, E., Pinheiro, R. V., Nunes Branco, L. A. M., Silva, D. A. L., de Campos, C. I., Molina, J. C., de Carvalho, C. M., Christoforo, A. L., and Lahr, F. A. R. (2020). "Evaluation of CCB-preserved medium density particleboards under natural weathering". *BioResources*, *15*(2), 3678–3687. https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3678-3687
Prasetiyo, K. W., Syamani, F. A., Amalia, Y. R., Ermawati, R., Fatimah, D., Mailisa, T., Amalia, B., Karima, R., Solikhin, A., Kusumah, S. S., Masruchin, N., Munawar, S. S., Marlina, R., and Subyakto. (2021). "Cassava starch-chitosan-sorghum micro-fibrillated cellulose biocomposite wrapping film to prevent COVID-19 outspread". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *914*(1), 1–12. https://doi.org/10.1088/1755-1315/914/1/012075
Sandhu, K. S., Siroha, A. K., Punia, S., Sangwan, L., Nehra, M., and Purewal, S. S. (2021). "Effect of degree of cross linking on physicochemical, rheological and morphological properties of Sorghum starch. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *2*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100073
Sarungallo, R. S., Tjaronge, M. W., Ahmad, A., and Hustim, M. (2024). "Adjustment of temperature and starch concentration in the NaOH hydrolysis process for the development of sustainable adhesives from sorghum starch". *AIP Conference Proceedings*, *3140*(1), 2–8. https://doi.org/10.1063/5.0221170
Shaikh, F., Ali, T. M., Mustafa, G., and Hasnain, A. (2019). "Comparative study on effects of citric and lactic acid treatment on morphological, functional, resistant starch fraction and glycemic index of corn and sorghum starches". *135*, 314–327.
Shen, Y., Yao, Y., Wang, Z., and Wu, H. (2021). "Hydroxypropylation reduces gelatinization temperature of corn starch for textile sizing. *Cellulose*, *28*(8), 5123–5134. https://doi.org/10.1007/s10570-021-03852-4
Siebert, H. M., and Wilker, J. J. (2019). "Deriving commercial level adhesive performance from a bio-based mussel mimetic Polymer". *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *7*(15), 13315–13323. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02547
Sira, E. E. P., and Amaiz, M. L. (2004). "A laboratory scale method for isolation of starch from pigmented sorghum. *Journal of Food Engineering*, *64*(4), 515–519. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.11.019
Solt, P., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Kantner, W., Moser, J., Mitter, R., and van Herwijnen, H. W. G. (2019). "Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *94*, 99–131. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.007
Torres, F. G., and De-la-Torre, G. E. (2022). "Synthesis, characteristics, and applications of modified starch nanoparticles: A review". *International Journal of Biological Macromolecules*, *194*, 289–305. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.187

Triveni Soubam, and Arun Gupta. (2021). “Eco-friendly natural rubber latex and modified starch-based adhesive for wood-based panels application- A review”. *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication*, *3*(1), 49–53. https://doi.org/10.54279/mijeec.v3i1.245163

Uemura Silva, V., Nascimento, M. F., Resende Oliveira, P., Panzera, T. H., Rezende, M. O., Silva, D. A. L., Borges de Moura Aquino, V., Rocco Lahr, F. A., and Christoforo, A. L. (2021). “Circular vs. linear economy of building materials: A case study for particleboards made of recycled wood and biopolymer vs. conventional particleboards”. *Construction and Building Materials*, *285*, 122906. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122906

Vineeth, S. K., and Gadhave, R. V. (2020). “Sustainable Raw Materials in Hot Melt Adhesives: A Review”. *Open Journal of Polymer Chemistry*, *10*, 49–65. https://doi.org/10.4236/ojpchem.2020.103003

Wang, N., Li, C., Miao, D., Hou, H., Dai, Y., Zhang, Y., and Wang, B. (2023). “The effect of non-thermal physical modification on the structure, properties and chemical activity of starch: A review”. *International Journal of Biological Macromolecules*, *251*, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126200

Wang, R., Li, M., Liu, J., Wang, F., Wang, J., and Zhou, Z. (2021). “Dual modification manipulates rice starch characteristics following debranching and propionate esterification”. *Food Hydrocolloids*, *119*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106833

Wang, X., Huang, L., Zhang, C., Deng, Y., Xie, P., Liu, L., and Cheng, J. (2020). “Research advances in chemical modifications of starch for hydrophobicity and its applications: A review”. *Carbohydrate Polymers*, *240*(16), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116292

Wang, Z., Mhaske, P., Farahnaky, A., Kasapis, S., and Majzoobi, M. (2022). “Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, a review”. *Food Hydrocolloids*, *129*, 1–19. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107542

Yan, S., Li, Z., Wang, B., Li, T., Li, Z., Zhang, N., and Cui, B. (2023). “Correlation analysis on physicochemical and structural properties of sorghum starch”. *Frontiers in Nutrition*, *9*(1101868), 1–16. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1101868

Yu, H., Xia, Y., Liu, X., Chen, H., Jin, Z., Wang, Z., and Wang, S. (2024). “Preparation of self-assembled modified reed fiber reinforced starch-based adhesive and the study of cross-linking mechanism”. *Industrial Crops and Products*, *211*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118204

Yun, L., Liu, C., Li, K., Deng, L., and Li, J. (2021). Structure and properties of corn starch synthesized by using sulfobetaine and deoxycholic acid”. *International Journal of Biological Macromolecules*, *183*, 1293–1301. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.078

Zhang, Y., Zhang, J., Chen, M., Luo, J., Shi, S. Q., Gao, Q., and Li, J. (2019). “A tough, water-resistant, high bond strength adhesive derived from soybean meal and flexible hyper-branched aminated starch”. *Polymers*, *11*(8), 1–13. https://doi.org/10.3390/polym11081352

Zhu, F. (2014). “Structure, physicochemical properties, modifications, and uses of sorghum starch. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *13*(4), 597–610. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12070

Zuo, Y. feng, Gu, J., Qiao, Z., Tan, H., Cao, J., and Zhang, Y. (2015). “Effects of dry method esterification of starch on the degradation characteristics of starch/polylactic acid composites”. *International Journal of Biological Macromolecules*, *72*, 391–402. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.08.038

Analisa Dampak Perubahan Produksi Minimum Tenaga Kerja dan Peralatan Terhadap Waktu penyelesaian Item Pekerjaan, Biaya dan Keuntungan.

(Studi Kasus: Data Rencana Anggaran Biaya Proyek Peningkatan Jalan Tetaf - SP. Niki-niki Tahun 2023)

Yuventus Krisanto Korbaffo, Ir Laurensius Lulu, MM, Stephanus Ola Demon, ST., MT, Paulus Sianto, ST., MT, Gregotius P. Usboko, ST., MT

Civil Engineering, Widya Mandira Catholic University, Kupang
***e-mail**: krisantokorbaffo@gmail.com*

ABSTRAK

Produksi minimum adalah kemampuan produksi terkecil dari kelompok tenaga kerja maupun peralatan yang bekerja bersama-sama dalam menyelesaikan pekerjaan dalam satu satuan waktu (jam/hari). Jika produksi minimum terjadi pada tenaga kerja maka peralatan menganggur, sebaliknya jika produksi minimum terjadi pada alat maka tenaga kerja menganggur. Dari hasil produksi minimum, bisa ditentukan besarnya waktu penyelesaian dengan cara volume item pekerjaan yang bersangkutan dibagi dengan produksi minimumnya. Apabila produksi minimum rendah, maka koefisien menjadi besar, hal tersebut mengakibatkan waktu penyelesaian waktu bertambah, biaya proyek menjadi besar dan keuntungan menjadi rendah. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data sekunder yang diambil dari CV. PUBAGOT JAYA ABADI yaitu data Rencana Anggaran Biaya (RAB) proyek peningkatan jalan Tetaf, SP Niki-niki, TTS tahun 2023. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak dari perubahan produksi minimum dari sumber daya tenaga kerja dan peralatan terhadap waktu penyelesaian item pekerjaan, biaya dan keuntungan. Perubahan produksi minimum mengunakan simulasi perubahan produksi minimum -20% sampai +20% dengan interval 4%. Hasil analaisa mengenaik tujuan dari penelitian ini adalah waktu penyelesaian item pekerjaan pada item pekerjaan lapis resap aspal cair/emulsi pada produksi minimum tenaga kerja dan peralatan pada kondisi -20% menjadi 9,90 hari, kemudian pada kondisi 0% menjadi 7,92 hari, kemudian meningkat +20% maka waktu penyelesaian menjadi 6,60 hari. Untuk biaya proyek normalnya sebesar Rp. 35.009.357.405,01 kemudian ketika mengunakan produksi minimum tenaga kerja dan peralatan pada kondisi 0% biaya proyek menjadi Rp. 42.242.743.833,33, kemudian ketika produksi minimum disimulasi menurun pada kondisi -20% biaya proyek menjadi Rp. 45.511.261.687,82, ketika dilakukan simulasi kenaikan produksi minimum +20% maka biaya proyek menjadi Rp. 40.172.121.585,54. Selanjutnya untuk keuntungan atau kerugian, untuk keuntungan normalnya sebesar Rp. 3.477.129.081,48, keutungan atau kerugian yang didapat tergantung pada perubahan biaya proyek akibat produksi minimum dan simulasi perubahan produksi minimum, ketika produksi minimum tenaga kerja dan peralatan pada kondisi 0% terjadi kerugian sebesar Rp. -3.756.257.346,84 dikarenakan biaya proyek yang meningkat akibat produksi minimum, kemudian pada kondisi -20% kerugian menjadi Rp. -7.024.775.201,34, selanjutnya pada kondisi +20% kerugian berkurang menjadi Rp. -1.685.635.099,05.

Kata kunci: Produksi Minimum, Waktu Penyelesaian, Biaya, Keuntungan.

ABSTRACT

Minimum production is the smallest production capacity of a group of workers or equipment that works together to complete work in one unit of time (hours/day). If the minimum production occurs in the labor then the equipment is idle, on the other hand if the minimum production occurs in the equipment then the labor is idle. From the minimum production result, the amount of completion time can be determined by dividing the volume of the work item in question by the minimum production. If the minimum production is low, then the coefficient becomes large, which results in an increase in completion time, large project costs and low profits. In this study, the data used is secondary data taken from CV. PUBAGOT JAYA ABADI is data on the Cost Budget Plan for the Tetaf, SP Niki-niki, TTS road improvement project in 2023. This study aims to determine the impact of the change in minimum production of labor resources and equipment on the completion time of work items, costs and profits. The minimum production change uses a simulation of the minimum production change of -20% to +20% at 4% intervals. The results of the analysis raised the objective of this study is the completion time of work items in the work items of liquid asphalt/emulsion layer work on the minimum production of labor and equipment at -20% to 9.90 days, then at 0% to 7.92 days, then increase by +20% then the completion time is 6.60 days. For the normal project cost of Rp. 35,009,357,405.01 then when using the minimum production of labor and equipment at 0% of the project cost becomes Rp. 42,242,743,833.33, then when the

minimum production is simulated to decrease at -20% of the project cost to Rp. 45,511,261,687.82, when a simulation of a minimum production increase of +20% is carried out, the project cost becomes Rp. 40,172,121,585.54. Furthermore, for profit or loss, for the normal profit of Rp. 3,477,129,081.48, the totality or loss obtained depends on the change in project costs due to the minimum production and the simulation of the minimum production change, when the minimum production of labor and equipment at 0% conditions occurs a loss of Rp. -3,756,257,346.84, due to the increased project cost due to minimum production, then in the condition of -20% loss to Rp. -7,024,775,201.34, then in the condition of +20% the loss is reduced to Rp. -1,685,635,099.05.

1. PENDAHULUAN

Proyek merupakan suatu kegiatan atau kejadian yang saling berkaitan, dimulai dari perencanaan, pengorganisasian, pendorongan dan pengendalian yang dilakukan untuk mencapai tujuan-tujuan dan membuahkan hasil dalam suatu jangka waktu yang telah ditetapkan (Kerzner 1982). Suatu proyek dianggap sukses jika mencapai suatu tujuan yang dinginkan dengan sumber daya yang tersedia dan dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin (Aniza 2019). Berkaitan dengan hal ini maka ketetapan waktu penyelesaian dan biaya proyek merupakan salah satu tujuan yang penting baik bagi pemilik proyek maupun kontraktor.

Dalam pelaksanaan konstruksi, tenaga kerja dan alat tidak bekerja secara individu, namun mereka bekerja secara berkelompok untuk menyelesaikan suatu pekerjaan secara bersama-sama. Pengertian bekerja bersama-sama adalah bahwa didalam waktu yang sama, mereka menghasilkan pekerjaan dengan jumlah (produksi) yang sama (Lulu, 2003). Namun sesungguhnya, produksi masing-masing (tenaga kerja dan alat) secara individu berbeda.

Jika produksi yang dihasilkan oleh tenaga kerja dan alat berbeda, maka besarnya produksi yang paling mungkin dilakukan secara bersama-sama adalah produksi yang paling kecil (minimum). Produksi minimum adalah kemampuan produksi terkecil dari kelompok tenaga kerja maupun peralatan yang bekerja bersama-sama dalam menyelesaikan pekerjaan dalam satu satuan waktu (jam/hari). Jika produksi minimum terjadi pada tenaga kerja maka peralatan menganggur, sebaliknya jika produksi minimum terjadi pada alat maka tenaga kerja menganggur.

Dari hasil produksi minimum, bisa ditentukan besarnya waktu penyelesaian dengan cara volume item pekerjaan yang bersangkutan dibagi dengan produksi minimumnya. Apabila produksi minimum rendah, maka koefisien menjadi besar, hal tersebut mengakibatkan waktu penyelesaian waktu bertambah, biaya proyek menjadi besar dan keuntungan menjadi rendah. Oleh sebab itu, produksi tenaga kerja dan alat perlu dicermati secara cepat dan tepat agar pelaksanaan konstruksi dapat dilakukan secara efektif dan efisien.

Jika produksi meningkat maka koefisien menjadi lebih kecil, analisa harga satuan menjadi lebih rendah, waktu penyelesaian semakin cepat, biaya proyek menjadi kecil dan keuntungan proyek bertambah. Sebaliknya jika produksi menurun maka koefisien akan menjadi lebih besar, analisa harga satuan menjadi lebih besar, waktu penyelesaian semakin lama, biaya proyek semakin meningkat dan keuntungan proyek berkurang. Pada penelitian ini data yang digunakan adalah data sekunder yang diambil dari CV. PUBAGOT JAYA ABADI yaitu data Rencana Anggaran Biaya (RAB) pada proyek peningkatan jalan Tetaf, SP Niki-niki, TTS tahun 2023.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Jumlah Tenaga Kerja

Jumlah tenaga kerja adalah banyaknya tenaga kerja yang bekerja dalam suatu item pekerjaan, yang merupakan perbandingan angka koefisien masing-masing tenaga kerja. Jumlah tenaga kerja dapay dihitung menggunakan persamaan berikut:

Jtk = Ktk/Kmn

Dimana :

Ktk : Koefisien Tenaga Kerja (Jam,hari)
Jtk : Jumlah Tenaga Kerja (Orang)
Kmn : Koefisien Mandor (Jam,hari)

Produksi Tenaga Kerja

Produksi tenaga kerja adalah banyaknya pekerjaan yang dapat diselesaikan oleh tenaga kerja dalam satu satuan waktu tertentu. Hal yang perlu diketahui untuk menentukan produksi tenaga kerja adalah jumlah tenaga kerja dan kuantitasnya. Rumus produksi tenaga kerja perjam adalah sebagai berikut:

Qtk(1/Ktk) x Jtk
Untuk produksi tenaga kerja perhari adalah:
Qtk(1/Ktk) x Jtk x Jef
Dimana:
Qtk : Produksi tenaga kerja (m3/jam,m2/jam)
Ktk : Koefisien tenaga kerja (jam,hari)
Jtk : Jumlah tenaga kerja (jam,hari)
Jef : Jam kerja efektif (jam)

Produksi Peralatan

Produksi alat adalah banyaknya pekerjaan yang dapat diselesaikan alat dalam satu satuan waktu tertentu. Pada kontrak-kontrak proyek yang mempunyai Analisa harga satuan item pekerjaan, maka estimasi produksi alat dapat didasarkan pada kuantitas (koefisien) alat yang ada dalam Analisa harga satuan untuk pekerjaan tersebut. Persamaan untuk mengitung produksi peralatan apabila koefisienya telah diketahui dari data Rencaba Anggarann Biaya (RAB) adalah sebagai berikut:
Qa = 1/Ka
Untuk persamaan produksi peralatan perhari adalah:
Qa = 1/Ka x Jef
Diaman:
Qa : Produksi alat (m2/jam, m3/jam, m2/hari, m3/hari)
Ka : Koefisien alat (jam, hari)
Jef : Jam kerja efektif (jam)

Produksi Minimum

Produksi minimum adalah produksi paling kecil yang dihasilkan antara alat dan tenaga kerja yang bekerja bersama-sama dalam menyelesaikan satu satuan item pekerjaan. Produksi minimum merupakan produksi yang paling mungkin dicapai untuk menyelesaikan item pekerjaan. Semakin besar produksi minimum yang dicapai setiap hari pada item pekerjaan, semakin kecil biaya yang dikeluarkan dan waktu yang dibutuhkan dan waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan item pekerjaan tersebut. Sebaliknya, semakin kecil produksi minimum yang dicapai, maka biaya yang dikeluarkan semakin besar dan waktu penyelesaian pun semakin bertambah. Penurunan produksi minimum dapat dapat dihitung mengunakan persamaan berikut:
Q’ = Qmin x (1-i%)
Untuk kenaikan produksi minimum dapat mengunakan persamaan berikut:
Q’ = Qmin x (1+i%)
Dimana:
Q’ : Perubahan produksi minimum variasi (m2/hari, m3/hari)
Qmin : Produksi normal (m2/hari, m3/hari)
i% : Presentase perubahan variasi

Waktu Penyelesaian

Waktu penyelesaian adalah jumlah waktu yang dibutuhkan dalam menyelesaikan satu satuan pekerjaan atau waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan volume satu item pekerjaan. Waktu penyelesaian tiap-tiap item pekerjaan sangat ditentukan oleh kemampuan produksi minimum dari tenaga kerja dan alat, dan volume pekerjaanya. Waktu penyelesaian dapat dirumuskan seperti dibawah ini:
W = V/Qmin
Dimana:
W : Waktu Penyelesaian
V : Volume item pekerjaan (m3, m2, m)
Qmin : Produksi minimum (perhari, perjam)

Koefisien atau Kuantitas Item Pekerjaan

Koefisien yang sering juga disebut kuantitas pekerjaan ini merupakan banyaknya sumber daya yang digunakan untuk menyelesaikan satu satuan item pekerjaan. Agar terukur, maka kuantitas atau koefisien ini harus mempunyai satuan. Persamaan untuk mengitung koefisien tenaga kerja dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:
Ktk = 1/Qtk x Jt
Dimana:
Ktk : Koefisien tenaga kerja (jam, hari)
Qtk : Produksi tenaga kerja (m2/hari, m3/hari)
Jtk : Jumlah tenaga kerja (orang)

Untuk mengitung koefisien peralatan dapat menggunakan persamaan dibawh ini:
Kp = 1/Qa
Dimana:
Kp: : Koefisienn peralatan (jam)
Qa : Produksi alat (m2/jam, m3/jam)

Analisa Harga Satuan

Analisa harga satuan item pekerjaan adalah perhitungan detail dari penggunaan sumber daya yaitu tenaga kerja, material, peralatan, dan uang untuk dapat menyelesaikan satu satuan item pekerjaan. Analisa harga satuan ini merupakan penjumlahan dari semua biaya sumber daya pada setiap item pekerjaan, dan dihitung dengan rumus sebagai berikut:
Ai = Ti + Mi + Pi
Dimana:
Ai : Analisa harga satuan item pekerjaan ke-i
Ti : Biaya tenaga kerja Analisa harga satuan item pekerjaan ke-i
Mi :Biaya material Analisa harga satuan item pekerjaan ke-i
Pi :Biaya peralatan Analisa harga satuan item pekerjaan ke-i

Biaya Item Pekerjaan

Biaya item pekerjaan adalah biaya yang digunakan untuk menyelesaikan masing masing item pekerjaan. Untuk perubahan biaya item peekrjaan akibat perubahan produksi dapat ditentukan dengan persamaan berikut:
Xi' : Vi x Ai
Dimana:
Xi' : Perubahan biaya item pekerjaan
Vi : Kuantitas/volume item pekerjaan
Ai' : Perubahan Analisa harga satua

Biaya Proyek

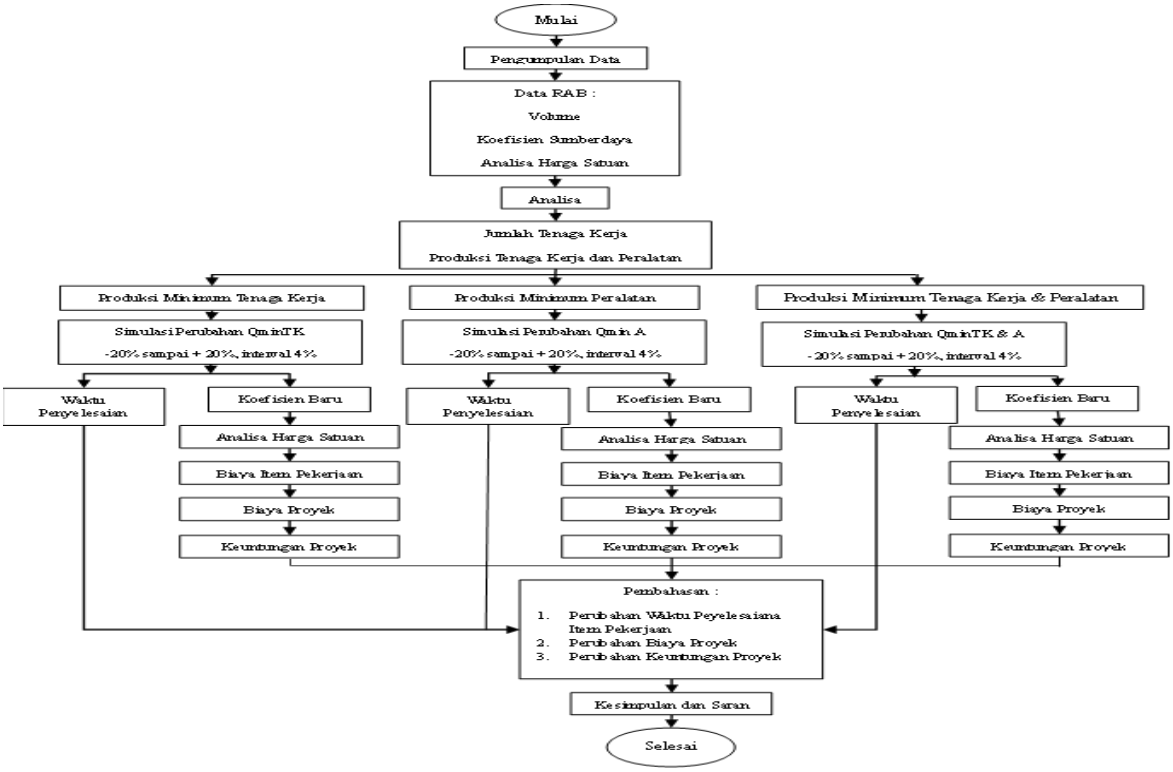
Biaya proyek ini diperoleh dari hasil penjumlahan biaya seluruh item pekerjaan. Biaya tiap item pekerjaan ini diperoleh dari perkalian antara volume dan Analisa harga item pekerjaan yang terdiri dari tenaga kerja, material, dan peralatan. Persamaan yang digunakan dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:
BP = Σ Xi x + O + Tax
Dimana:
BP : Biaya Proyek
Σ Xi : Jumlah biaya item pekerjaan
O : Fee dan Overhead
Tax : Pajak

Keuntungan

Laba atau keuntungan adalah selisih antara pendapatan atau pengeluaran dari suatu kegiatan atau proyek yang dikerjakan dan merupakan hasil bagi dari sepuluh per seratus dikalikan dengan biaya proyek. Persamaan yang digunakan dapat dibawah ini:
L = 10/100 x BP
Dimana:
L : Keuntungan/laba
BP : Biaya Proyek
Perubahan keuntungan proyek terjadi karena adanya perubahan biaya proyek akibat perubahan produksi. Keuntungan proyek akibat perubahan produksi ini dapat dihitung mengunakan persamaan berikut:
L' = L + (BP – BP')
Dimana:
L : Keuntungan awal proyek
L' : Keuntungan proyek akibat perubahan produksi
BP : Biaya proyek awal
BP' : Biaya proyek akibat perubahan produksi

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perubahan waktu penyelesaian item pekerjaan, biaya serta keuntungan yang disebabkan oleh adanya perubahan produksi pada item-item pekerjaan. Adapun rancangan penelitian ini yang diuraikan alur penulisanya mulai dari obyek penelitian, bentuk data, pengelolaan data, sampai dengan analisis data untuk memperoleh hasil simpulan dan saran.



Gambar 1 Bagan Alir
Sumber: Sketsa Penulis, 2024

1. Mulai

   Penelitian ini dilakuakn pada proyek peningkatan jalan Tetaf – SP, Niki-niki tahun anggran 2023. Loaksi pekerjaan berada di Kecamatan Kuatnana, kabupaten Timor Tengah Selatan, Provinsi Nusa Tenggara Timur dengan biaya anggaran sebesar Rp. 42.720.000.000,00 berdasarkan nomor kontrak HK.02.03/Bb.10.6.1/525.

2. Pengumpulan data

   Data yang diperlukan yaitu data yang diambil dalam Rencana Anggarab Biaya (RAB) yaitu Volume pekerjaan, Koefisien sumber daya tenaga kerja material dan peralatan, Analisa harga satuan.

3. Analisa Data dan Pembahasan

   Dalam analisa data ini penulis akan menghitung produksi minimum dari tenaga kerja, peralatan, dan tenaga kerja dan peralatan dari data RAB yang didapat kemudian melakukan simulasi perubahan produksi minimum tenaga kerja, peralatan, dan tenaga kerja dan peralatan dengan simulasi perubahan -20% sampai +20% dengan interval 4%. Dari hasil simulasi produksi minimum yang didapat selanjutnya menghitung waktu penyelesaian, biaya, dan keuntungan yang baru akibat perubahan simulasi produksi minimum tersebut.

4. Kesimpulan dan Saran

   Pada tahap ini akan dibahas berapa persentase pengaruh perubahan produksi minimum terhadap waktu penyelesaian item pekerjaan, biaya proyek, dan keuntungan.

5. Selesai

4. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Jumlah Tenaga Kerja

Jumlah tenaga kerja dihitung bedasarkan perbandingan koefisien tenaga kerja dimana koefisien tenaga kerja yang bersangkutan dibagi dengan koefisien tenaga kerja paling kecil. Koefisien tenaga kerja paling kecil biasanya pada koefisien mandor. perhitungan jumlah tenaga kerja pada item pekerjaan pasangan batu dan mortar. Jumlah tenaga kerja yang lainya dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini :

Tabel 1. Jumlah Tenaga Kerja

No	Item Pekerjaan	Satuan	Volume	Koefisien	Kebutuhan Sumber Daya Total
1	2	3	4	5	6
DEVISI 2. DRAINASE					
1	Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air	M3	3.230,70		
	Pekerja	jam		0,1606	6,00
	Mandor	jam		0,0268	1,00
2	Pasangan Batu dengan Mortar	M3	1.638,33		
	Pekerja	jam		2,4000	12,00
	Tukang Batu	jam		2,4000	12,00
	Mandor	jam		0,2000	1,00
3	Gorong-gorong Kotak Beton Bertulang, ukuran dalam 100 cm x 100 cm	M1	20,00		
	Pekerja	jam		0,2869	10,00
	Tukang	jam		0,1721	6,00
	Mandor	jam		0,0287	1,00
DEVISI 3. PEKERJAAN TANAH DAN GEOSINTETIK					
4	Galian Biasa	M3	4.221,20		
	Pekerja	jam		0,0360	2,00
	Mandor	jam		0,0180	1,00
5	Timbunan Pilihan dari sumber galian	M3	30.137,87		
	Pekerja	jam		0,0159	3,98
	Mandor	jam		0,0040	1,00
6	Penyiapan Badan Jalan	M2	97.200,00		
	Pekerja	jam		0,0070	3,00
	Mandor	jam		0,0023	1,00
DIVISI 4. PEKERJAAN PREVENTIF					
	-	-	-	-	-
DIVISI 5. PERKERASAN BERBUTIR					
7	Lapis Pondasi Agregat Kelas A	M3	16.560,00		
	Pekerja	jam		0,0779	8,00
	Mandor	jam		0,0097	1,00
DIVISI 6. PERKERASAN ASPAL					
8	Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi	Liter	55.200,00		
	Pekerja	jam		0,0022	3,00
	Mandor	jam		0,0007	1,00
9	Lataston Lapis Aus (HRS-WC)	Ton	6.348,00		
	Pekerja	jam		0,4016	10,00
	Mandor	jam		0,0402	1,00
DIVISI 7. STRUKTUR					
10	Beton Mutu, fc' 20 MPa (K.250)	M3	25,20		
	Pekerja	jam		4,8193	12,00
	Tukang	jam		2,4096	6,00
	Mandor	jam		0,4016	1,00
11	Beton , fc'15 Mpa	M3	4.144,50		
	Pekerja	jam		1,6064	8,00
	Tukang	jam		2,4096	12,00
	Mandor	jam		0,2008	1,00
12	Baja Tulangan Polos BjTP 280	Kg	3.024,00		
	Pekerja Biasa	jam		0,1050	3,00
	Tukang	jam		0,0350	1,00
	Mandor	jam		0,0350	1,00
13	Pasangan Batu	M3	2.250,39		
	Pekerja	jam		1,9277	8,00
	Tukang	jam		0,4819	2,00
	Mandor	jam		0,2410	1,00
DIVISI 8. REHABILITASI JEMBATAN					
	-	-	-	-	-
DIVISI 9. PEKERJAAN HARIAN & PEKERJAAN LAIN-LAIN					
14	Marka Jalan Termoplastik	M2	810,00		
	Pekerja Biasa	jam		0,6000	8,00
	Tukang	jam		0,0750	1,00
	Mandor	jam		0,0750	1,00
15	Patok Pengarah	Buah	500,00		
	Pekerja	jam		0,7434	15,00
	Tukang	jam		0,0991	2,00
	Mandor	jam		0,0496	1,00
16	Patok Kilometer	Buah	19,00		
	Pekerja Biasa	jam		0,3567	5,00
	Tukang	jam		0,1427	2,00
	Mandor	jam		0,0713	1,00
17	Rel Pengaman	M2	19,00		
	Pekerja Biasa	jam		1,3484	8,00
	Tukang	jam		0,3371	2,00
	Mandor	jam		0,1686	1,00
DIVISI 10. PEKERJAAN PEMELIHARAAN KINERJA					
	-	-	-	-	-

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Dari tabel 1 jumlah tenaga kerja diatas selanjutnya dihitung produski yang dihasilkan.

Produksi

Produksi tenaga kerja diperoleh dari satu dibagi dengan koefisien tenaga kerja dan dikalaikan dengan jumlah tenaga kerja. Produksi harian tenaga kerja adalah hasil produksi tenaga kerja per jam dikalikan dengan jam kerja efektif perhari yaitu 7 jam. Untuk produksi peralatan perlu diketahui koefisien karena produksi alat merupakan satu dibagi dengann koefisien alat tersebut. Koefisien yang digunakan diperoleh dari data rencana anggaran biaya yang ada. Untuk hadil perhitungan produksi tenaga kerja dan peralatan dapat dilihat pada tabel dibawah ini

Tabel 2. Produksi Tenaga Kerja dan Peralatan

No	Item Pekerjaan	Satuan	Produksi Unit/Jam	Produksi Unit/Hari
1	2	3	7	8
DEVISI 2. DRAINASE				
1	Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	37,35	261,45
	Mandor	jam	37,35	261,45
	Peralatan			
	Mini evcavator 40-60 HP	jam	37,35	261,45
	Dump truck 3 - 4 M3	jam	10,60	74,23
2	Pasangan Batu dengan Mortar	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	5,00	35,00
	Tukang Batu	jam	5,00	35,00
	Mandor	jam	5,00	35,00
	Peralatan			
	Conc. Mixer	jam	5,00	35,00
3	Gorong-gorong Kotak Beton Bertulang, ukuran dalam 100 cm	M1		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	34,86	244,02
	Tukang	jam	34,86	244,02
	Mandor	jam	34,86	244,02
	Peralatan			
	Tamper	jam	0,26	1,82
	Flat Bed Truck	jam	34,86	244,02
DEVISI 3. PEKERJAAN TANAH DAN GEOSINTETIK				
4	Galian Biasa	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	55,58	389,04
	Mandor	jam	55,58	389,04
	Peralatan			
	Excavator 80-140 HP	jam	55,58	389,04
	Dump truck 3 - 4 M3	jam	9,71	67,94
5	Timbunan Pilihan dari sumber galian	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	250,00	1.750,00
	Mandor	jam	250,00	1.750,00
	Peralatan			
	Wheel Loader	jam	117,65	823,53
	Dump truck 6-8 M3	jam	5,62	39,37
	Motor Grader	jam	250,00	1.750,00
	Tandem Roller 6-8 T.	jam	89,29	625,00
	Water Tanker	jam	29,33	205,28
6	Penyiapan Badan Jalan	M2		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	428,11	2.996,74
	Mandor	jam	428,11	2.996,74
	Peralatan			
	Motor Grader >100 HP	jam	428,11	2.996,74
	Tandem Roller 6-8 T.	jam	30,71	214,97
DIVISI 4. PEKERJAAN PREVENTIF				
	-	-	-	-
DIVISI 5. PERKERASAN BERBUTIR				
7	Lapis Pondasi Agregat Kelas A	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	102,70	718,89
	Mandor	jam	102,70	718,89
	Peralatan			
	Wheel Loader	jam	103,47	724,31
	Dump truck 6-8 M3	jam	19,81	138,67
	Motor Grader	jam	1.044,71	7.312,94
	Vibratory Roller 5-8 T.	jam	102,70	718,89
DIVISI 6. PERKERASAN ASPAL				
8	Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi	Liter		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	1.365,35	9.557,45
	Mandor	jam	1.365,35	9.557,45
	Peralatan			
	Asp. Distributor	jam	996,00	6.972,00
	Compressor	jam	1.365,35	9.557,45
9	Lataston Lapis Aus (HRS-WC)	Ton		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	24,90	174,30
	Mandor	jam	24,90	174,30
	Peralatan			
	Wheel Loader	jam	186,25	1.303,76
	AMP	jam	24,90	174,30
	Genset	jam	24,90	174,30
	Dump truck 6-8 M3	jam	23,95	167,66
	Asphalt Finisher	jam	58,30	408,12
	Tandem Rolle 8-10 T.	jam	57,25	400,78
	P. Tyre Roller	jam	86,86	608,02

Lanjutan **Tabel 2**

DIVISI 7. STRUKTUR				
10	Beton Mutu, fc'20 MPa (K250)	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	2,49	17,43
	Tukang	jam	2,49	17,43
	Mandor	jam	2,49	17,43
	Peralatan			
	Concrete Mixer	jam	2,49	17,43
	Concrete Vibrator	jam	0,42	2,91
	Water Tang Truck	jam	26,21	183,47
11	Beton , fc'15 Mpa	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	4,98	34,86
	Tukang	jam	4,98	34,86
	Mandor	jam	4,98	34,86
	Peralatan			
	Concrete Mixer	jam	4,98	34,86
	Concrete Vibrator	jam	0,83	5,81
	Water Tank Truck	jam	26,21	183,47
12	Baja Tulangan Polos-BjTP 280	Kg		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja Biasa	jam	28,57	200,00
	Tukang	jam	28,57	200,00
	Mandor	jam	28,57	200,00
	Peralatan			
	-	-	-	-
13	Pasangan Batu	M3		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	4,15	29,05
	Tukang	jam	4,15	29,05
	Mandor	jam	4,15	29,05
	Peralatan			
	Conc. Mixer	jam	4,15	29,05
	Water Tank Truck	jam	711,43	4.980,00
DIVISI 8. REHABILITASI JEMBATAN				
	-	-	-	-
DIVISI 9. PEKERJAAN HARIAN & PEKERJAAN LAIN-LAIN				
14	Marka Jalan Termoplastik	M2		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja Biasa	jam	13,33	93,33
	Tukang	jam	13,33	93,33
	Mandor	jam	13,33	93,33
	Peralatan			
	Compressor	jam	13,33	93,33
	Dump Truck	jam	13,33	93,33
	Thermoplastic spreading machine	jam	13,33	93,33
15	Patok Pengarah	Buah		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja	jam	20,18	141,25
	Tukang	jam	20,18	141,25
	Mandor	jam	20,18	141,25
	Peralatan			
	Dump Truck	jam	20,18	141,25
16	Patok Kilometer	Buah		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja Biasa	jam	14,02	98,13
	Tukang	jam	14,02	98,13
	Mandor	jam	14,02	98,13
	Peralatan			
	Dump Truck	jam	14,02	98,13
17	Rel Pengaman	M1		
	Tenaga Kerja			
	Pekerja Biasa	jam	5,93	41,53
	Tukang	jam	5,93	41,53
	Mandor	jam	5,93	41,53
	Peralatan			
	Dump Truck	jam	5,93	41,53
DIVISI 10. PEKERJAAN PEMELIHARAAN KINERJA				
	-	-	-	-

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Produksi Minimum

Produsi minimum merupakan produksi yang terkecil yang dipilih dari kelompok tenaga kerja dan peralatan yang bekerja bersama-sama pada satu item tertentu. Produksi minimum terpilih akan digunakan sebagai produksi kerja dalam satu item pekerjaan. Dalam analisa ini penulsi membagi 3 produksi minimum yang akan dianalisa yaitu produksi minimum tenaga kerja, produksi minimum peralatan, dan produksi minimum tenaga kerja dan peralatan. Ketika simulasi perubahan produksi minimum tenaga kerja, produksi minimum peralatan, dan produksi minimum tenaga kerja dan peralatan terjai maka harus memerhatikan agar produksi minimum yang disimulai tetap pada kondisi minimum, yaitu dengan cara melakukan penambahan tenaga kerja dan peralatan. Untuk penambahan peralatan dibatasi penambahannya dengan maksimal penambahan peralatan untuk alat berat 3 dan untuk alat kecil 5. Ketika sudah mencapai batas penambahan peralatan namunn produksi minimum yang disimulasi tetap lebih besar maka produksi yang digunakan tetap mengunakan produksi yang paling kecil. Untuk pemilihan produksi minimum tenaga kerja, produksi minimum peralatan, dan produksi minimum tenaga kerja dan peralatan dapat dilihat pada tabel-tabel dibawah ini:

Tabel 3. Pemilihan Produksi Minimum Tenaga Kerja

No	Item Pekerjaan	Satuan	Produksi TK (Hari)	Produksi Alat (Hari)	Kondisi	Produksi Minimum TK
1	Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air	M3	261,45	261,45	Qtk = Qa	261,45
2	Pasangan Batu dengan Mortar	M3	35,00	35,00	Qtk = Qa	35,00
3	Gorong-gorong Kotak Beton Bertulang	M1	244,02	1,82	Qtk > Qa	244,02
4	Galian Biasa	M3	389,04	389,04	Qtk = Qa	389,04
5	Timbunan Pilihan dari sumber galian	M3	1.750,00	205,28	Qtk > Qa	1.750,00
6	Penyiapan Badan Jalan	M2	2.996,74	214,97	Qtk > Qa	2.996,74
7	Lapis Pondasi Agregat Kelas A	M3	718,89	718,89	Qtk = Qa	718,89
8	Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi	Liter	9.557,45	6.972,00	Qtk > Qa	9.557,45
9	Lataston Lapis Aus (HRS-WC)	Ton	174,30	174,30	Qtk = Qa	174,30
10	Beton Mutu, fc'20 MPa (K250)	M3	17,43	2,91	Qtk > Qa	17,43
11	Beton , fc'15 Mpa	M3	34,86	5,81	Qtk > Qa	34,86
12	Baja Tulangan Polos BjTP 280	Kg	200,00	-		200,00
13	Pasangan Batu	M3	29,05	29,05	Qtk = Qa	29,05
14	Marka Jalan Termoplastik	M2	93,33	93,33	Qtk = Qa	93,33
15	Patok Pengarah	Buah	141,25	-		141,25
16	Patok Kilometer	Buah	98,13	-		98,13
17	Rel Pengaman	M2	41,53	-		41,53

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Tabel 4. Pemilihan Produksi Minimum Peralatan

No	Item Pekerjaan	Satuan	Produksi TK (Hari)	Produksi Alat (Hari)	Kondisi	Produksi Minimum Alat
1	Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air	M3	261,45	261,45	Qa = Qtk	261,45
2	Pasangan Batu dengan Mortar	M3	35,00	35,00	Qa = Qtk	35,00
3	Gorong-gorong Kotak Beton Bertulang	M1	244,02	1,82	Qa < Qtk	1,82
4	Galian Biasa	M3	389,04	389,04	Qa = Qtk	389,04
5	Timbunan Pilihan dari sumber galian	M3	1.750,00	205,28	Qa < Qtk	205,28
6	Penyiapan Badan Jalan	M2	2.996,74	214,97	Qa < Qtk	214,97
7	Lapis Pondasi Agregat Kelas A	M3	718,89	718,89	Qa = Qtk	718,89
8	Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi	Liter	9.557,45	6.972,00	Qa < Qtk	6.972,00
9	Lataston Lapis Aus (HRS-WC)	Ton	174,30	174,30	Qa = Qtk	174,30
10	Beton Mutu, fc'20 MPa (K250)	M3	17,43	2,91	Qa < Qtk	2,91
11	Beton , fc'15 Mpa	M3	34,86	5,81	Qa < Qtk	5,81
12	Baja Tulangan Polos BjTP 280	Kg	200,00	-		-
13	Pasangan Batu	M3	29,05	29,05	Qa = Qtk	29,05
14	Marka Jalan Termoplastik	M2	93,33	93,33	Qa = Qtk	93,33
15	Patok Pengarah	Buah	141,25	-		-
16	Patok Kilometer	Buah	98,13	-		-
17	Rel Pengaman	M2	41,53	-		-

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Tabel 5. Pemilihan Produksi Minimum Tenaga Kerja dan Peralatan

No	Item Pekerjaan	Satuan	Produksi TK (Hari)	Peoduksi Alat (Hari)	Produksi yang dipilih	Qmin Tenaga kerja & Alat
1	Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air	M3	261,45	261,45	Qa/Qtk	261,45
2	Pasangan Batu dengan Mortar	M3	35,00	35,00	Qa/Qtk	35,00
3	Gorong-gorong Kotak Beton Bertulang	M1	244,02	1,82	Qa	1,82
4	Galian Biasa	M3	389,04	389,04	Qa/Qtk	389,04
5	Timbunan Pilihan dari sumber galian	M3	1.750,00	205,28	Qa	205,28
6	Penyiapan Badan Jalan	M2	2.996,74	214,97	Qa	214,97
7	Lapis Pondasi Agregat Kelas A	M3	718,89	718,89	Qa/Qtk	718,89
8	Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi	Liter	9.557,45	6.972,00	Qa	6.972,00
9	Lataston Lapis Aus (HRS-WC)	Ton	174,30	174,30	Qa/Qtk	174,30
10	Beton Mutu, fc'20 MPa (K250)	M3	17,43	2,91	Qa	2,91
11	Beton , fc'15 Mpa	M3	34,86	5,81	Qa	5,81
12	Baja Tulangan Polos BjTP 280	Kg	200,00	-	Qtk	200,00
13	Pasangan Batu	M3	29,05	29,05	Qa/Qtk	29,05
14	Marka Jalan Termoplastik	M2	93,33	93,33	Qa/Qtk	93,33
15	Patok Pengarah	Buah	141,25	-	Qtk	141,25
16	Patok Kilometer	Buah	98,13	-	Qtk	98,13
17	Rel Pengaman	M2	41,53	-	Qtk	41,53

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Setelah mengetahui ketika produksi minimum dari tabel diatas selanjutnya melakukan simulasi perubahan produksi minimum -20% sampai +20% dengan interval 4%, simulasi kenaikan produsi minimum dilakukan dengan cara produksi minimum dikali satu ditambah presentase perubahannya, untuk penurunan produksi minimum dihitung dengan cara produksi minimum dikali satu dikurang presentase perubahanya. Ketika dilakukan simulasi perubahan produksi minimum tenaga kerja maka harus memerhatikan jumlah peralatan agar tetap pada kondisi minimum, untuk simulasi perubahan produksi peralatan harus memerhatikan jumlah tenaga kerja agar produksi peralatan tetap pada kondisi minimum. Untuk hasil dari simulasi perubahan produksi minimum dari ketiga produksi yang disimulasi dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 6. Produksi Minimum Akibat Simulasi Perubahan -20% Sampai +20% Interval 4%

No	Item Pekerjaan	Satuan	Variasi Simulasi Qmin										
			-20%	-16%	-12%	-8%	-4%	0%	4%	8%	12%	16%	20%
1	**Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	209,16	219,62	230,08	240,53	250,99	261,45	271,91	282,37	292,82	303,28	313,74
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		209,16	219,62	230,08	240,53	250,99	261,45	271,91	282,37	292,82	303,28	313,74
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		209,16	219,62	230,08	240,53	250,99	261,45	271,91	282,37	292,82	303,28	313,74
2	**Pasangan Batu dengan Mortar**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	28,00	29,40	30,80	32,20	33,60	35,00	36,40	37,80	39,20	40,60	42,00
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		28,00	29,40	30,80	32,20	33,60	35,00	36,40	37,80	39,20	40,60	42,00
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		28,00	29,40	30,80	32,20	33,60	35,00	36,40	37,80	39,20	40,60	42,00
3	**Gorong-gorong Kotak Beton Bertulang**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M1	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08	9,08
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		1,45	1,53	1,60	1,67	1,74	1,82	1,89	1,96	2,03	2,11	2,18
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		1,45	1,53	1,60	1,67	1,74	1,82	1,89	1,96	2,03	2,11	2,18
4	**Galian Biasa**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	311,23	326,79	342,35	357,91	373,48	389,04	404,60	420,16	435,72	451,28	466,85
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		311,23	326,79	342,35	357,91	373,48	389,04	404,60	420,16	435,72	451,28	466,85
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		311,23	326,79	342,35	357,91	373,48	389,04	404,60	420,16	435,72	451,28	466,85
5	**Timbunan Pilihan dari sumber galian**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	615,84	615,84	615,84	615,84	615,84	615,84	615,84	615,84	615,84	615,84	615,84
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		164,22	172,43	180,65	188,86	197,07	205,28	213,49	221,70	229,91	238,12	246,33
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		164,22	172,43	180,65	188,86	197,07	205,28	213,49	221,70	229,91	238,12	246,33
6	**Penyiapan Badan Jalan**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M2	644,91	644,91	644,91	644,91	644,91	644,91	644,91	644,91	644,91	644,91	644,91
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		171,98	180,57	189,17	197,77	206,37	214,97	223,57	232,17	240,77	249,37	257,96
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		171,98	180,57	189,17	197,77	206,37	214,97	223,57	232,17	240,77	249,37	257,96
7	**Lapis Pondasi Agregat Kelas A**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	575,11	603,87	632,62	661,38	690,14	718,89	747,65	776,40	805,16	833,91	862,67
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		575,11	603,87	632,62	661,38	690,14	718,89	747,65	776,40	805,16	833,91	862,67
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		575,11	603,87	632,62	661,38	690,14	718,89	747,65	776,40	805,16	833,91	862,67
8	**Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	Liter	7.645,96	8.028,26	8.410,56	8.792,85	9.175,15	9.557,45	9.939,75	10.322,05	10.704,34	11.086,64	11.468,94
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		5.577,60	5.856,48	6.135,36	6.414,24	6.693,12	6.972,00	7.250,88	7.529,76	7.808,64	8.087,52	8.366,40
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		5.577,60	5.856,48	6.135,36	6.414,24	6.693,12	6.972,00	7.250,88	7.529,76	7.808,64	8.087,52	8.366,40
9	**Lataston Lapis Aus (HRS-WC)**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	Ton	139,44	146,41	153,38	160,36	167,33	174,30	181,27	188,24	195,22	202,19	209,16
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		139,44	146,41	153,38	160,36	167,33	174,30	181,27	188,24	195,22	202,19	209,16
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		139,44	146,41	153,38	160,36	167,33	174,30	181,27	188,24	195,22	202,19	209,16
10	**Beton Mutu, fc'20 MPa (K250)**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	13,94	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53	14,53
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		2,32	2,44	2,56	2,67	2,79	2,91	3,02	3,14	3,25	3,37	3,49
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		2,32	2,44	2,56	2,67	2,79	2,91	3,02	3,14	3,25	3,37	3,49
11	**Beton , fc'15 Mpa**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	29,05	29,05	29,05	29,05	29,05	29,05	29,05	29,05	29,05	29,05	29,05
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		4,65	4,88	5,11	5,35	5,58	5,81	6,04	6,27	6,51	6,74	6,97
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		4,65	4,88	5,11	5,35	5,58	5,81	6,04	6,27	6,51	6,74	6,97
12	**Baja Tulangan Polos BjTP 280**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	Kg	160,00	168,00	176,00	184,00	192,00	200,00	208,00	216,00	224,00	232,00	240,00
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		160,00	168,00	176,00	184,00	192,00	200,00	208,00	216,00	224,00	232,00	240,00
13	**Pasangan Batu**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M3	23,24	24,40	25,56	26,73	27,89	29,05	30,21	31,37	32,54	33,70	34,86
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		23,24	24,40	25,56	26,73	27,89	29,05	30,21	31,37	32,54	33,70	34,86
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		23,24	24,40	25,56	26,73	27,89	29,05	30,21	31,37	32,54	33,70	34,86
14	**Marka Jalan Termoplastik**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M2	74,67	78,40	82,13	85,87	89,60	93,33	97,07	100,80	104,53	108,27	112,00
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		74,67	78,40	82,13	85,87	89,60	93,33	97,07	100,80	104,53	108,27	112,00
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		74,67	78,40	82,13	85,87	89,60	93,33	97,07	100,80	104,53	108,27	112,00
15	**Patok Pengarah**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	Buah	113,00	118,65	124,30	129,95	135,60	141,25	146,90	152,55	158,20	163,85	169,50
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		113,00	118,65	124,30	129,95	135,60	141,25	146,90	152,55	158,20	163,85	169,50
16	**Patok Kilometer**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	Buah	78,51	82,43	86,36	90,28	94,21	98,13	102,06	105,98	109,91	113,83	117,76
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		78,51	82,43	86,36	90,28	94,21	98,13	98,13	98,13	98,13	98,13	98,13
17	**Rel Pengaman**												
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (M3/Hari)	M2	33,22	34,88	36,55	38,21	39,87	41,53	43,19	44,85	46,51	48,17	49,84
	Produksi Minmum Peralatan (M3/Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (M3/Hari)		33,22	34,88	36,55	38,21	39,87	41,53	41,53	41,53	41,53	41,53	41,53

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Waktu Penyelesaian Akibat Simulasi Perubahan Produksi Minimum

Waktu penyelesaian item pekerjaan diperoleh dari volume yang ada pada data RAB dibagi dengan produksi minimum. Untuk waktu penyelesaiann item pekerjaan akibat simulasi perubahan dari ketiga produksi dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 7. Waktu Penyelesaian Akibat Simulasi Prubahan Produksi Minimum

No	Item Pekerjaan	Satuan	Waktu Penyelesaian Akibat Simulasi Qmin										
			-20%	-16%	-12%	-8%	-4%	0%	4%	8%	12%	16%	20%
1	**Galian untuk Selokan Drainase dan Saluran Air**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		15,45	14,71	14,04	13,43	12,87	12,36	11,88	11,44	11,03	10,65	10,30
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		15,45	14,71	14,04	13,43	12,87	12,36	11,88	11,44	11,03	10,65	10,30
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		15,45	14,71	14,04	13,43	12,87	12,36	11,88	11,44	11,03	10,65	10,30
2	**Pasangan Batu dengan Mortar**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		58,51	55,73	53,19	50,88	48,76	46,81	45,01	43,34	41,79	40,35	39,01
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		58,51	55,73	53,19	50,88	48,76	46,81	45,01	43,34	41,79	40,35	39,01
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		58,51	55,73	53,19	50,88	48,76	46,81	45,01	43,34	41,79	40,35	39,01
3	**Gorong-gorong Kotak Beton Bertulang**	M1											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		13,76	13,11	12,51	11,97	11,47	11,01	10,59	10,20	9,83	9,49	9,18
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		13,76	13,11	12,51	11,97	11,47	11,01	10,59	10,20	9,83	9,49	9,18
4	**Galian Biasa**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		10,35	9,86	9,41	9,00	8,62	8,28	7,96	7,67	7,39	7,14	6,90
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		10,35	9,86	9,41	9,00	8,62	8,28	7,96	7,67	7,39	7,14	6,90
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		10,35	9,86	9,41	9,00	8,62	8,28	7,96	7,67	7,39	7,14	6,90
5	**Timbunan Pilihan dari sumber galian**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		48,94	48,94	48,94	48,94	48,94	48,94	48,94	48,94	48,94	48,94	48,94
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		183,52	174,78	166,83	159,58	152,93	146,81	141,17	135,94	131,08	126,56	122,35
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		183,52	174,78	166,83	159,58	152,93	146,81	141,17	135,94	131,08	126,56	122,35
6	**Penyiapan Badan Jalan**	M2											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		150,72	150,72	150,72	150,72	150,72	150,72	150,72	150,72	150,72	150,72	150,72
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		565,20	538,28	513,81	491,47	471,00	452,16	434,77	418,66	403,71	389,79	376,80
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		565,20	538,28	513,81	491,47	471,00	452,16	434,77	418,66	403,71	389,79	376,80
7	**Lapis Pondasi Agregat Kelas A**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		28,79	27,42	26,18	25,04	24,00	23,04	22,15	21,33	20,57	19,86	19,20
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		28,79	27,42	26,18	25,04	24,00	23,04	22,15	21,33	20,57	19,86	19,20
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		28,79	27,42	26,18	25,04	24,00	23,04	22,15	21,33	20,57	19,86	19,20
8	**Lapis Resap Pengikat - Aspal Cair/Emulsi**	Liter											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		7,22	6,88	6,56	6,28	6,02	5,78	5,55	5,35	5,16	4,98	4,81
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		9,90	9,43	9,00	8,61	8,25	7,92	7,61	7,33	7,07	6,83	6,60
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		9,90	9,43	9,00	8,61	8,25	7,92	7,61	7,33	7,07	6,83	6,60
9	**Lataston Lapis Aus (HRS-WC)**	Ton											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		45,52	43,36	41,39	39,59	37,94	36,42	35,02	33,72	32,52	31,40	30,35
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		45,52	43,36	41,39	39,59	37,94	36,42	35,02	33,72	32,52	31,40	30,35
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		45,52	43,36	41,39	39,59	37,94	36,42	35,02	33,72	32,52	31,40	30,35
10	**Beton Mutu, fc'20 MPa (K250)**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		1,81	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		10,84	10,33	9,86	9,43	9,04	8,67	8,34	8,03	7,75	7,48	7,23
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		10,84	10,33	9,86	9,43	9,04	8,67	8,34	8,03	7,75	7,48	7,23
11	**Beton , fc'15 Mpa**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		142,67	142,67	142,67	142,67	142,67	142,67	142,67	142,67	142,67	142,67	142,67
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		891,67	849,21	810,61	775,37	743,06	713,34	685,90	660,50	636,91	614,95	594,45
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		891,67	849,21	810,61	775,37	743,06	713,34	685,90	660,50	636,91	614,95	594,45
12	**Baja Tulangan Polos BjTP 280**	Kg											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		18,90	18,00	17,18	16,43	15,75	15,12	14,54	14,00	13,50	13,03	12,60
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		18,90	18,00	17,18	16,43	15,75	15,12	14,54	14,00	13,50	13,03	12,60
13	**Pasangan Batu**	M3											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		96,83	92,22	88,03	84,20	80,69	77,47	74,49	71,73	69,17	66,78	64,56
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		96,83	92,22	88,03	84,20	80,69	77,47	74,49	71,73	69,17	66,78	64,56
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		96,83	92,22	88,03	84,20	80,69	77,47	74,49	71,73	69,17	66,78	64,56
14	**Marka Jalan Termoplastik**	M2											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		10,85	10,33	9,86	9,43	9,04	8,68	8,34	8,04	7,75	7,48	7,23
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		10,85	10,33	9,86	9,43	9,04	8,68	8,34	8,04	7,75	7,48	7,23
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		10,85	10,33	9,86	9,43	9,04	8,68	8,34	8,04	7,75	7,48	7,23
15	**Patok Pengarah**	Buah											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		4,42	4,21	4,02	3,85	3,69	3,54	3,40	3,28	3,16	3,05	2,95
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		4,42	4,21	4,02	3,85	3,69	3,54	3,40	3,28	3,16	3,05	2,95
16	**Patok Kilometer**	Buah											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,16
17	**Rel Pengaman**	M2											
	Produksi Minmum Tenaga Kerja (Hari)		15,05	14,33	13,68	13,09	12,54	12,04	11,58	11,15	10,75	10,38	10,03
	Produksi Minmum Peralatan (Hari)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Produksi Minmum Tenaga Kerja & Peralatan (Hari)		15,05	14,33	13,68	13,09	12,54	12,04	11,58	11,15	10,75	10,38	10,03

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Biaya Proyek Baru Akibat Simulasi Perubahan Produksi Minimum

Biaya proyek adalah biaya yang digunakan untuk menyelesaikan suatu kegiatan proyek atau pekerjaan. Dari perubahan produksi minimum tenaga kerja, produksi minimum peralatan, dan produksi minimum antara tenaga kerja dan peralatan pada tabel 6 diatas mengakibatkan koefisien tenaga kerja dan peralatan ikut berubah mengikuti produksi minimum yang telah berubah akibat simulasi perubahan dikarenakan koefisien tenaga kerja dihitung dengan cara 1 dibagi produksi minimum dikali jumlah tenaga kerja, sama halnya juga dengan koefisien peralatan 1 dibagi produksi minimum dikali jumlah peralatan. Selanjutnya koefisien dari masing-masing sumber daya tenaga kerja dan peralatan dikalikan lagi dengan harga satuan yang ada pada data RAB, dari analisa harga satuan yang didapat selanjutnya dijumlahkan lagi dari masing-masing sumber daya tenaga kerja, material dan peralatan sehingga menghasilkan analisa harga satuan item pekerjaan, selanjutnya analisa haraga satuan item pekerjaan tersebut dikalikan dengan volume pekerjaan yang ada pada data RAB maka didapatlah biaya item pekerjaan, dari biaya item pekerjaan yang didapat kemudian dijumlahkan lagi biaya item pekerjaan untuk seluruh item pekerjaan maka didapatlah biaya proyek. Untuk biaya proyek akibat simulasi perubahan produksi minimum dari ketiga produksi minimum yang disimulasi dapat dilihat pada tabel-tabel dibawah ini:

Tabel 8. Biaya Proyek Akibat Simulai ketiga Produksi Minimum

No	Biaya Proyek Normal (Rp)	Variasi Simulasi Qmin -20% Sampai +20% Interval 4%	Biaya proyek akibat simulasi perubahan Qmin TK (Rp)	Biaya proyek akibat simulasi perubahan Qmin A (Rp)	Biaya proyek akibat simulasi perubahan Qmin TK & A (Rp)	Presentase perbedaan biaya proyek		
						Qmin Tenaga Kerja (%)	Qmin Peralatan (%)	Qmin Tenaga Kerja & Peralatan (%)
1	35.009.357.405,01	-20%	38.158.418.364,85	45.506.162.642,71	45.511.261.687,82	8,99	29,98	30,00
		-16%	37.939.361.631,33	44.729.158.164,28	44.733.043.151,04	8,37	27,76	27,77
		-12%	37.739.113.031,60	44.022.790.456,63	44.023.944.676,02	7,80	25,75	25,75
		-8%	37.559.390.024,44	43.377.846.027,89	43.379.619.608,80	7,28	23,90	23,91
		-4%	37.393.152.446,43	42.786.646.968,22	42.787.496.809,08	6,81	22,21	22,22
		0%	37.240.213.874,65	42.242.743.833,33	42.242.743.833,33	6,37	20,66	20,66
		4%	40.201.483.258,05	41.810.713.031,57	41.809.928.563,09	14,83	19,43	19,43
		8%	39.983.057.906,70	41.351.314.425,97	41.349.803.597,79	14,21	18,12	18,11
		12%	39.780.234.366,15	40.927.785.942,95	40.927.420.853,09	13,63	16,91	16,90
		16%	39.591.398.655,99	40.533.089.728,25	40.530.276.461,97	13,09	15,78	15,77
		20%	39.415.151.993,17	40.175.520.948,95	40.172.121.585,54	12,58	14,76	14,75

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

Keuntungan Baru Akibat Simulasi Produksi Minimum

Keuntungan atau laba adalah selisih antara pendapatan dan pengeluaran dari suatu kegiatan proyek yang dikerjakan. keuntungan didapat dari 10% dikalikan dengan biaya proyek. untuk perubahan keuntungannya didapat dari keuntungan awal ditambah biaya proyek awal dikurangi perubahan biaya proyek. keuntungan yang didapat berdasarkan biaya proyek dari tabel 9. untuk perhitungan keuntungannya dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 20. Keuntungan Proyek Akibat Simulai ketiga Produksi Minimum

No	Keuntungan Normal (Rp)	Variasi Simulasi Qmin -20% Sampai +20% Interval 4%	Perubahan keuntungan Proyek Qmin TK (Rp)	Perubahan keuntungan Proyek Qmin A (Rp)	Perubahan keuntungan Proyek Qmin TK & A (Rp)	Presentase perbedaan keuntungan proyek		
						Qmin Tenaga Kerja (%)	Qmin Peralatan (%)	Qmin Tenaga Kerja & Peralatan (%)
1	3.477.129.081,48	-20%	328.068.121,64	- 7.019.676.156,22	- 7.024.775.201,34	-90,56	-301,88	-302,03
		-16%	547.124.855,16	- 6.242.671.677,80	- 6.246.556.664,55	-84,27	-279,54	-279,65
		-12%	747.373.454,88	- 5.536.303.970,14	- 5.537.458.189,53	-78,51	-259,22	-259,25
		-8%	927.096.462,05	- 4.891.359.541,41	- 4.893.133.122,32	-73,34	-240,67	-240,72
		-4%	1.093.334.040,06	- 4.300.160.481,74	- 4.301.010.322,59	-68,56	-223,67	-223,69
		0%	1.246.272.611,83	- 3.756.257.346,84	- 3.756.257.346,84	-64,16	-208,03	-208,03
		4%	- 1.714.996.771,57	- 3.324.226.545,08	- 3.323.442.076,60	-149,32	-195,60	-195,58
		8%	- 1.496.571.420,21	- 2.864.827.939,48	- 2.863.317.111,30	-143,04	-182,39	-182,35
		12%	- 1.293.747.879,67	- 2.441.299.456,46	- 2.440.934.366,61	-137,21	-170,21	-170,20
		16%	- 1.104.912.169,50	- 2.046.603.241,76	- 2.043.789.975,49	-131,78	-158,86	-158,78
		20%	- 928.665.506,68	- 1.689.034.462,46	- 1.685.635.099,05	-126,71	-148,58	-148,48

Sumber: Hasil Analisis Penulis, 2024

5. PENUTUP

tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui dampak perubahan produksi minimum terhadap waktu penyelesaian item pekerjaan, mengetahui dampak perubahan produksi minimum terhadap biaya proyek, dan mengetahui dampak perubahan produksi minimum terhadap keuntungan proyek. Berdasarkan hasil analisis maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pada simulasi produksi minimum tenaga kerja terhadap waktu penyelesaian pada salah satu contoh item pekerjaan lapis resap pengikat aspal cair/emulsi, pada kondisi 0% membutuhkan 5,78 hari untuk menyelesaikan item pekerjaan tersebut. Namun ketika produksi minimumnya menurun -20% maka waktu penyelesaiannya meningkat 7,22 hari, ketika produksi minimum tenaga kerja meningkat +20% maka waktu penyelesaianya menurun menjadi 4,81 hari. pada simulasi perubahan produksi minimum peralatan, pada item pekerjaan yang sama ketika produksi minimum peralatan pada kondisi 0% membutuhkan 7,92 hari untuk menyelesaikan item pekerjaan tersebut, ketika produksi minimum peralatan menurun -20% maka waktu penyelesaiannya meningkat 9,90 hari, ketika produksi minimum peralatan meningkat +20% maka waktu penyelesaianya menurun menjadi 6,60 hari.
2. Biaya proyek normal sebesar Rp 35.009.357.405,01, ketika tejadi simulasi produksi minimum tenaga kerja pada kondisi 0% biaya proyek menjadi Rp 37.240.213.874,65 hal ini mengalalami kenaikan 6,37% dari biaya proyek normal, ketika simulasi produksi minimum tenaga kerja mengalami penurunan produksi -20% maka biaya proyek meningkat menjadi Rp. 38.158.418.364,85 hal ini mengalami kenaikan biaya proyek 8,99% dari biaya proyek normal. ketika produksi minimum tenaga kerja mengalami simulasi kenaikan +4% biaya proyek naik Rp.40.201.483.258,05 hal ini terjadi peningkatan sebesar 14,83% dari biaya proyek normal dikarenakan terjadi penambahan peralatan pada kondisi produksi minimum tenaga kerja lebih besar dari produksi minimum peralatan, penambahan peralatan dilakukan sehingga produksi minimum tenaga kerja tetap pada kondisi minimum. Ketika produksi minimum tenaga kerja mengalami simulasi kenaikan +20% maka biaya proyek kembali menurun menjadi Rp. 39.415.151.993,17 hal ini mengalami peningkataan sebesarr 12,28% dari biaya proyek normal. Pada simulasi perubahan produksi peralatan terhadap biaya proyek ketika pada kondisi produksi minimum peralatan 0% maka biaya proyek menjadi Rp. 42.242.743.833,33 hal ini mengalami kenaikan sebesar 20,66% dari biaya proyek normal dikarenakan produksi minimum peralatan yang kecil sehingga biaya proyek menjadi lebih besar, ketika produksi minimum peralatan simulasi penurunan -20% maka biaya proyek menjadi Rp. 45.506.162.642,71 hal ini mengalami peningkatan sebesar 29,98% dari biaya proyek normal, ketika produksi minimum peralatan mengalami simulasi kenaikan +20% maka biaya proyek menjadi Rp. 40.175.520.948,95 terjadi peningkatan sebesar 14,76% dari biaya proyek normal.
3. Keuntungan proyek normalnya adalah Rp. 3.477.129.081,48. Pada simulasi produksi minimum tenaga kerja pada kondisi 0% keuntungan yang didapat berkurang menjadi Rp. 1.246.272.611,83, ketika produksi minimum tenaga kerja mengalami simulasi penurunan -20% maka keuntungan yang didapat berubah menjadi Rp. 328.068.121,64, ketika simulasi produksi minimum tenaga kerja mengingkat +20% maka mengalami kerugian Rp -928.665.506,68, Pada simulasi perubahan produksi minimum peralatan, pada produksi minimum peralatan kondisi 0% mengalami kerugian sebesar Rp. -3.756.257.346,84, Ketika produksi minimum peralatan mengalami simulasi penurunan -20% maka mengalami kerugian sebesar Rp. -7.019.676.156,22, ketika produksi minimum peralatan mengalami simulasi kenaikan +20% maka mengalami kerugian sebesar Rp. -1.689.034.463,46. Tanda negatif merupakan besarnya kerugian yang didapat sedangkan tanda + merupakan keuntungan yang didapat dari fee & overhead. Besarnya keuntungan dan kerugian yang didapat sudah sesuai dengan besaran biaya proyek akibat produksi minimum.

DAFTAR PUSTAKA

Ahuja, N. Hira, Dozzi, S.P., Abourizk, S.M. (1994). *Project Management: Techniques in Planning And Controlling Contruction Project, 2nd Edition, United State of America, John Wiley & Sons, Inc.*

Aniza (2019. ANIZA-0216104054). *Sumber daya proyek. Bandung: Universitas Widyatama*.

C. Jotin Khisty, B. Kent Lall. (2016). *Transportation Engineering. India*

Dipohusodo (1993). *Produktivitas Sumber Daya Manusia Dalam Instruksi Jasa Konstruksi. Semarang*

Hernandi. (2020). *Manajemen Konstruksi. Yogyakarta; Penerbit Andi*

Jaib, P. S. (2013). *Potensi kerugian biaya proyek dan keterlambatan waktu penyelesaian pekerjaan akibat perbedaan produksi antara alat dan tenaga kerja. Kupang: Universitas Katolik Widya Mandira.*

Kerzner, H. (1982*) Pengantar Menajemen. Jakarta:New Jersey*

Laurensius, L. (2003). *Buku Ajar Kuliah Menejemen Konstruksi. Kupang: Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Widya Mandira.*

Panlana, M. (2014). *Analisa Waktu Penyelesaian dan Biaya Item Pekerjaan Akibat Produksi Minimum. Kupang: Universitas Katolik Widya Mandira.*

PUBAGOT JAYA ABADI. (2023). *Data RAB Penyelengara Paket Jalan Tetaf, SP-Niki-niki. Kabupaten Timor Tengah Selatan.*

Rini, P.I (2019). *Pegaruh Produski Tenaga Kerja Terhadap Kinerja Waktu Proyek pada bangunan bertingkat. Bandung: Universitas Gunadarma.*

Viktorius E.Kaho. (2021). *Evaluasi Keuntungan Proyek Akibat adanya perbedaan produksi minimum antara alat dan tenaga kerja*

Wulfram I Ervianto (2005). *Menejemen Proyek Konstruksi. Yogyakarta*

DAFTAR ISI BIDANG STRUKTUR

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG REHABILITASI BALOK JEMBATAN DENGAN SPALLING MENGGUNAKAN SIKA GROUTING DAN GFRP Achmad Zultan Mansur[1*], Daud Nawir[1].....1

ANALISIS KARAKTERISTIK BAMBU SEBAGAI MATERIAL DINDING NON STRUKTURAL Desi Putri*, Astuti Masdar[2], Endah Lestari[1] dan Abdul Rokhman[3].....7

ANALISIS VARIASI DESAIN PENAMPANG FONDASI DALAM TERHADAP EFISIENSI PELAKSANAAN (STUDI KASUS: GEDUNG POLIKLINIK RSUP PROF. DR. I.G.N.G. NGOERAH) I Made Aryatirta Predana[*], Made Dodiek Wirya Ardana, dan I Gede Yogi Gangga Purnawardana.....8

APLIKASI METODE KEKAKUAN UNTUK MENGHITUNG DISTRIBUSI GAYA TIANG FONDASI DENGAN MODEL KEPALA TIANG KAKU Yoyong Arfiadi[1*] dan Richard Frans[2].....21

DETEKSI KERUSAKAN PADA STRUKTUR RANGKA BATANG RUANG DENGAN MENGGUNAKAN BINARY BAT ALGORITHM DAN EUCLIDEAN DISTANCE SEBAGAI FUNGSI OBYEKTIF Richard Frans[1*] dan Yoyong Arfiadi[2].....31

EVALUASI STORY DRIFT PADA STRUKTUR GEDUNG PERKANTORAN 5 LANTAI DENGAN SAP2000 Sadvent M Purba[1].....38

KAJIAN LITERATUR SISTEM SAMBUNGAN BALOK SLOOF PRACETAK KONSTRUKSI RUMAH SEDERHANA TAHAN GEMPA Israel Padang[1], Rudy Djamaluddin[2], dan , Herman Parung[3] Arwin Amiruddin[4].....44

KAJIAN SPEKTRUM KAPASITAS NON-ENGINEERED BUILDING (NEB) DENGAN ANALISIS STATIC PUSHOVER Hendramawat Aski Safarizki[1*], Stefanus Adi Kristiawan[2], Senot Sangadji[2], Syarifuddin Nur Wahid[1], dan Rafif Hanan Muwaffaq[1].....51

KUAT LENTUR BALOK BETON YANG MENGGUNAKAN BATANG POHON AREN SEBAGAI TULANGAN Israel Padang[1*], Zwengly Lodi Honta[2], Jufri Manga[3].....66

PENENTUAN PARAMETER TANAH UNTUK PERENCANAAN STRUKTUR PENAHAN GALIAN Budi, G. S.[1], dan Neoleinad, W.[2].....75

PENGARUH LOKASI DAN VARIASI KETEBALAN DINDING GESER KANTILEVER PADA BANGUNAN BERTINGKAT SIMETRIS Grisella Audria Gunawan[1], Ade Lisantono[2,*], Yoyong Arfiadi[3], Junaedi Utomo[4].....84

SEISMIK RETROFIT BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING DENGAN PERKUATAN DINDING GESER Junaedi Utomo[1*], Ade Lisantono[2] dan Hermawan[3].....92

STUDI NUMERIK KINERJA BANGUNAN RUMAH TINGGAL SEDERHANA TERHADAP BAHAYA GEMPA BUMI Edy Purwanto[1)], SA Kristiawan[1)], Achmad Basuki[1)], Ahda Dinansya Trisnawan Putra[1)], Arda Arditama[1)].....101

STUDI EKSPERIMENTAL TENTANG REHABILITASI BALOK JEMBATAN DENGAN *SPALLING* MENGGUNAKAN SIKA GROUTING DAN GFRP

Achmad Zultan Mansur[1*], Daud Nawir[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Borneo Tarakan, Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan*
e-mail: achmadzultan@gmail.com
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Borneo Tarakan, Jl. Amal Lama No. 1, Tarakan
e-mail: daudnawir@gmail.com

ABSTRAK

Spalling yang disebabkan oleh paparan klorida yang tinggi pada girder jembatan menimbulkan ancaman signifikan terhadap integritas struktural dan keselamatan pengguna. Penelitian ini berfokus pada evaluasi efektivitas perbaikan lokal menggunakan Sika Grouting yang dikombinasikan dengan perkuatan menggunakan *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) pada balok beton bertulang yang mengalami *spalling*. Dua belas balok, termasuk balok kontrol dan variasi balok dengan perbaikan grouting (BGR), perkuatan GFRP (BGRS), serta kombinasi keduanya dengan U-Wrap pada tumpuan (BGRST), diuji untuk menganalisis pengaruh intervensi tersebut terhadap kapasitas beban. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perbaikan grouting saja (BGR) menghasilkan penurunan kapasitas beban hingga 51,58% dibandingkan dengan balok kontrol, mengindikasikan bahwa perbaikan lokal saja tidak cukup untuk mengembalikan kinerja struktural sepenuhnya. Namun, kombinasi grouting dan perkuatan GFRP (BGRS) terbukti efektif dalam mempertahankan masa layan beban, meskipun belum mencapai kapasitas beban balok kontrol. Sementara itu, perkuatan komprehensif dengan grouting, GFRP, dan U-Wrap (BGRST) menunjukkan peningkatan kapasitas beban sebesar 8,1% dibandingkan balok kontrol, menandakan potensi metode ini dalam meningkatkan kinerja struktural balok yang rusak. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi perbaikan lokal dengan Sika Grouting dan perkuatan menggunakan GFRP, terutama dengan penambahan U-Wrap pada tumpuan, menawarkan solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan. Pendekatan ini sangat relevan dalam konteks keterbatasan anggaran dan kebutuhan perbaikan yang mendesak, memberikan alternatif yang layak untuk menjaga integritas dan keamanan infrastruktur jembatan.

Kata kunci: Balok RC, *Spalling*, Grouting, GFRP

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan infrastruktur vital yang menghubungkan berbagai wilayah dan menunjang mobilitas masyarakat. Keberadaannya yang seringkali terpapar kondisi lingkungan ekstrem, seperti daerah pesisir dengan tingkat klorida tinggi, menjadikannya rentan terhadap kerusakan. Salah satu kerusakan yang umum terjadi adalah korosi pada tulangan baja di dalam balok beton bertulang, yang dapat menyebabkan *spalling* (pengelupasan) pada girder jembatan. Fenomena ini mengancam integritas struktural jembatan dan membahayakan keselamatan pengguna. *Spalling* pada girder jembatan terjadi akibat korosi pada tulangan baja yang disebabkan oleh penetrasi ion klorida ke dalam beton. Klorida bereaksi dengan baja, membentuk oksida besi yang volumenya lebih besar daripada baja asli (Wang et al., 2014). Peningkatan volume ini menyebabkan tekanan internal pada beton, yang akhirnya menyebabkan retak dan pengelupasan. Jika tidak ditangani, *spalling* dapat meluas dan mengurangi kapasitas beban girder, bahkan dapat menyebabkan keruntuhan jembatan (Mansur, Djamaluddin, Parung, Irmawaty, et al., 2024). Mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan memerlukan tindakan perbaikan dan perkuatan yang tepat. Namun, keterbatasan anggaran dan urgensi perbaikan seringkali menjadi kendala. Oleh karena itu, diperlukan solusi yang mudah diterapkan, hemat biaya, dan tidak bergantung pada kucuran dana pemerintah. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah melakukan perbaikan lokal pada daerah yang mengalami *spalling*, diikuti dengan perkuatan menggunakan material komposit.

Perbaikan lokal pada daerah *spalling* bertujuan untuk mengembalikan dimensi awal girder dan menghilangkan beton yang rusak. Salah satu metode yang telah terbukti efektif adalah penggunaan Sika Grouting, yaitu jenis mortar khusus yang dapat mengisi rongga dan retakan pada beton (Peng, Hu, Niu, Zhong, et al., 2023). Sika Grouting memiliki daya rekat tinggi terhadap beton lama dan mampu mengembalikan kekuatan struktur pada daerah yang diperbaiki (Peng, Hu, Niu, Zhang, et al., 2023). Setelah perbaikan lokal, perkuatan girder dilakukan untuk meningkatkan kapasitas beban dan mencegah kerusakan lebih lanjut. Salah satu material komposit yang populer digunakan untuk perkuatan struktur beton adalah Fiber Reinforced Polymer (FRP) (Abdallah et al., 2023). FRP terdiri dari serat-serat yang kuat dan ringan yang tertanam dalam matriks polimer. Material ini memiliki kekuatan tarik tinggi, tahan korosi, dan mudah diaplikasikan. Penelitian ini berfokus pada penggunaan Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) sebagai material perkuatan pada girder jembatan yang mengalami *spalling*. GFRP dipilih karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan jenis FRP lainnya, seperti biaya yang lebih terjangkau, bobot yang lebih ringan, dan sifat isolasi listrik yang baik. Selain itu, GFRP juga memiliki kompatibilitas yang baik dengan beton dan dapat diaplikasikan dengan mudah menggunakan teknik laminasi basah (*wet lay-up*).

Meskipun penggunaan FRP untuk perkuatan struktur beton telah banyak diteliti, namun penelitian mengenai aplikasi GFRP pada girder jembatan yang mengalami *spalling* masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi pada pengembangan pengetahuan di bidang ini. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi para praktisi dan akademisi dalam mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan dengan menggunakan metode yang mudah, efektif, berkelanjutan. Penelitian ini juga berupaya untuk meningkatkan pemahaman masyarakat mengenai penggunaan GFRP sebagai alternatif perkuatan struktur beton yang berkelanjutan. Dengan meningkatnya kesadaran akan manfaat GFRP, diharapkan material ini dapat lebih luas diaplikasikan dalam perbaikan dan perkuatan infrastruktur, sehingga dapat memperpanjang umur layanan struktur dan mengurangi dampak lingkungan.

2. SPECIMEN DAN SET-UP PENGUJIAN

2.1 Balok beton bertulang

Sebanyak dua belas balok beton bertulang (RC) telah diproduksi dengan dimensi penampang (150×250) mm dan panjang keseluruhan 3300 mm, dengan jarak efektif 3000 mm. Terdapat dua variasi balok RC yang diproduksi, yaitu balok kontrol dan balok RC yang mengalami perbaikan dan penguatan **(Tabel 1).** Untuk balok RC yang berfungsi sebagai balok kontrol, tulangan baja 3D13 dan 2ϕ8 digunakan pada sisi tarik dan sisi tekan secara berturut-turut. Hal ini dilakukan untuk memastikan kekuatan dan daya tahan balok dalam menghadapi beban yang bekerja pada sisi tarik dan sisi tekan. Untuk mencegah kegagalan akibat geseran selama pengujian, balok yang diuji dilengkapi dengan tulangan melintang (pengaduk) ϕ8 yang ditempatkan pada jarak 80 mm di setiap zona geser (dari penyangga hingga beban yang terpusat). Tulangan melintang di zona lentur (antara dua beban yang terpusat) ditempatkan pada jarak 200 mm. Tujuan dari penggunaan tulangan melintang adalah untuk meningkatkan kekuatan dan keandalan balok terhadap gaya geser yang terjadi selama pengujian. Sembilan balok variasi menggunakan tulangan baja 3ϕ8 dan 2ϕ8 untuk sisi tarik dan sisi tekan. Perubahan penggunaan tulangan pada balok RC variasi diasumsikan sebagai perubahan pada ujung balok RC yang membutuhkan perlakuan segera dan tepat. Hal ini menunjukkan bahwa ekstremitas balok RC memiliki pengaruh signifikan terhadap kebutuhan perbaikan dan penguatan.

2.2 Beton dan Baja

Beton yang digunakan pada semua balok RC adalah beton yang bersumber dari perusahaan ready mix dan dilakukan pengambilan slump tes untuk benda uji silender dan kubus beton pada saat di tempat produksi dan tiba di area laboratorium. Kuat tekan selama 28 hari didapatkan nilai rata-rata sebesar 21 MPa, kapasitas regangan didapatkan sebesar 0.0026 dan modul elastisitas didapatkan sebesar 28360 MPa. Sebagai hasil dari pengujian standar yang dilakukan, kuat leleh tulangan baja dengan Ø 8 telah dihitung sebesar 375 dan kuat tarik sebesar 496 MPa; kuat leleh tulangan baja dengan Ø 13 telah dihitung sebesar 420 dan kuat tarik sebesar 520 MPa. Modulus elastisitas (Es) tulangan sebesar 200 GPa.

Tabel 1. Detail benda uji

Tipe	Kode balok	Item	Tindakan	Material	Perlakuan pada Balok RC
1.	BK	3	Kontrol	-	Tidak
2.	BGR	3	Grouting	Sikagrout-215.	Tambalan 5 cm
3.	BGRS	3	Grouting dan Lembar GFRP	Sikagrout-215., GFRP	Tambalan 5 cm, lapis lembar GFRP pada sisi bawah
4.	BGRST	3	Grouting, Lembar GFRP dan U-Wrap	Sikagrout-215., GFRP	Tambalan 5 cm, lapis lembar GFRP pada sisi bawah dan U-Wrap pada area tumpuan

2.3 Semen grouting

Sikagrout-215 adalah semen grouting siap pakai yang mempunyai karakteristik tidak menyusut, digunakan untuk mengisi celah atau ruang antara elemen struktural beton, seperti kolom, balok, dan dinding penahan, dengan elemen struktural lainnya, seperti baja, besi, atau beton pratekan. Sikagrout-215 memiliki sifat anti segar (*non-shrink*) yang memungkinkan penggunaannya dalam kondisi yang membutuhkan ketahanan terhadap deformasi, serta formulasi khusus yang dapat memperpanjang masa layan dan mengurangi risiko retak akibat pengkerutan. Selain itu, Sikagrout-215 juga dapat diaplikasikan secara mudah dan cepat dengan campuran yang hanya membutuhkan tambahan air saja. Sifat-sifat mekanik mortar ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat-sifat mekanis dari Sikagrout-215

Uji sampel (hari)	Kuat tekan (MPa)	Kuat lentur (MPa)
7	28	4
28	34	10.6

2.4 *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP)

GFRP, komposit serat kaca rajutan searah, dipilih sebagai bahan penguat eksternal karena ketahanannya terhadap cuaca dan air asin. Aplikasi GFRP pada permukaan beton bertulang (RC) menuntut pembersihan menyeluruh dan penggunaan roller khusus untuk menjamin adhesi optimal serta mencegah pembentukan gelembung udara. Lembaran GFRP yang digunakan, produksi Fyfe Co. LLC, memiliki spesifikasi: tegangan tarik ultimate 575 MPa, modulus tarik 26,1 GPa, regangan 2,20%, dan tebal 1,3 mm. Perekat epoksi dua komponen, juga dari Fyfe Co. LLC, digunakan pada seluruh balok RC yang terbuat dari beton ready mix.

2.5 Prosedur pembuatan benda uji

Benda uji balok RC yang dibuat di laboratorium merupakan benda uji yang diasumsikan mengalami *spalling* pada bagian bawah balok RC sehingga penulangan juga dianggap mengalami reduksi. Benda uji balok RC variasi merupakan hasil reduksi tulangan dari balok RC control sebesar 38,5% yaitu perubahan penggunaan tulangan besi diameter 13 menjadi tulangan diameter 8.



(a) (b) (c) (d)

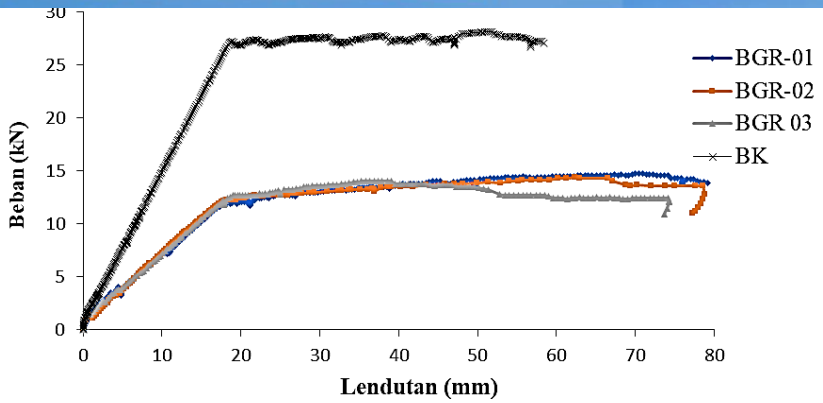
Gambar 3 (a) Tulangan besi D 13 dan ϕ8 (b) Mortar Sikagrout-215. dan Sika bonding adhesive (c) lembar GFRP Woven (d) epoxy resin FRP komponen A dan B

Prosedur terakhir pekerjaan pembuatan benda uji yaitu melakukan perkuatan pada balok RC menggunakan GFRP komposit. a) Meratakan permukaan balok yang akan diperkuat dengan lapisan GFRP dan Uwrap serta membersihkannya dari segala kotoran yang mungkin mengurangi lekatan beton; b) Mempersiapkan campuran bahan perekat epoxy resin komponen A dan komponen B dengan perbandingan berat 2:1. Proses pengadukan tidak boleh berlebihan hingga menghasilkan busa dan gelembung yang bisa terperangkap sebagai rongga udara dalam perekat; c) Menempelkan bahan perkuatan yang telah dipotong dan diberi perekat dengan arah longitudinal balok dan ditekan perlahan terhadap perekat yang masih basah. Rongga udara yang terjebak antara lapisan perkuatan dengan permukaan beton akan dilepas dengan tekanan roller searah serat perkuatan agar perekat menyatu dengan serat dan permukaan betonBenda uji balok RC yang dibuat di laboratorium merupakan benda uji yang diasumsikan mengalami *spalling* pada bagian bawah balok RC sehingga penulangan juga dianggap mengalami reduksi. Benda uji balok RC variasi merupakan hasil reduksi tulangan dari balok RC control sebesar 38,5% yaitu perubahan penggunaan tulangan besi diameter 13 menjadi tulangan diameter 8.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

2.1 Balok beton bertulang

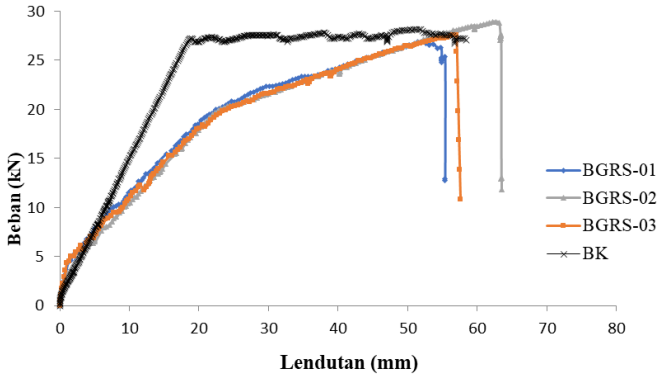
Nilai rata-rata beban pada tiga balok kontrol pada tahap retak awal mencapai 2,61 kN, dengan defleksi sebesar 1,29 mm terjadi di bagian tengah balok, dan retak lentur pertama terjadi pada zona ke-2 di bagian bawah balok. Saat beban mencapai titik leleh sebesar 25,87 kN, terjadi lendutan sebesar 17,67 mm. Pada tahap pembebanan berlanjut, peningkatan beban tetap terbatas, namun lendutan terus meningkat. Ketika beban mencapai puncak sebesar 29,74 kN, balok percobaan mengalami defleksi sebesar 53,59 mm. Tiga balok RC yang dalam kondisi kritis dengan kode BGR telah diperbaiki dengan mortar grouting pada permukaan bawahnya. Saat beban rata-rata mencapai 2,38 kN pada balok BGR, terjadi defleksi sebesar 2,18 mm di bagian tengah balok. Tulangan baja mulai meleleh pada beban rata-rata 12,17 kN, dan defleksi yang sesuai dengan beban tersebut diukur sebesar 19,06 mm. Ketika mencapai beban puncak, balok kehilangan daya dukung dan runtuh pada beban 14,39 kN. Balok mengalami defleksi sebesar 28,17 mm, kehilangan daya dukungnya, dan runtuh (Gambar 4). Terjadi penurunan yang signifikan dalam kapasitas dukung beban balok BGR sebesar 51,58% jika dibandingkan dengan balok kontrol. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Sawan et al. (2022), kualitas mortar mampu meningkatkan kapasitas beban hingga 65% dari balok kontrol, begitu pula dengan penelitian yang dilakukan oleh Mansur et al., 2024; Ombres & Verre, 2019; Peng, Hu, Niu, Zhong, et al., 2023), di mana mortar grouting yang digunakan berhasil meningkatkan daya dukung beban masing-masing sebesar 72% dan 120%.



Gambar 4. Hubungan Beban – Lendutan untuk balok BGR

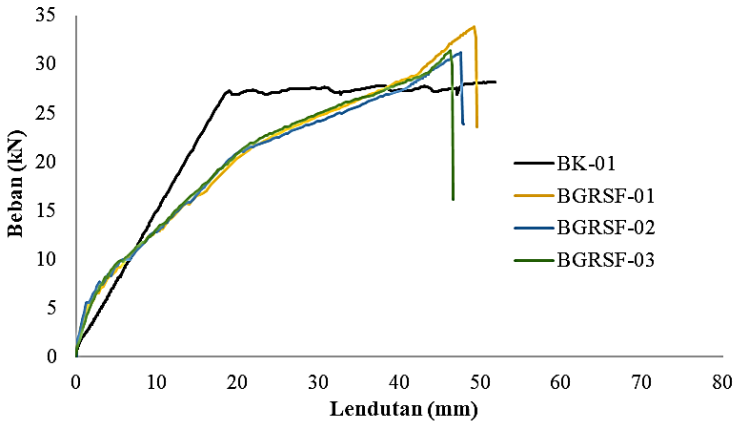
Tiga balok RC dengan kode BGRS direhabilitasi menggunakan mortar Sikagrout-215 dan diperkuat dengan lembar GFRP komposit pada permukaan bawah balok. Pada beban rata-rata 7.22 kN, terjadi lendutan sebesar 4.85 mm di bagian tengah balok dan retak lentur pertama terjadi pada zona ke-2 bagian bawah balok. Ketika beban mencapai 18.50 kN, tulangan mulai meleleh dan lendutan yang sesuai dengan beban tersebut adalah sekitar 24.97 mm. Pada beban 27.81 kN, balok mengalami defleksi sebesar 50.24 mm, kehilangan daya dukung, dan runtuh (Gambar 5). Perkuatan balok RC BGRS dengan grouting dan lembar GFRP komposit mengalami penurunan daya dukung ultimit sebesar 6.49% dibandingkan dengan balok kontrol. Penelitian sebelumnya (Ali et al., 2021; Mansur et al, 2024; Mansur et al., 2024)) telah berhasil melakukan perkuatan pada permukaan bawah balok, menjaga kualitas struktur balok dari beban berulang dan kondisi ekstrem.

Penggunaan lembar GFRP komposit pada permukaan bawah beton (BGRS) belum sepenuhnya mengembalikan fungsi balok seperti balok kontrol, namun dapat mempertahankan masa layan beban dibandingkan dengan penggantian beton baru. Penurunan daya dukung ultimit BGRS disebabkan oleh kelemahan material beton bertulang dan kualitas tulangan yang lebih rendah pada benda uji dibandingkan dengan balok kontrol (Abdallah et al., 2023). Proses perkuatan yang dilakukan mungkin tidak optimal, sehingga tidak selalu menghasilkan peningkatan daya dukung yang maksimal. Meskipun demikian, jika nilai beban yang tercapai memenuhi persyaratan keamanan dan keandalan struktur, perbaikan dapat dianggap berhasil dalam memperkuat struktur yang rusak atau lemah (Sawant & Jadhav, 2022)



Gambar 5. Hubungan Beban – Lendutan untuk balok BGRS

Tiga buah balok RC dengan kode BGRST diperkuat dengan grouting dan full wrapping pada seluruh zona struktur balok. Pada beban rata-rata 7,24 kN pada balok BGRST, terjadi defleksi sebesar 2,96 mm di tengah balok dan retak lentur pertama terjadi pada zona bawah ke-2 balok. Pada beban 21,54 kN, tulangan mulai meleleh dan lendutan yang sesuai dengan beban tersebut adalah sekitar 21,60 mm. Pada beban maksimum 32,14 kN, balok mengalami defleksi sebesar 47,72 mm, kehilangan daya dukung, dan runtuh (Gambar 6). Penggunaan GFRP pada struktur balok BGRST memberikan pengaruh yang signifikan di mana perkuatan pada balok yang dalam kondisi kritis mampu meningkatkan kapasitas beban balok kontrol sebesar 8,1% (Mansur et al., 2024). Dalam penelitian yang menggunakan konfigurasi perkuatan yang berbeda dengan menggunakan GFRP serupa dengan model BGRS, diperoleh peningkatan kekuatan sebesar 118% dan 90% dibandingkan dengan balok kontrol (Mansur et al., 2024)



Gambar 6 Hubungan Beban – Lendutan untuk balok BGRST

Meskipun balok beton RC mengalami keruntuhan, perkuatan GFRP pada daerah tumpuan membantu meningkatkan kapasitas balok dan memungkinkannya menahan beban yang lebih tinggi sebelum mencapai batas kegagalan. Perkuatan GFRP pada daerah tumpuan pada balok memberikan peningkatan kekakuan struktural yang signifikan dengan ikatan mekanik yang kuat antara GFRP dan beton, sehingga transfer gaya yang efisien terjadi antara keduanya dan meningkatkan kekakuan balok secara keseluruhan (Ombres & Verre, 2019). Distribusi beban yang merata di sepanjang balok merupakan manfaat lain dari perkuatan GFRP pada daerah tumpuan, mengurangi konsentrasi beban pada titik-titik kritis (Ali et al., 2021) dan mencegah kegagalan atau keretakan pada balok. Kekakuan akibat perkuatan GFRP memungkinkan balok mengalami deformasi elastis dan elastoplastis tanpa retakan yang signifikan (Abdallah et al., 2023).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perbaikan lokal dengan Sika Grouting dan perkuatan menggunakan GFRP efektif dalam mengatasi masalah *spalling* pada girder jembatan. Perbaikan dengan grouting saja (BGR) mampu meningkatkan kinerja balok yang mengalami kerusakan, namun mengalami penurunan daya dukung ultimit sebesar 51,58% dibandingkan balok kontrol. Kombinasi perbaikan grouting dan perkuatan GFRP (BGRS) lebih lanjut meningkatkan kapasitas beban dan kekakuan struktural, dengan penurunan daya dukung ultimit sebesar 6,49% dibandingkan balok kontrol. Penggunaan U-Wrap pada daerah tumpuan (BGRST) memberikan peningkatan tambahan pada kapasitas beban, yaitu sebesar 8,1% dibandingkan balok kontrol. Penelitian ini memberikan bukti bahwa metode perbaikan dan perkuatan ini merupakan solusi yang layak dan berkelanjutan untuk memperpanjang umur layanan jembatan dan meningkatkan keselamatan pengguna, terutama di daerah dengan paparan klorida tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

Abdallah, M., Al Mahmoud, F., Khalil, N., & Khelil, A. (2023). Effect of the strengthening patterns on the flexural performance of RC continuous beams using FRP reinforcements. Engineering Structures, 280. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115657

Ali, H., Assih, J., & Li, A. (2021). Flexural capacity of continuous reinforced concrete beams strengthened or repaired by CFRP/GFRP sheets. International Journal of Adhesion and Adhesives, 104, 102759. https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2020.102759

Mansur, A. Z., Djamaluddin, R., Parung, H., & Irmawaty, R. (2024). Study of Post-Spalling Reinforced Concrete Beam Repair Using Grouting and GFRP Reinforcement. Civil Engineering Journal (Iran), 10(1), 131–144. https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-01-08

Mansur, A. Z., Djamaluddin, R., Parung, H., Irmawaty, R., & Nawir, D. (2024). Effectiveness of Grouting and GFRP Reinforcement for Repairing Spalled Reinforced Concrete Beams. Civil Engineering Journal, 10(7). https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-07-05

Ombres, L., & Verre, S. (2019). Flexural Strengthening of RC Beams with Steel-Reinforced Grout: Experimental and Numerical Investigation. Journal of Composites for Construction, 23(5), 04019035. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000960

Peng, G., Hu, X., Niu, D., Zhang, Y., & Zhong, S. (2023). Study on the axial compression behavior of RC columns strengthened with cementitious grout. Engineering Structures, 284. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115742

Peng, G., Hu, X., Niu, D., Zhong, S., & Huang, D. (2023). Experimental study on the shear behavior of RC beams strengthened with cementitious grout. Structures, 50, 1403–1415. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.115

Sawant, S. G., & Jadhav, H. S. (2022). Flexural behaviour of GFRP strengthened RC beams under cyclic loading. Materials Today: Proceedings, 59, 188–195. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.396

Wang, L., Zhang, X., Zhang, J., Ma, Y., Xiang, Y., & Liu, Y. (2014). Effect of insufficient grouting and strand

corrosion on flexural behavior of PC beams. Construction and Building Materials, 53, 213–224. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.069

ANALISIS KARAKTERISTIK BAMBU SEBAGAI MATERIAL DINDING NON STRUKTURAL

Desi Putri[*], Astuti Masdar[2], Endah Lestari[1] dan Abdul Rokhman[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Jakarta*
e-mail: desi.putri@itpln.ac.id
[1]Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Payakumbuh, Jl. Sawah Padang Payakumbuh, Sumbar
e-mail: astuti_masdar@yahoo.com
[2] Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Jakarta
e-mail: endahlestari@itpln.ac.id
[3]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi PLN, Jl. Lingkar Luar Barat Duri Kosambi, Jakarta
e-mail: abdulrokhman@itpln.ac.id

ABSTRAK

Bambu merupakan material konstruksi ramah lingkungan mempunyai keunggulan dari segi kekuatan yang diketahui dari sifat mekaniknya seperti kuat tarik, kuat tekan dan kuat lentur. Bambu diaplikasikan sebagai material pada komponen struktur seperti balok, kolom dan *truss.* Bambu juga dapat diaplikasikan sebagai komponen non struktur berupa dinding. Pada saat gempa bumi kerusakan pada bangunan didominasi oleh kerusakan pada dinding, meskipun dinding bukan sebagai komponen struktur. Keruntuhan pada dinding non struktur banyak menimbulkan kerugian dan korban luka termasuk korban jiwa. Salah satu upaya untuk mencegah timbulnya korban jiwa akibat runtuhnya dinding bangunan pada saat terjadi gempa adalah dengan membuat dinding terbuat dari bambu laminasi. Dengan kegagalan dinding dimana kekuatan terendah adalah geser sehingga perlu diketahui kekuatan mekanik bambu khususnya geser sebagai pertimbangan dalam desain. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui sifat fisik dan sifat mekanik bambu Petung sebagai bahan dasar dalam pembuatan bambu laminasi. Bambu Petung dilakukan dengan dua kondisi, kondisi pertama bambu Petung tanpa dilakukan pengawetan bambu dan kondisi kedua bambu Petung dengan dilakukan pengawetan pada bambu. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan standar ISO N225157-1 untuk pembuatan benda uji dan Standar N22157-2 untuk pengujian material. Pengawetan bambu mengacu pada SNI 8909-2020. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa bambu Petung yang dilakukan pengawetan memiliki sifat fisik dan sifat mekanik yang lebih tinggi dari pada bambu Petung tanpa dilakukan pengawetan. Kadar air pada bambu Petung mengalamai kenaikan 1,22% pada daerah nodia dan 2,76 % pada daerah internodia. Kerapatan Bambu Petung mengalami kenaikan sebesar 8,33% pada daerah nodia dan 11,36 % pada daerah internodia. Kuat geser pada Bambu Petung baik pada daerah nodia maupun pada daerah internodia masing masing sebesar 25,19% untuk daerah nodia dan pada daerah internodia terjadi peningkatan kuat geser bambu Petung sebesar 28,21%.

Kata kunci: bambu, sifat fisik, sifat mekanik, pengawetan

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu ancaman bencana yang paling sering terjadi di Indonesia. Gempa bumi dapat didefinisikan sebagai sebuah getaran di permukaan bumi yang diakibatkan oleh pelepasan energi secara tiba-tiba akibat pergerakan lempeng bumi atau letusan gunung api (Widodo, 2012). Indonesia menjadi salah satu negara dengan riwayat panjang kejadian gempa karena terletak di antara pertemuan Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, serta Lempeng Pasifik. Lempeng-lempeng tektonik ini bergerak ke arah tertentu dengan kecepatan tertentu sehingga menghasilkan tumbukan yang berkibat pada terjadinya gempa bumi.

Dinding merupakan struktur padat yang membatasi dan kadang melindungi suatu area. Fungsi dinding adalah membatasi suatu bangunan dan menyokong struktur lainnya, membatasi ruang dalam bangunan menjadi ruangan-ruangan, melindungi atau membatasi suatu ruang di alam terbuka. Ditinjau dari segi struktur dan konstruksi, dinding ada yang berupa dinding partisi/pengisi (tidak menahan beban) dan ada yang berupa dinding struktural (*bearing wall*). Meskipun dinding bukan sebagai komponen struktur, pada saat gempa bumi kerusakan pada bangunan didominasi oleh kerusakan pada dinding. Satu hal yang perlu digarisbawahi adalah gempa tidak menyebabkan korban jiwa secara langsung. Sebagian besar korban jiwa yang timbul dalam kejadian bencana gempa bumi, disebabkan oleh reruntuhan bangunan yang kemudian menimpa penghuni di dalamnya.

Fakta yang bisa dilihat dari pasca gempa adalah bangunan rusak dan roboh. Komponen yang sangat vital adalah komponen dinding. Salah satu dinding yang banyak mengalami keruntuhan dan rusak berat adalah dinding yang menggunakan bahan dari batu bata. Oleh sebab itu perlu dicari solusi untuk membuat dinding yang tahan gempa yaitu dengan menggunakan material lain yang ringan, kuat dan mudah didapatkan sehingga kerugian moril dan materil dapat diminimalisir. Salah satu upaya untuk mencegah timbulnya korban jiwa akibat runtuhnya dinding bangunan

pada saat terjadi gempa adalah dengan membuat dinding bangunan menggunakan material dinding terbuat dari bambu laminasi.

Bambu dengan nama botani *Dendrocalamus asper*, di Indonesia dikenal dengan nama bambu petung, merupakan salah satu jenis bambu yang memiliki ukuran lingkar batang yang besar dan termasuk ke dalam suku rumput-rumputan. Bambu Petung adalah salah satu jenis bambu yang banyak digunakan sebagai material konstruksi karena memiliki keunggulan dari sifat fisik maupun mekaniknya. Bambu Petung memiliki batang dengan ketinggian 20-30m dan bentuk tegak serta melengkung dengan panjang ruas berkisar antara 40- 50cm (Damayanti, dkk, 2015). Bambu Petung pada umur 3 sampai 5 dengan berat jenis 0,72 kg/cm3 dan kadar air 15,5% memiliki nilai modulus elastisitas sekitar 12888 MPa. Bila diklasifikasikan menurut EN338, bambu Petung setara dengan kayu lunak C35 atau kayu keras D40 (Irawati, dkk, 2012). Kondisi tanah dan topografi tempat tumbuh bambu Petung mempengaruhi sifat fisik dan sifat mekanik bambu Petung (Masdar, dkk, 2010).



Gambar 1. Bambu Petung (*Dendrocalamus asper*)

Gambar di atas menampilkan beberapa batang bambu petung (*Dendrocalamus asper*) yang memiliki ciri khas berupa ukuran batang yang besar dengan ruas-ruas yang jelas. Bambu petung, seperti yang terlihat pada gambar, memiliki batang tebal dan kuat dengan permukaan kasar. Pada bagian nodus atau ruas, sering kali tumbuh tunas dan cabang-cabang kecil (lihat Gambar 1). Sifat fisik dan sifat mekanik bambu merupakan sifat yang harus diperhatikan dalam merancang bangunan yang menggunakan bahan dari bambu karena kedua sifat ini sangat diperlukan sebagai pertimbangan untuk mendapatkan hasil perancangan yang lebih optimal. Dengan kegagalan dinding dimana kekuatan terendah adalah geser sehingga perlu diketahui kekuatan mekanik bambu khususnya geser sebagai pertimbangan dalam desain dinding. Bambu Petung adalah bahan organik yang sangat rentan terhadap gangguan organisme perusak seperti jamur pewarna, jamur pelapuk, rayap tanah, rayap kayu kering, kumbang ambrosia serta bubuk kayu kering. Batangnya yang memiliki banyak zat pati dengan rasa yang manis sangat digemari oleh kumbang ataupun bubuk. Kondisi ini menjadi penghalang pemanfaatan bambu Petung sebagai bahan konstruksi. Tanpa pengawetan umur bangunan akan pendek, hanya mencapai 5 tahun sehingga tidak efektif meskipun secara kharakterikstik mekanik bambu Petung mempunyai kekuatan tinggi dibandingkan bambu jenis lain.

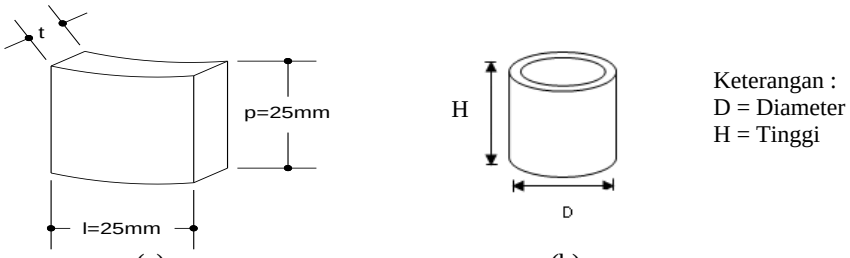
Pengawetan merupakan upaya yang dilakukan untuk meningkatkan durabilitas bambu Petung sebagai bahan konstruksi. Metode pengawetan bambu secara tradisional dilakukan dengan cara perendaman batang bambu di kolam atau di sungai. Metode ini memerlukan waktu yang lama sekitar 3 - 6 bulan sehingga untuk kebutuhan bambu yang banyak atau produksi dalam jumlah besar memerlukan waktu yang lama atau media rendaman yang luas (Masdar, dkk, 2023).

Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sifat fisik dan sifat mekanik bambu Petung dengan dilakukan pengawetan dan tanpa dilakukan pengawetan. Hasil penelitian dijadikan referensi dalam pembuatan bambu laminasi yang digunakan sebagai material dalam pumbuatan dinding non struktural. Hasil penelitian bisa juga dijadikan sebagai referensi dalam perencanaan struktur konstruksi yang menggunakan bahan bambu sehingga dapat mendorong masyarakat dalam menggunakan bambu sebagai bahan material pilihan dengan dukungan data dan penelitian terkait material bambu.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium. Ada dua tahapan dalam penelitian ini yaitu tahapan pengujian sifat fisik bambu dan tahapan pengujian sifat mekanik bambu untuk berbagai macam variasi benda uji. Pada tahapan pengujian sifat fisik bambu dilakukan pengujian kadar air bambu dan kerapatan bambu terhadap nodia dan internodia untuk bambu yang diawetkan dan bambu tanpa pengawetan. Pada pengujian sifat mekanik dilakukan pengujian kuat geser terhadap nodia dan internodia pada bambu tanpa pengawetan dan dengan pengawetan. Sebelum pengujian, pada bambu dengan pengawetan terlebih dahulu diawetkan menggunakan metode gravitasi, sebagaimana tercantum dalam SNI 8909 2020. Pengawet yang digunakan adalah Borax dan Boric Acid. Pengawetan yang dilakukan terhadap Bambu Petung dengan kosentrasi larutan sebesar 5%. Pengontrolan konsentrasi larutan pengawet dilakukan dengan menggunakan alat Hidrometer.

Pembuatan benda uji sifat fisik dan benda uji sifat mekanik dibuat menurut Standard ISO N22157- 1:2004. Bagian bambu petung yang diambil untuk pengujian sifat fisik dan sifat mekanik yaitu *internodia* dan *nodia*. Jumlah benda uji untuk masing-masing variasi adalah 10 benda uji dengan jumlah total benda uji sebanyak 80 buah benda uji. Ukuran benda uji untuk keperluan pengujian dengan bentuk spesimen seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk dan Ukuran Benda Uji a) Kadar air dan kerapatan b) Kuat geser

Pengujian benda uji sifat fisik dan benda uji sifat mekanik dilakukan berdasarkan Standar ISO N22157- 2:2004. Pengujian geser dilakukan menggunakan alat uji tekan *(compression testing machine).* Perhitungan nilai kadar air dan kerapatan pada Bambu Petung dilakukan menggunakan rumusan yang tercantum dalam ISO N22157.2 sebagaimana disajikan pada Persamaan (1) dan Persamaan (2)

$$Mc = \frac{M-Mo}{Mo} \text{ x } 100\% \quad (1)$$

dengan Mc = kadar air, M = berat sebelum di oven dan Mo = berat setelah di oven

$$\rho = \frac{Mo}{V} \text{ x } 100\% \quad (2)$$

dengan ρ = berat jenis, Mo = berat setelah di oven dan V = volume sebelum di oven

Untuk kuat tekan geser Bambu Petung dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3) berdasarkan prosedur ISO N22157-1:2004

$$\tau\ ult = \frac{P}{\sum(t\ x\ h)} \quad (3)$$

Dengan $\tau\ ult$ = tegangan geser, P = beban maksimum, t = tebal benda uji dan h = tinggi benda uji

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kadar Air dan Kerapatan

Pengujian kadar air dan kerapatan Bambu Petung dilakukan pada bambu yang tidak diawetkan dan pada bambu diawetkan baik pada daerah nodia/ruas maupun pada daerah inter nodia/ antar ruas sebagaimana yang disajikan pada Gambar 3. Hasil Pengujian kadar air dan kerapatan bambu Petung dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2

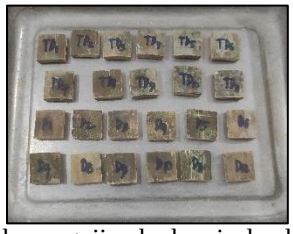
Tabel 1. Rata-rata Kadar Air Bambu Petung

Posisi pada batang	Kadar Air (%)

bambu	Tanpa pengawet	Dengan pengawet	Peningkatan kadar air (%)
Nodia	13,95	14,12	1,22
Internodia	13,43	13,80	2,76

Tabel 2. Rata-rata Kerapatan Bambu Petung

Posisi pada batang bambu	Kerapatan (%)		
	Tanpa pengawet	Dengan pengawet	Peningkatan kerapatan (%)
Nodia	0,96	1,04	8,33
Internodia	0,88	0,98	11,36



Gambar 3. Spesimen pada pengujian kadar air dan kerapatan pada bambu Petung

Hasil pengujian kadar air dan kerapatan bambu dihitung berdasarkan persamaan (1) dan (2). Dari hasil pengujian sifat fisik diketahui kadar air pada daerah nodia lebih tinggi daripada kadar air pada daerah internodia untuk masing-masing kondisi baik dengan pengawetan dan tanpa pengawetan. Nilai kadar air bambu bila dibandingkan dengan pengawetan dan tanpa pengawetan mengalami peningkatan pada bambu dengan pengawetan dengan besaran nilai kenaikan 1,22% pada daerah nodia dan 2,76 % pada daerah internodia.
Nilai kerapatan bambu pada daerah nodia lebih besar dari kerapatan bambu pada daerah internodia untuk masing-masing kondisi dengan pengawetan maupun tanpa pengawetan. Nilai kerapatan bambu bila dibandingkan dengan pengawetan dan tanpa pengawetan mengalami peningkatan pada bambu dengan pengawetan dengan besaran nilai kenaikan 8,33% pada daerah nodia dan 11,36% pada daerah internodia. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis diketahui bahwa pengawetan mempengaruhi kerapatan bambu dimana bambu dengan pengawetan mempunyai kerapatan yang lebih tinggi dari pada bambu tanpa diawetkan terlebih dahulu.

3.2 Kuat Geser Bambu Petung

Pengujian kuat geser sejajar serat pada Bambu Petung dilakukan untuk mengetahui kemampuan bahan menahan gaya akibat beban yang bekerja dan akibat pengawetan bambu. Pengujian dilakukan sampai beban maksimum (P_{ult}) sebagaimana disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian Kuat Geser Bambu

Hasil pengujian kuat geser sejajar serat dihitung berdasarkan persamaan (3), sedangkan hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rata-rata Kuat Geser Bambu Petung

Posisi pada batang bambu	Kuat Geser (MPa)		
	Tanpa pengawet	Dengan pengawet	Peningkatan kuat tekan (%)
Nodia	8,06	10,09	25,19
Internodia	7,41	9,50	28,21

Nilai kuat geser rata-rata untuk bambu yang diawetkan pada daerah nodia maupun daerah internodia sebagaimana yang disajikan pada Tabel 3 menunjukan adanya peningkatan. Nilai kuat geser rata-rata Bambu Petung pada daerah nodia atau ruas adalah sebesar 8,06 MPa untuk bambu yang tidak diawetkan sedangkan setelah dilakukan pengawetan nilai kuat geser rata-rata pada daerah nodia menjadi 10,09 MPa yaitu meningkat sebesar 25,19%. Peningkatan nilai kuat geser ini juga terjadi pada Bambu Petung pada daerah internodia atau antar ruas. Hasil analisis menunjukkan nilai rata-rata kuat geser Bambu Petung pada daerah internodia adalah sebesar 7,41 MPa dimana nilai rata-rata Bambu Petung untuk bambu yang diawetkan pada daerah internodia adalah sebesar 9,50 MPa atau meningkat sebesar 28,21%. Nilai kuat geser akibat dilakukannya pengawetan pada Bambu Petung baik pada daerah nodia maupun internodia mengalami peningkatan sebagaimana terjadi pada penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Masdar, dkk (2023) pada pengujian kuat tekan Bambu Petung yang diawetkan. Peningkatan yang terjadi pada daerah internodia lebih besar dari pada daerah nodia meskipun perbedaannya relatif kecil. Bentuk kerusakan pada benda uji kuat geser pada nodia dan internodia disajikan pada Gambar 5.



(a) Kerusakan pada bagian nodia (b) Kerusakan pada bagian internodia

Gambar 5. Kerusakan setelah dilakukan Pengujian Kuat Geser

Kerusakan yang terjadi pada bagian nodia adalah berupa retak-retak kecil yang terjadi karena gaya geser yang diterima oleh bambu terhalang oleh keberadaan nodia sehingga benda uji tidak terbelah. Berbeda dengan nodia kerusakan yang terjadi pada bagian internodia adalah retak vertikal searah serat yang diawali pada posisi beban sampai kebagian tumpuan. Kerusakan terjadi sampai bambu terbelah atau terpisah dari bagian lainnya. Pecahan yang terjadi sesuai dengan banyaknya posisi beban pada benda uji yaitu ada empat titik beban.
Berdasarkan perilaku kerusakan yang terjadi pada benda uji dapat diketahui keberadaan nodia dapat berpengaruh terhadap kerusakan geser bambu Petung.

4. KESIMPULAN

Pengawetan yang dilakukan pada bambu Petung berpengaruh terhadap kerapatan dan kuat geser bambu. Terjadi peningkatan kadar air dan kerapatan pada bambu Petung baik pada daerah nodia maupun pada daerah internodia pada bambu yang diawetkan bila dibandingkan dengan tanpa pengawetan. Kadar air pada bambu Petung mengalamai kenaikan sebesar 1,22% pada daerah nodia/ruas dan 2,76 % pada daerah internodia atau antar ruas. Kerapatan Bambu Petung mengalami kenaikan 8,33% pada daerah nodia dan 11,36% pada daerah internodia. Kuat geser pada Bambu Petung baik pada daerah nodia maupun pada daerah internodia masing masing sebesar 25,19% untuk daerah nodia dan pada daerah internodia atau antar ruas terjadi peningkatan kuat geser Bambu Petung sebesar 28,21%. Dapat disimpulkan bahwa selain untuk meningkatkan daya tahan bambu, proses pengawetan pada Bambu Petung dapat meningkatkan kekuatan geser Bambu Petung.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih atas pendanaan penelitian ini oleh Kementrian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi (Kemenristekdikti) Tahun Anggaran 2024 dan juga semua pihak-pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Irawati, IS., Saputra A., 2012, Analisis Statistik Sifat Mekanika bambu Petung. Simposium Nasional Rekayasa dan Budidaya Bambu (Sinar Bambu).UGM. Yogyakarta. pp. 60-65

Junnaidy, R., Masdar, A.D., Marta and Masdar, A., 2017, Penggunaan serat bambu pada campuran beton untuk meningkatkan daktalitas pada keruntuhan beton, seminar nasional strategi pengembangan infrastruktur ke-3 (SPI-3), 131-135.

Masdar, A., Pilko Sakiko, Ronny Junaidy, Anita Dewi Masdar, 2023, Pengaruh Pengawetan terhadap Kuat Geser Bambu Petung (Dendrocolamus Asper), Buletin Civil Engineering Vol.3 No.2, Agustus 2023, 1-6

Masdar, Suhendro., B, Siswosukarto, S., Sulistyo., J, 2014, Determinant of Critical Distance of Bolt on Bamboo Connection, *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)*, Volume 69:6, 111–115.

Masdar, A., Noviarti and Zufrimar, 2016, Penggunaan penghubung geser dari ranting bambu sebagai upaya untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan balok bambu susun, Jurnal Ipteks Terapan Research of Applied Science and Education V10.i1, 66-70

Masdar, A., Junnaidy, R., Miharti, I., dan Masdar, A. D., 2018 , Peningkatan kekuatan tarik beton berserat menggunakan serat bagian dalam bambu, Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 12, MT101-107

Masdar, A., Siswosukarto, S., Noviarti and Suryani, D., Implementation of Connection System of Wooden Plate and Wooden Clamp on Joint Model of Bamboo Truss Structure. International Journal of GEOMATE, Vol. 17, Issue 59, 2019, 15-20

Masdar, A., Noviarti, Suhendro, B, Siswosukarto, S and Joko Sulistyo, 2019, Elastic Behavior of Connection System with Addition of Wooden Clamp on Bamboo Truss Structure, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) ISSN: 2277-3878, 7(6S5), 999-1004.

Purwanto, D. 2011. Pembuatan Balok dan Papan dari Limbah Industri Kayu. Balai Riset dan Standarisasi Industri Banjarbaru. Jurnal Riset Industri. Vol. 5. 13-20

Widodo. 2012. Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan. Pustaka Belajar

ANALISIS VARIASI DESAIN PENAMPANG FONDASI DALAM TERHADAP EFISIENSI PELAKSANAAN (STUDI KASUS: GEDUNG POLIKLINIK RSUP PROF. DR. I.G.N.G. NGOERAH)

I Made Aryatirta Predana*, Made Dodiek Wirya Ardana, dan I Gede Yogi Gangga Purnawardana

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana,
Jl. Raya Kampus Unud Jimbaran, Badung, Bali
***e-mail**:aryatirta@unud.ac.id*

ABSTRAK

Pada konstruksi bangunan, fondasi memiliki peran penting dalam menahan dan meneruskan beban struktur di atasnya ke tanah dengan daya dukung yang memadai. Namun, perencanaan fondasi yang baik tidak hanya mempertimbangkan daya dukung, tetapi juga aspek efisiensi metode pelaksanaannya. Pada kenyataannya, faktor efisiensi ini sering terabaikan dalam praktik lapangan, mengakibatkan perencanaan yang tidak optimal. Berdasarkan hal tersebut, dilakukan analisis alternatif desain fondasi untuk dibandingkan dengan desain fondasi eksisting, baik dari segi keamanan maupun efisiensi pelaksanaannya. Studi ini dilakukan di Proyek Pembangunan Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah yang merupakan bangunan dengan struktur beton bertulang dengan lima lantai utama dan satu lantai basemen. Metode pelaksanaan instalasi tiang dibandingkan antara menggunakan *hydraulic jack-in* dan *drop hammer*. Hasil desain menunjukkan bahwa tipe fondasi eksisting (PE12 400) memiliki daya dukung tiang kelompok yang tinggi sebesar 9201,08 kN, namun memerlukan waktu instalasi tiang selama 37,25 menit dan produktivitas sebesar 3,74 m/menit. Dari berbagai alternatif, fondasi persegi tipe PP6 500 mampu menahan beban aksial dan lateral dengan memiliki daya dukung aksial sebesar 7262,27 kN dan lateral sebesar 1023,48 kN. Selain itu, fondasi tipe ini memerlukan waktu instalasi tiang selama 19,25 menit dan produktivitas 3,74 m/menit. Hal ini menjadikan fondasi persegi tipe PP6 500 sebagai alternatif terbaik untuk pemilihan tipe fondasi pada studi kasus ini.

Kata kunci: fondasi tiang, penampang, daya dukung, metode pelaksanaan, efisiensi

1. PENDAHULUAN

Fondasi sebagai struktur bawah berfungsi untuk menanggung dan menyalurkan beban yang diakibatkan beratnya sendiri maupun beban bangunan yang ada di atasnya ke dalam tanah. Dalam penerapannya, ada dua macam fondasi yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam. Fondasi dangkal dapat digunakan apabila kedalaman tanah keras tidak terlalu jauh dari permukaan tanah. Sedangkan fondasi dalam digunakan apabila tanah yang ada di bawah bangunan tidak memiliki kapasitas yang cukup guna menanggung beban beratnya sendiri dan bangunan di atasnya, atau tanah keras yang memiliki daya dukung yang mampu memikul beban letaknya cukup dalam.

Pemilihan jenis fondasi dalam pada proyek pembangunan gedung poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah di Denpasar didasarkan pada beberapa faktor, seperti lokasi proyek, kondisi geografis dan tanah pada lokasi, fungsi bangunan, jumlah tingkat gedung, beban yang bekerja, dan kemudahan pelaksanaan di lapangan. Gedung ini memiliki desain struktur beton bertulang yang terdiri dari lima lantai utama yang digunakan sebagai pelayanan kesehatan dan satu lantai basemen yang digunakan sebagai parkir untuk kendaraan roda dua. Selain mempertimbangkan bahwa gedung ini merupakan fasilitas kesehatan yang sangat vital bagi masyarakat, perencanaan dan pembuatan struktur bawah harus dilakukan secara hati-hati. Hal ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kegagalan struktur pada gedung tersebut. Kondisi tanah yang ada di bawah gedung ini berjenis lempung berpasir dan memiliki kapasitas daya dukung tanah yang tidak terlalu tinggi. Oleh karena itu, dipilihlah jenis fondasi dalam, yaitu fondasi tiang, yang akan menyalurkan tegangan yang ditimbulkan oleh beban struktur atas ke dalam lapisan tanah keras yang mampu menopang gedung beserta bebannya. Dalam proses pemilihan fondasi tiang, dibutuhkan analisis dan perancangan untuk mengetahui daya dukung dari setiap jenis fondasi. Adapun variasi penampang yang akan dianalisis dan dibandingkan efisiensi pelaksanaannya dengan desain eksisting yakni penampang persegi, lingkaran dan segitiga.

2. KAJIAN PUSTAKA

Daya Dukung Fondasi Dalam (Tiang)

Menurut Bowles (1997), fondasi dalam meliputi tiang pancang, tembok atau tiang yang dibor, serta kaison yang dibor hingga kedalaman D/B ≥ 4. Daya dukung dari fondasi tiang dapat diestimasi dengan memanfaatkan nilai SPT yang diperoleh dari pengujian tanah di lokasi proyek. Untuk menghitung kapasitas tiang berdasarkan nilai SPT, digunakan persamaan (1) dan (2) berikut ini (Das, 2016).

$$Q_u = Q_P + Q_s \quad (1)$$

$$Q_{ijin} = Q_u/FS \quad (2)$$

Dengan Q_u = kapasitas tiang tunggal (kN), Q_{ijin} = daya dukung ijin fondasi tiang tunggal (kN), Q_P = tahanan ujung tiang (kN), Q_s = tahanan friksi tiang (kN), dan FS = faktor keamanan yang diambil minimal 2,50 (SNI 8460:2017).

Daya dukung kelompok tiang dapat dihitung menggunakan persamaan (3) sebagai berikut.

$$Q_{g(all)} = E_f \times n \times Q_{ijin} \quad (3)$$

Dengan $Q_{g(all)}$ = daya dukung ultimit fondasi tiang kelompok (kN), E_f = efisiensi tiang, dan n = jumlah tiang (kN).

Daya Dukung Horizontal (Lateral), Defleksi dan Rotasi Tiang

Estimasi nilai daya dukung arah horizontal (lateral) pada fondasi tiang dapat dianalisis berdasarkan data fisik fondasi dan parameter tanah, dengan menerapkan prinsip-prinsip mekanika. Tahanan lateral fondasi tiang dapat ditentukan menggunakan metode Broms seperti persamaan (4) dan (5) berikut ini.

$$R = \sqrt[4]{\frac{El}{K_h \times d}} \quad (4)$$

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p l_p}{n_h}} \quad (5)$$

Dengan l_p = momen inersia tiang (m^4), E_p = modulus elastisitas tiang (kN/m^2), n_h = koefisien modulus variasi (kN/m^3), K_h = modulus reaksi subgrade (kN/m^3), d = diameter tiang (m), R = faktor atau koefisien kekakuan R, dan T = faktor atau koefisien kekakuan T.

Beban lateral dari tiang pendek serta momen yang terjadi di kepala tiang didapatkan dengan persamaan (6) dan (7) berikut ini.

$$H_u = \left(\frac{3}{2}\right) \gamma\ d\ L^2\ Kp \quad (6)$$

$$M_{maks} = \left(\frac{2}{3}\right) H_u L = \gamma\ d\ L^3\ Kp \quad (7)$$

Jika kondisi tiang panjang dan M_{maks} lebih besar daripada M_y, maka nilai H_u dapat dihitung dengan persamaan (8), (9) dan (10) sebagai berikut.

$$H_u = 2\frac{My}{\left(e + \frac{2f}{3}\right)} \quad (8)$$

$$M_y = \left(\frac{1}{2}\right) y\ d\ L^3\ Kp - H_u L \quad (9)$$

$$f = 0{,}82\sqrt{\frac{H_u}{d\ Kp\ \gamma}} \quad (10)$$

Dengan H_u = gaya lateral ultimit (kN), K_p = koefisien tanah pasif yang dapat dicari menggunakan perhitungan korelasi dengan nilai N-SPT (Das, 2009), γ = berat volume tanah (kN/m^3), e = jarak beban ke muka tanah (m), d = diameter tiang (m), M_y = momen tahanan bahan tiang (kN.m), dan f = jarak ke titik gaya lintang sama dengan nol (m).

Defleksi yang terjadi pada tiang dapat ditoleransi hingga sebesar 12 mm. Sementara itu, rotasi tiang terhadap posisi/arah sumbu mayor yang dirancang diharapkan tidak lebih dari 10° (setara dengan 1:6 atau 15%). Dalam hubungannya dengan metode Broms, tiang yang tertanam dalam tanah granuler dikaitkan dengan koefisien untuk tanah granuler seperti persamaan (11).

$$\alpha = \left[\frac{n_h}{Ep\ Ip}\right]^{1/5} \quad (11)$$

Tiang ujung bebas dan jepit berkelakuan seperti tiang pendek, bila αL < 2 dengan besarnya defleksi, maka perhitungan defleksi dan rotasi untuk tiang ujung jepit ditunjukkan oleh persamaan (12) dan (13).

$$y_0 = \frac{2H}{L^2 n_h} \tag{12}$$

$$\theta = \frac{1{,}6\ H_e}{(n_h)^{2/5}(Ep\ Ip)^{3/5}} + \frac{1{,}7\ H_e}{(n_h)^{1/5}(Ep\ Ip)^{4/5}} \tag{13}$$

Dengan α = koefisien untuk tanah granuler, n_h = koefisien variasi modulus, I_p = inersia penampang tiang (cm^4), e = jarak gaya H ke muka tanah (cm), L = panjang tiang tertanam tanah (cm), H = gaya lateral diijinkan (kg), y_0 = defleksi (mm), dan θ = rotasi tiang.

3. METODOLOGI DAN DATA PENELITIAN

Data perencanaan struktur Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Perencanaan Gedung

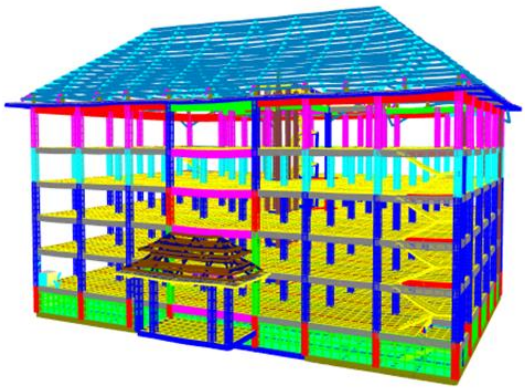
Parameter	Keterangan
Jenis pemanfaatan Gedung	Rumah sakit
Jumlah lantai struktur	5 lantai dan 1 basement
Tinggi basemen	3,50 m
Tinggi lantai 1	5,00 m
Tinggi lantai 2-4	4,50 m
Tegangan leleh baja tulangan (fy)	420 MPa
Berat volume baja (γ_s)	7.850 kg/m^3
Modulus clastisitas baja (E_s)	200.000 MPa
Berat volume beton bertulang (γ_c)	2.400 kg/m^3
Kuat tekan beton (f'$_c$) untuk struktur gedung	30 MPa
Kuat tekan beton (f'$_c$) untuk tiang fondasi	41,5 MPa
Modulus elastisitas beton struktur (E_c)	25.742 MPa
Modulus elastisitas beton fondasi (E_c)	30.278 Mpa

Dimensi elemen struktur Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi Elemen Struktur

Jenis Struktur	Dimensi (mm)
Kolom (K1A, K1B, K1C, K1D, K1E)	600 x 600
Balok	B1 400 x 800
	B1a 400 x 1300
	B2 300 x 600
	B2A 300 x 600
	B2Aa 300 x 1100
	B3 300 x 500
	B4 250 x 400
	B5 200 x 300
Pelat	S130: 130
	S150: 150
	S250: 250
Retaining Wall	200
Tie Beam	TB1 300 x 600
	TB2 300 x 500
	TB3 250 x 400

Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah dimodelkan pada software SAP2000 dengan memasukan data-data struktur dan pembebanan yang telah dihimpun. Model dapat dilihat pada Gambar 1. Setelah dilakukan pemodelan dan pembebanan, dilanjutkan dengan melakukan analisis untuk mendapatkan gaya-gaya dalam serta perhitungan kapasitas fondasi tiang tunggal dan tiang kelompok. Variasi penampang persegi, lingkaran dan segitiga dianalisis dan dibandingkan kapasitas tiangnya dengan fondasi eksisting, lalu ditentukan beberapa kombinasi tiang kelompok dengan variasi penampang yang memiliki kapasitas dengan efisiensi pelaksanaan paling optimum.



Gambar 1. Model Gedung menggunakan Software SAP2000

4. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal dan Kelompok Tiang

Dari hasil analisis dan pemodelan struktur pada software SAP2000, didapatkan data dengan gaya yang terbesar yaitu:

P = 5390,12 kN

Mx = 0,18 kN.m

My = 17,49 kN.m

Hu = 13,43 kN

Perhitungan fondasi tiang tunggal dilakukan untuk mengetahui daya dukung tiang tunggal pada tiap jenis fondasi dengan faktor keamanan sebesar 3,00. Rekapitulasi hasil analisis daya dukung tiang tunggal dengan berbagai bentuk variasi penampang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Tunggal Dengan Variasi Penampang

Bentuk	D (m)	P (kN)	Q_{all} (kN)	Kontrol
Persegi	0,30	5390,12	664,20	Not OK
	0,40	5390,12	1.049,60	Not OK
	0,50	5390,12	1.517,00	Not OK
Lingkaran	0,30	5390,12	521,87	Not OK
	0,40	5390,12	824,69	Not OK
	0,50	5390,12	1.191,93	Not OK
Segitiga	0,30	5390,12	405,90	Not OK
	0,40	5390,12	579,26	Not OK
	0,50	5390,12	691,61	Not OK

Sesuai hasil analisis pada Tabel 3, daya dukung tiang tunggal persegi memiliki daya dukung paling besar dibandingkan tiang tunggal tipe lingkaran maupun segitiga. Nilai daya dukung terbesar yaitu 1.517,00 kN pada penampang persegi dengan panjang sisi 500 mm sedangkan yang terkecil yaitu 405,90 kN pada penampang segitiga dengan panjang sisi 300 mm. Dari hasil analisis tersebut, penggunaan tiang tunggal pada struktur gedung ini tidak direkomendasikan karena daya dukung yang diperoleh belum mampu menahan beban struktur atas. Oleh karena itu, perlu diperhitungkan penggunaan fondasi dalam tiang kelompok.

Pada fondasi tiang kelompok, hal yang perlu diperhitungkan dalam analisis yaitu daya dukung aksial, lateral, defleksi dan rotasi pada tiang kelompok. Hasil dari analisis perhitungan dengan variasi penampang persegi, lingkaran dan segitiga ditunjukkan pada Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6. Desain fondasi eksisting merupakan tipe PE12 400 dengan bentuk penampang persegi berukuran sisi 400 mm sebanyak 12 buah tiang. Daya dukung fondasi tiang kelompok eksisting ini sebesar 9201,08 kN, sehingga variasi penampang yang dipilih adalah yang mendekati daya dukung tersebut.

Tabel 4. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Kelompok Penampang Persegi

Tipe	PP6 300	PP6 400	PP6 500	PP9 300	PP9 400	PP9 500	PP12 300	PE12 400	PP12 500
n (bh)	6	6	6	9	9	9	12	12	12
D (mm)	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Pu (kN)	5589,41	5750,34	5962,24	5691,65	5935,40	6256,54	5800,93	6208,13	6550,84
$Q_{g(all)}$ (kN)	3179,70	5024,71	7262,27	4501,13	7112,89	10280,35	5822,56	9201,08	13298,44
Kontrol	No	No	Oke	No	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Hu (kN)	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43
Hg (kN)	310,76	608,07	1.023,48	466,15	912,11	1.535,22	621,53	1.216,14	2.046,96
Kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
yo (mm)	0,0014	0,0009	0,0006	0,0014	0,0009	0,0006	0,0014	0,0009	0,0006
yo maks (mm)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Ø (º)	0,1194	0,0597	0,0349	0,1194	0,0597	0,0349	0,1194	0,0597	0,0349
Ø maks (º)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke

Tabel 5. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Kelompok Penampang Lingkaran

Tipe	PL6 300	PL6 400	PL6 500	PL9 300	PL9 400	PL9 500	PL12 300	PL12 400	PL12 500
n (bh)	6	6	6	9	9	9	12	12	12
D (mm)	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Pu (kN)	5942,29	5741,66	5953,83	6182,03	5848,22	6120,32	6447,74	6004,21	6369,21
$Q_{g(all)}$ (kN)	2498,33	3947,99	5706,07	3536,60	5588,70	8077,42	4574,87	7229,42	10448,77
Kontrol	No	No	No	No	No	Oke	No	Oke	Oke
Hu (kN)	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43
Hg (kN)	218,43	427,40	719,39	327,65	641,11	1.079,08	436,86	854,81	1.438,77
Kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
yo (mm)	0,0018	0,0011	0,0008	0,0018	0,0011	0,0008	0,0018	0,0011	0,0008
yo maks (mm)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Ø (º)	0,1642	0,0821	0,0480	0,1642	0,0821	0,0480	0,1642	0,0821	0,0480
Ø maks (º)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke

Tabel 6. Rekapitulasi Daya Dukung Tiang Kelompok Penampang Segitiga

Tipe	PT6 300	PT6 400	PT6 500	PT9 300	PT9 400	PT9 500	PT12 300	PT12 400	PT12 500
n (bh)	6	6	6	9	9	9	12	12	12
D (mm)	300	400	500	300	400	500	300	400	500
Pu (kN)	5640,26	5792,30	5906,64	5666,22	5841,74	5973,39	5692,18	5891,18	6070,27
$Q_{g(all)}$ (kN)	1943,15	2773,05	3310,91	2750,69	3925,48	4686,87	3558,23	5077,92	7125,56
Kontrol	No	No	No	No	No	No	No	No	Oke
Hu (kN)	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43	13,43
Hg (kN)	94,12	152,02	200,10	141,17	228,03	300,15	188,23	304,04	511,74
Kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
yo (mm)	0,0028	0,0018	0,0015	0,0028	0,0018	0,0015	0,0028	0,0018	0,0012
yo maks (mm)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke
Ø (º)	0,3225	0,1611	0,1213	0,3225	0,1611	0,1213	0,3225	0,1611	0,0941
Ø maks (º)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
kontrol	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke	Oke

Keterangan:
= Alternatif
= Eksisting

Dari hasil analisis, didapatkan 5 tipe tiang kelompok terbaik dengan variasi penampang yaitu bentuk persegi (PP6 500 dan PP9 400), bentuk lingkaran (PL9 500 dan PL12 400), serta bentuk segitiga (PT12 500). Daya dukung terbesar didapat pada tipe PL9 500 sebesar 8.077,42 kN sedangkan yang terkecil adalah tipe PP9 400 sebesar 7.112,89 kN. Berdasarkan perhitungan daya dukung lateral, semua tipe fondasi mampu menahan gaya horizontal. Begitu juga pada perhitungan defleksi dan rotasi yang diakibatkan oleh gaya horizontal kurang dari batas maksimum yang bisa diterima oleh fondasi. Maka dari itu, semua tipe fondasi memenuhi syarat daya dukung lateral, defleksi dan rotasi.

Penulangan tiang dihitung berdasarkan gaya yang disebabkan oleh pengangkatan menggunakan alat pada saat instalasi tiang berlangsung (Sardjono, 1988). Tulangan tiang yang dianalisis sebatas tiang yang memenuhi syarat daya dukung yaitu tiang alternatif dan eksisting. Tulangan pada *pile cap* juga diperhitungkan menggunakan metode geser satu arah dan dua arah. Setelah didapatkan, selanjutnya dikontrol terhadap kapasitas geser dam momen yang terdapat pada *pile cap.*

Efisiensi Pelaksanaan Instalasi Tiang

Metode pelaksanaan instalasi tiang menggunakan *hydraulic jack-in* dan *drop hammer* adalah dua metode yang umum

digunakan. Pemilihan metode ini dipertimbangkan berdasarkan dua faktor utama, yaitu waktu dan biaya sewa, serta kondisi lingkungan proyek. Metode *hydraulic jack-in* bekerja dengan cara menekan tiang ke dalam tanah menggunakan dongkrak hidraulis yang diberi beban penyeimbang (*counterweight*). Metode *diesel drop hammer* adalah proses memasukan tiang pancang ke dalam tanah dengan cara memukulnya menggunakan palu (*hammer*) yang diberi bantalan di atas kepala tiang. Hasil analisis perbandingan dua metode pelaksanaan instalasi tiang ditunjukkan pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Analisis Efisiensi Waktu dan Produktivitas menggunakan Metode *Hydraulic Jack-In*

Pembanding	PE12 400	PP6 500	PP9 400	PL9 500	PL12 400	PT12 500
Jarak antar fondasi (m)	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,25
Kecepatan mobilisasi alat (m/menit)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Waktu mobilisasi alat (menit)	9,17	5,21	6,67	8,33	9,17	11,46
Panjang tiang (m)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Jumlah tiang	12,00	6,00	9,00	9,00	12,00	12,00
Kecepatan alat memancang (m/menit)	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Waktu pemancangan (menit)	24,00	12,00	18,00	18,00	24,00	24,00
Ikat tiang pancang (menit)	4,08	2,04	3,06	3,06	4,08	4,08
Total waktu instalasi (menit)	37,25	19,25	27,73	29,39	37,25	39,54
Total panjang tiang (m)	144,00	72,00	108,00	108,00	144,00	144,00
Jumlah alat (unit)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Produktivitas (m/menit)	3,87	3,74	3,90	3,67	3,87	3,64

Tabel 8. Analisis Efisiensi Waktu dan Produktivitas menggunakan Metode *Drop Hammer*

Pembanding	PE12 400	PP6 500	PP9 400	PL9 500	PL12 400	PT12 500
Jarak antar fondasi (m)	1,00	1,25	1,00	1,25	1,00	1,25
Kecepatan mobilisasi alat (m/menit)	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03	2,03
Waktu mobilisasi alat (menit)	5,42	3,08	3,94	4,93	5,42	6,77
Panjang tiang (m)	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00	12,00
Jumlah tiang	12,00	6,00	9,00	9,00	12,00	12,00
Kec. alat memancang (m/menit)	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35
Waktu pemancangan (menit)	556,20	278,10	417,15	417,15	556,20	556,20
Ikat tiang pancang (menit)	15,60	7,80	11,70	11,70	15,60	15,60
Angkat tiang pancang (menit)	18,00	9,00	13,50	13,50	18,00	18,00
Penyesuaian dudukan tiang (menit)	28,80	14,40	21,60	21,60	28,80	28,80
Penyetelan vertikal tiang (menit)	6,72	3,36	5,04	5,04	6,72	6,72
Total waktu instalasi (menit)	630,74	315,74	472,93	473,92	630,74	632,09
Total panjang tiang (m)	144,00	72,00	108,00	108,00	144,00	144,00
Jumlah alat (Unit)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Produktivitas (m/menit)	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23

Dari hasil analisis pada Tabel 7 dan Tabel 8, metode *hydraulic jack-in* lebih menguntungkan dalam pelaksanaan instalasi tiang karena memiliki waktu yang lebih singkat dan produktivitas yang lebih besar dibandingkan dengan metode *drop hammer*. Selain itu, metode *drop hammer* memiliki tingkat kebisingan yang lebih tinggi daripada metode *hydraulic jack-in* dan kemungkinan besar akan merusak bangunan di sekitarnya akibat dari getaran yang dihasilkan alat tersebut. Maka dari itu, metode *hydraulic jack-in* lebih disarankan untuk digunakan dalam proses instalasi tiang. Dari kelima tipe fondasi yang menggunakan metode *hydraulic jack-in*, tipe PP6 500 memiliki waktu instalasi paling cepat yakni 19,25 menit. Sedangkan produktivitas yang paling besar ada pada tipe PP9 400 yaitu sebesar 3,90 m/menit.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan perhitungan fondasi tiang kelompok, fondasi eksisting (PE12 400) memiliki daya dukung paling besar yaitu sebesar 9201,08 kN dibandingkan dengan kelima variasi desain penampang fondasi yang telah memenuhi syarat, dimana daya dukung terbesarnya adalah sebesar 8.077,42 kN yaitu fondasi tipe PL9 500. Variasi desain penampang memberikan daya dukung yang berbeda-beda, menyesuaikan dengan geometri penampang, jumlah tiang serta daya dukung yang dihasilkan untuk menahan beban. Adanya variasi desain penampang ini juga berpengaruh pada efisiensi metode pelaksanaan dan nilai produktivitas.

Berdasarkan analisis efisiensi metode pelaksanaan instalasi tiang fondasi berupa *hydraulic jack-in*, didapatkan hasil analisis bahwa alternatif fondasi tipe PP6 500 memiliki total waktu instalasi yang lebih cepat dibandingkan tipe lainnya yakni 19,25 menit dengan produktivitasnya yaitu 3,74 m/menit. sedangkan tipe eksisting (PE12 400) membutuhkan waktu instalasi selama 37,25 menit dengan produktivitas sebesar 3,87 m/menit. Hal ini disebabkan karena tipe PP6 500 memiliki jumlah tiang yang paling sedikit dibandingkan dengan alternatif variasi lainnya. Dari hasil perbandingan dan analisis yang telah dilakukan, fondasi tiang pancang berpenampang persegi tipe PP6 500 dapat dijadikan sebagai alternatif pemilihan fondasi pada struktur Gedung Poliklinik RSUP Prof. Dr. I.G.N.G. Ngoerah.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standarisasi Nasional. SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik. www.bsn.go.id
Bowles, J. E. (1997). Analisis dan Desain Pondasi-Bowles (4th ed.).
Das, B. M. (2009). Principles of Geotechnical Engineering, 7th Edition.
Das, B. M. (2016). Principles of Foundation Engineering.
Sardjono, H. (1988). Pondasi Tiang Pancang Jilid 1.

APLIKASI METODE KEKAKUAN UNTUK MENGHITUNG DISTRIBUSI GAYA TIANG FONDASI DENGAN MODEL KEPALA TIANG KAKU

Yoyong Arfiadi[1*] dan Richard Frans[2]

[1]Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari no 44, Yogyakarta*
***e-mail**: yoyong.ar@uajy.ac.id*
[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang no 23, Makassar
e-mail: richardfrans.rf@gmail.com

ABSTRAK

Pada gedung bertingkat tinggi atau jembatan, umum digunakan fondasi tiang yang disatukan dengan kepala tiang (*pile cap*) untuk mendukung beban bangunan pada kolom tertentu. Jika beban yang bekerja, baik gaya aksial maupun momen, nilainya besar maka diperlukan lebih dari 1 tiang. Untuk menentukan kapasitas dan gaya yang dapat didukung oleh tiang, akibat gaya aksial dan momen dari struktur atas, dapat diturunkan berdasarkan prinsip-prinsip metode kekakuan. Hubungan antara perpindahan pada koordinat lokal dan global diperoleh dengan suatu matriks transformasi dengan menganggap kepala tiang (pur) sebagai elemen yang kaku. Selanjutnya dengan matriks transformasi ini, matriks kekakuan kelompok tiang dapat diperoleh dengan menganggap masing-masing mempunyai kekakuan pegas aksial sebagai kekakuan dalam sumbu lokal. Dengan anggapan ini maka hubungan antara gaya dan perpindahan global tiang dapat diperoleh, sehingga gaya-gaya pada masing-masing tiang akhirnya dapat ditentukan.

Kata kunci: gaya pada tiang, kelompok tiang, distribusi gaya, fondasi tiang, metode kekakuan.

1. PENDAHULUAN

Untuk menyalurkan beban yang besar dari struktur atas, pada kolom-kolom suatu bangunan gedung atau pilar suatu jembatan umumnya dipasang sejumlah fondasi tiang. Fondasi tiang tersebut jumlah dan susunannya ditentukan berdasarkan beban yang bekerja dan kekuatan tanah di mana struktur tersebut dibangun. Jumlah dan susunan tiang kemudian disatukan dengan pur atau kepala tiang (*pile cap*). Jika beban yang bekerja hanya beban aksial, maka gaya yang terjadi pada setiap tiang dapat dengan mudah diperoleh dengan membagi beban yang bekerja dengan jumlah tiang yang tersedia. Dalam hal ini gaya aksial yang didukung fondasi besarnya sama untuk semua tiang. Namun demikian, jika pada kolom atau pilar terdapat momen yang bekerja, maka tiang-tiang akan menerima gaya yang berbeda besarnya, tergantung letaknya dari kolom atau pilar di atasnya.

Untuk beban yang besar, fondasi tiang banyak digunakan untuk menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah dasar. Ahmed dkk. (2022) meneliti fondasi tiang dengan fondasi rakit yang berdiri di atas lempung lunak. Model numerik dilakukan dengan perangkat lunak Plaxis 3D. Evaluasi terhadap rasio jarak dan diameter tiang dilakukan dalam penelitian tersebut. Bralovic dkk. (2022) melakukan penelitian terhadap fondasi rakit-tiang pada tanah pasir lepas. Studi eksperimen dilakukan dengan mengamati rasio jarak tiang terhadap diameter dan rasio panjang tiang terhadap diameter tiang. Penelitian lain terkait fondasi tiang juga telah dilakukan oleh para peneliti seperti Xie dan Chi (2020), Ahmed dkk. (2021), Kannaujiya dan Srivastava (2022), Aruna dan Gowsa (2022), Yu dkk. (2019), dan Jamil dkk. (2022).

Dalam tulisan ini, distribusi gaya yang harus dipikul oleh masing-masing fondasi dari kelompok fondasi yang ada, dihitung berdasarkan prinsip-prinsip metode kekakuan. Prinsip-prinsip tersebut menyangkut hubungan antara perpindahan dan gaya yang bekerja pada sumbu lokal dan global. Kekakuan pada masing-masing fondasi tiang dapat dimodelkan sebagai pegas.

Salah satu prinsip pada metode matriks kekakuan adalah melakukan transformasi dari suatu koordinat (yang biasa disebut sebagai koordinat lokal) ke koordinat lain (yang biasa disebut sebagai koordinat global). Matriks transformasi dapat diperoleh dengan mengacu pada masalah yang akan diselesaikan. Selanjutnya persamaan-persamaan diselesaikan dengan mengacu pada koordinat global. Setelah perpindahan masing-masing tiang diperoleh, gaya yang bekerja pada tiang dapat dihitung dengan mengalikan kekakuan pegas dengan perpindahan tersebut.

.

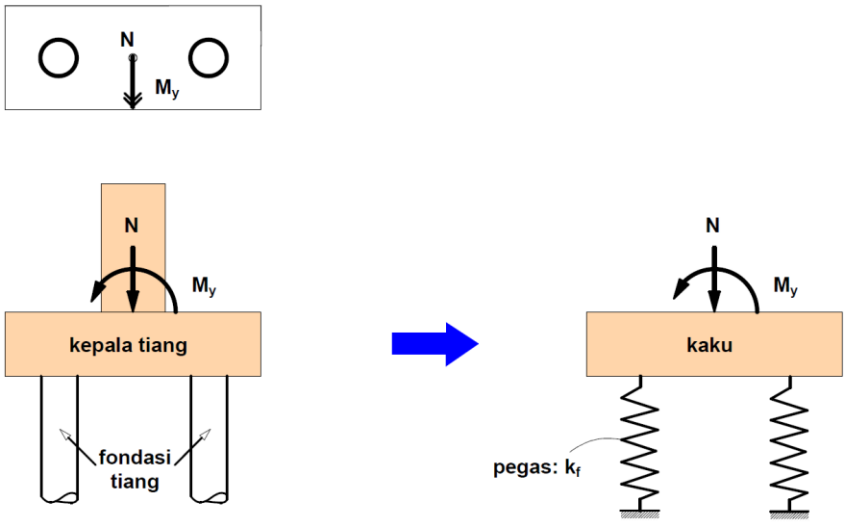
2. MODEL FONDASI DAN KEPALA TIANG

Pada suatu struktur, misal bangunan gedung atau jembatan, kolom gedung atau pilar jembatan umumnya mengalami gaya aksial dan momen. Jika gaya-gaya yang bekerja nilainya besar, maka diperlukan beberapa fondasi tiang yang disatukan dalam suatu kepala tiang (pur). Untuk menganalisis distribusi gaya pada masing-masing tiang, diambil anggapan sebagai berikut:

a) kepala tiang dianggap sebagai benda kaku, sehingga tidak terjadi deformasi lentur;

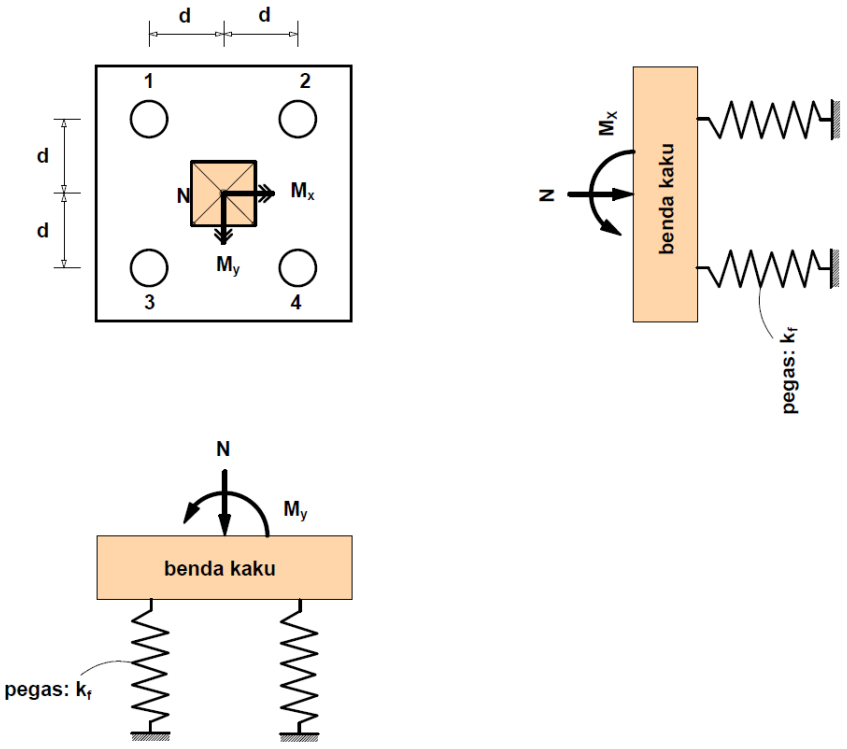
b) kekakuan masing-masing fondasi dinyatakan dengan suatu konstanta pegas.

Model fondasi dan kepala tiang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model analisis: kepala tiang kaku dan tiang sebagai pegas

Untuk model fondasi dengan momen pada kedua arah ditunjukkan pada Gambar 2. Dalam hal ini, kepala tiang mengalami momen pada arah-x dan arah-y seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



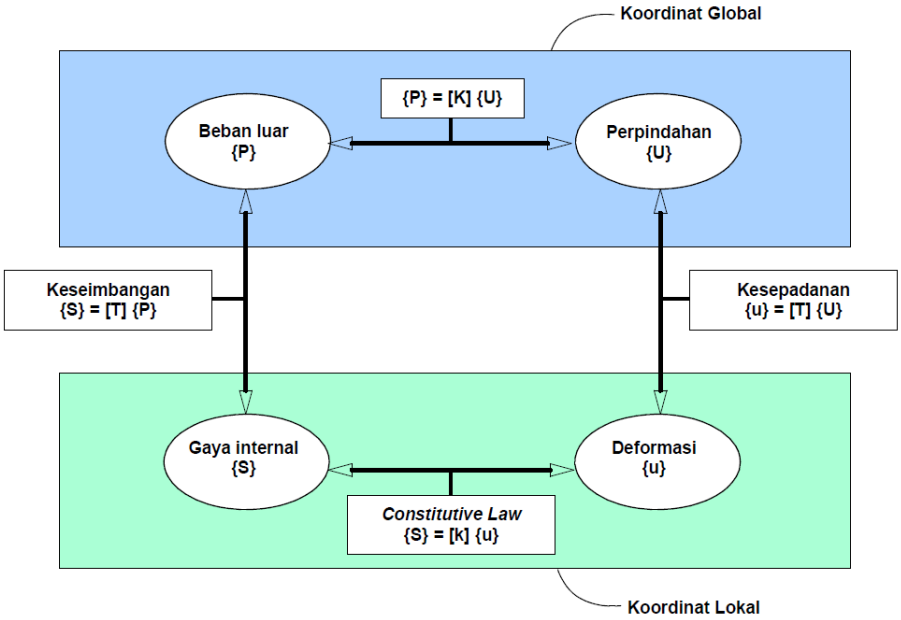
Gambar 2. Model analisis: kepala tiang kaku dan tiang sebagai pegas dengan momen 2 arah

Dengan anggapan ini, selanjutnya dapat diperoleh hubungan antara perpindahan pada pusat berat kepala tiang dengan

perpindahan pada masing-masing fondasi.

3. METODE KEKAKUAN DAN DERAJAT KEBEBASAN PADA KEPALA TIANG

Dalam tulisan ini metode kekakuan digunakan untuk menghitung distribusi gaya yang terjadi pada tiang fondasi dalam mendukung gaya aksial dan momen yang bekerja. Dalam metode kekakuan, hubungan variabel yang terlibat dapat ditunjukkan dengan Gambar 3.



Gambar 3. Hubungan antar variabel dalam metode kekakuan

Hubungan antar variabel secara detail dapat dilihat dalam Arfiadi (2011) dan ditunjukkan sebagai berikut ini.

Hubungan antara gaya batang dan perpindahan dalam sumbu lokal ditunjukkan dengan:

$$\{S\} = [k]\{u\} \tag{1}$$

dengan $\{S\}$= vektor gaya internal, $[k]$ = matriks kekakuan dalam sumbu lokal, dan $\{u\}$ = perpindahan dalam sumbu lokal.

Hubungan antara perpindahan dalam sumbu lokal dan global dinyatakan dengan:

$$\{u\} = [T]\{U\} \tag{2}$$

dengan $\{U\}$ = perpindahan dalam sumbu global, dan $[T]$ = matriks transformasi.

Hubungan antara gaya pada sumbu lolak dan global, secara sama dapat dinyatakan dengan:

$$\{S\} = [T]\{P\} \tag{3a}$$

dengan $\{P\}$ = vektor beban luar. Mengingat matriks $[T]$ bersifat ortogonal, di mana transpose dari matriks $[T]$ sama dengan inversnya, maka persamaan (3a) dapat ditulis menjadi:

$$\{P\} = [T]^T\{S\} \tag{3b}$$

Selanjutnya dengan beberapa manipulasi seperti pada Arfiadi (2011), akan diperoleh hubungan antara matriks

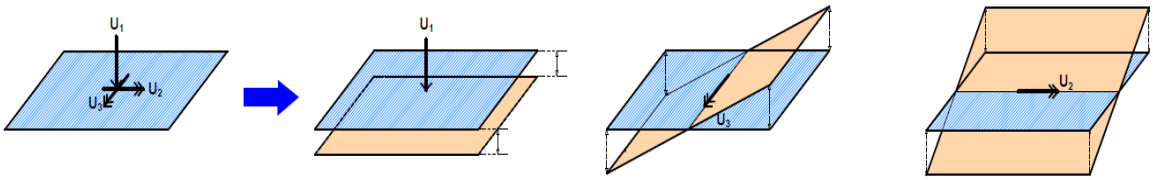
kekakuan pada sumbu global dengan perpindahan pada sumbu global melalui persamaan:

$$\{P\} = [K]\{U\} \tag{4}$$

dengan $[K]$ merupakan matriks kekakuan dalam sumbu global, menurut:

$$[K] = [T]^T[k][T] \tag{5}$$

Untuk menggunakan prinsip metode kekakuan, dengan anggapan pur (kepala tiang) sebagai elemen yang kaku dan gaya yang berasal dari kolom gedung atau pilar jembatan sebagai beban luar, maka derajat kebebasan pada kepala tiang dapat digambarkan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Derajat kebebasan pada kepala tiang yang dianggap kaku

Dengan derajat kebebasan pada kepala tiang yang dianggap kaku, hubungan antara perpindahan global (derajat kebebasan) dengan perpindahan lokal (pada masing-masing fondasi) dapat diperoleh. Dengan mengerjakan berturut-turut derajat kebebasan U_1, U_2 dan U_3, hubungan antara perpindahan tiang dengan $U_1 - U_3$, maka akan diperoleh matriks transformasi. Dengan diperolehnya matriks transformasi ini, maka hubungan antar variabel yang lain dapat ditentukan.

4. APLIKASI METODE KEKAKUAN PADA DISTRIBUSI GAYA FONDASI

Sebagai contoh ditinjau suatu kelompok tiang pancang yang disatukan dalam suatu pur (*pile cap*) seperti terlihat pada Gambar 5. Jumlah tiang ada 9 buah dengan jarak masing-masing tiang sama yaitu sebesar *d*. Gaya pada kolom terdiri dari gaya aksial N dan momen dalam dua sumbu M_x dan M_y. Dalam analisis, kepala tiang dianggap sebagai elemen yang kaku sehingga tidak berdeformasi. Kekakuan masing-masing fondasi ditunjukkan dengan suatu konstanta pegas k_f. Untuk sistem fondasi pada Gambar 5, matriks kekakuan dalam sumbu lokal dapat ditulis sebagai:

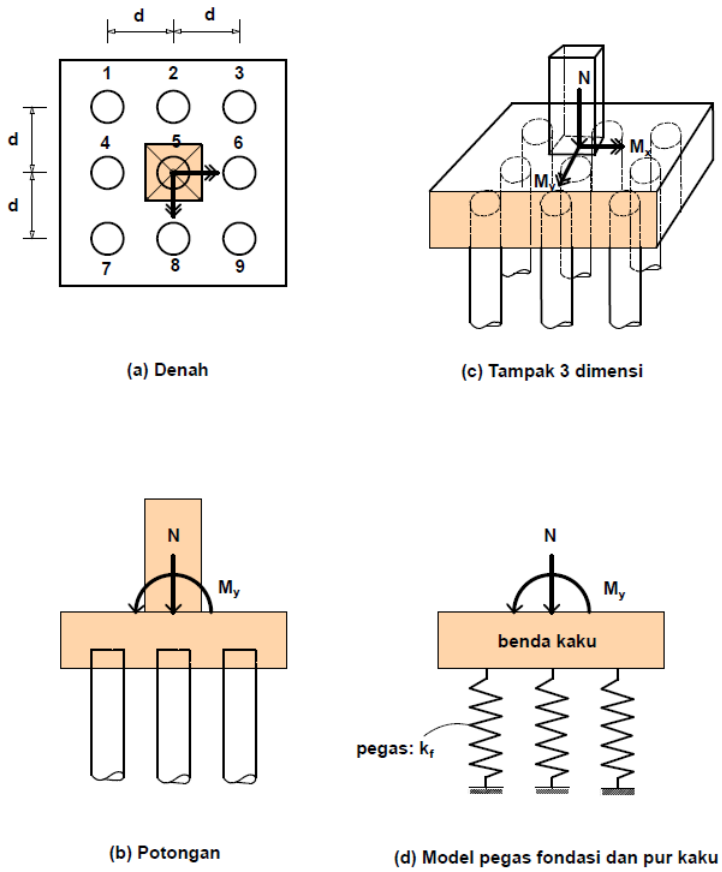
$$[k] = \begin{bmatrix} k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_f \end{bmatrix} \tag{6}$$

Derajat kebebasan sistem fondasi ada 3 buah, yaitu U_1, U_2 dan U_3, yang bekerja dalam arah N, M_x dan M_y. Vektor perpindahan global (derajat kebebasan) dapat ditulis sebagai:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} \tag{7}$$

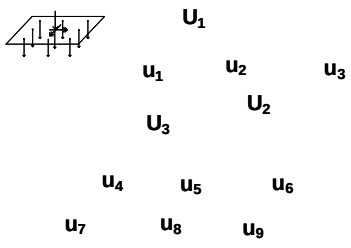
Sedangkan perpindahan lokal:

$$\{u\} = [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4 \quad u_5 \quad u_6 \quad u_7 \quad u_8 \quad u_9]^T \tag{8}$$



Gambar 5. Model kepala tiang kaku

Untuk mendapatkan hubungan antara perpindahan global U_1 sampai dengan U_3 dan perpindahan lokal $u_1$sampai dengan u_9, dikerjakan masing-masing perpindahan global, lalu dicari hubungan antara perpindahan lokal dan global. Gambar 6 menunjukkan perpindahan global dan lokal.



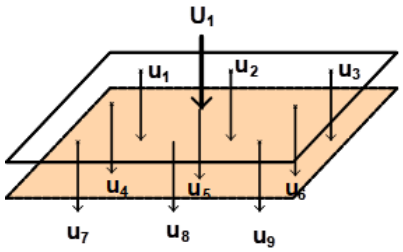
Gambar 6. Perpindahan global dan perpindahan lokal

Selanjutnya dikerjakan U_1 lalu dicari hubungan antara $u_1$sampai dengan u_9 dengan U_1, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.

Oleh U_1pada Gambar 7:

$$u_1 = u_2 = \ldots = u_9 = U_1 \tag{9}$$

Hubungan ini menempati kolom pertama dari matriks transformasi.

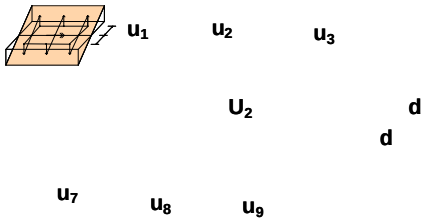


Gambar 7. Pengaruh U_1

Oleh pengaruh U_2 seperti ditunjukkan pada Gambar 8:

$$\begin{aligned} u_1 &= -U_2 d \\ u_2 &= -U_2 d \\ u_3 &= -U_2 d \\ u_4 &= 0 \\ u_5 &= 0 \\ u_6 &= 0 \\ u_7 &= U_2 d \\ u_8 &= U_2 d \\ u_9 &= U_2 d \end{aligned} \tag{10}$$

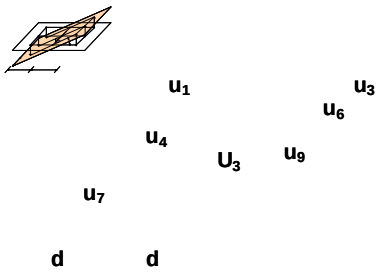
Hubungan ini menempati kolom ke-2 dari matriks transformasi.



Gambar 8. Pengaruh U_2

Oleh pengaruh U_3 seperti ditunjukkan pada Gambar 9:

$$\begin{aligned} u_1 &= U_3 d \\ u_2 &= 0 \\ u_3 &= -U_3 d \\ u_4 &= U_3 d \\ u_5 &= 0 \\ u_6 &= -U_3 d \\ u_7 &= U_3 d \\ u_8 &= 0 \\ u_9 &= -U_3 d \end{aligned} \tag{11}$$



Gambar 9. Pengaruh U_3

Apabila pengaruh ini digabungkan, akan diperoleh hubungan antara perpindahan lokal dan global sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d & d \\ 1 & -d & 0 \\ 1 & -d & -d \\ 1 & 0 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -d \\ 1 & d & d \\ 1 & d & 0 \\ 1 & d & -d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} \tag{12}$$

Atau secara sederhana dapat ditulis sebagai:

$$\{u\} = [T]\{U\} \tag{13}$$

Dengan matriks transformasi $[T]$:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & -d & d \\ 1 & -d & 0 \\ 1 & -d & -d \\ 1 & 0 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -d \\ 1 & d & d \\ 1 & d & 0 \\ 1 & d & -d \end{bmatrix} \tag{14}$$

Dengan mengacu pada langkah-langkah dalam metode matriks kekakuan, matriks kekakuan dalam koordinat global dapat dihitung dengan

$$[K] = [T]^T[k][T]$$

sehingga diperoleh:

$$[K] = \begin{bmatrix} 9k_f & 0 & 0 \\ 0 & 6d^2k_f & 0 \\ 0 & 0 & 6d^2k_f \end{bmatrix} \tag{15}$$

Beban yang bekerja pada kepala tiang adalah:

$$\{P\} = \begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix} \tag{16}$$

Perpindahan pada kepala tiang dapat dihitung dengan persamaan:

$$[K]\{U\} = \{P\}$$

$$\begin{bmatrix} 9k_f & 0 & 0 \\ 0 & 6d^2k_f & 0 \\ 0 & 0 & 6d^2k_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}$$

sehingga diperoleh:

$$\begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dfrac{N}{9k_f} \\ \dfrac{M_x}{6d^2k_f} \\ \dfrac{M_y}{6d^2k_f} \end{Bmatrix} \tag{17}$$

Perpindahan pada masing-masing tiang dapat dihitung dengan

$$\{u\} = [T]\{U\}$$

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d & d \\ 1 & -d & 0 \\ 1 & -d & -d \\ 1 & 0 & d \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -d \\ 1 & d & d \\ 1 & d & 0 \\ 1 & d & -d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} + \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} - \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} - \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} + \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} \\ \frac{1}{9}\frac{N}{k_f} + \frac{1}{6}\frac{M_x}{dk_f} - \frac{1}{6}\frac{M_y}{dk_f} \end{Bmatrix} \tag{18}$$

Gaya-gaya yang terjadi pada masing-masing tiang dapat dihitung dengan:

$$\{S\} = [k]\{u\}$$

Dengan mensubstitusikan matriks kekakuan fodasi tiang dalam koordinat lokal dan perpindahan dalam sumbu lokal, diperoleh gaya pada masing0masing tiang sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ S_7 \\ S_8 \\ S_9 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{N}{9} - \frac{M_x}{6d} + \frac{M_y}{6d} \\ \frac{N}{9} - \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} - \frac{M_y}{6d} - \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_y}{6d} \\ \frac{N}{9} \\ \frac{N}{9} - \frac{M_y}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_y}{6d} + \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_x}{6d} \\ \frac{N}{9} + \frac{M_x}{6d} - \frac{M_y}{6d} \end{Bmatrix} \quad (19)$$

Persamaan dalam pustaka teknik fondasi, misal Bowles (1977), untuk gaya pada masing-masing tiang dari suatu kelompok tiang adalah:

$$S_i = \frac{N}{n} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} \quad (20)$$

dengan n = jumlah tiang, x_i dan y_i adalah koordinat masing-masing fondasi, diukur dari pusat kepala tiang.

Apabila persamaan (19) dan persamaan (20) dibandingkan, terdapat kesesuaian hasil analisis.

5. KESIMPULAN

Dalam tulisan ini telah dibahas aplikasi metode kekakuan untuk menghitung gaya-gaya yang terjadi pada tiang dalam suatu kepala tiang. Kekakuan masing-masing tiang dimodelkan dengan suatu konstanta pegas. Untuk mendapatkan distribusi pada masing-masing tiang, kepala tiang dimodelkan sebagai elemen yang kaku. Hubungan antara derajat kebebasan pada pusat kepala tiang dengan perpindahan pada masing-masing tiang diperoleh dari geometri. Dari hubungan tersebut dapat ditentukan matriks kekakuan kelompok tiang dalam koordinat global. Selanjutnya dari hubungan antara gaya luar dan kekakuan dapat dihitung perpindahan pada pusat kepala tiang (pur), sehingga perpindahan dan gaya yang terjadi pada masing-masing tiang dapat dihitung. Persamaan yang diperoleh dibandingkan dengan persamaan yang ada dalam pustaka tentang fondasi tiang, dan mempunyai kesesuaian. Dari hasil analisis, dapat disimpulkan metode kekakuan dapat digunakan untuk menghitung distribusi gaya-gaya yang terjadi pada suatu tiang dalam kelompok.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, D., Taib, S.N.L., Ayadat, T, dan and Hasan, A. (2021). "A Review on the Behaviour of Combined Stone Columns and Pile Foundations in Soft Soils when Placed under Rigid Raft Foundation." ASM Science Journal 16 (July 15, 2021): 1–8. http://dx.doi.org/10.32802/asmscj.2021.709.

Ahmed, D., Taib, S.N.L., Ayadat, T, dan and Hasan, A. (2022). "Numerical Analysis of the Carrying Capacity of a Piled Raft Foundation in Soft Clayey Soils." Civil Engineering Journal 8, no. 4 , 622–36. http://dx.doi.org/10.28991/cej-2022-08-04-01

Arfiadi, Y. (2011). Analisis Struktur dengan Metode Matriks Kekakuan. Cahaya Atma Pustaka, Yogyakarta

Aruna, T., Raju, K. V. S. B. dan Gowda, S. (2022) "Experimental Investigation of piled raft foundation on Cohesionless Soil." International Journal of Research and Scientific Innovation 09, no. 02, 113–18. http://dx.doi.org/10.51244/ijrsi.2022.9207.

Bowles, J. E. (1977). Foundation Analysis and Design. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.

Bralović, N., Despotović, I. dan Danijel Kukaras, D. (2022). "Experimental Analysis of the Behaviour of Piled Raft Foundations in Loose Sand." Applied Sciences 13, no. 1, 546. http://dx.doi.org/10.3390/app13010546.

Jamil, I., Ahmad, I.,Ullah, W.,Ahmad, W., Sabri, M.M.S. dan Majdi, A. (2022). "Experimental Study on Lateral and Vertical Capacity of Piled Raft and Pile Group System in Sandy Soil." Applied Sciences 12, no. 17 (September 2, 2022): 8853. http://dx.doi.org/10.3390/app12178853.

Kannaujiya, P. dan Srivastava, V.K. (2022). "Behavior of Different Configuration of Piled Raft Foundation for a High-Rise Building by using FEM." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1236, no. 1, 012006. http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1236/1/012006.

Xie, Y, dan Chi, S. (2019), "Optimization Method for Irregular Piled Raft Foundation on Layered Soil Media." Advances in Civil Engineering 2019, 1–15. http://dx.doi.org/10.1155/2019/5713492

Xie, Y, dan Chi, S. (2020) "Optimization Method of Reducing the Differential Settlements of Piled Raft Foundations Based on Pile-to-Pile Interaction Theory." Advances in Civil Engineering 2020, 1–14. http://dx.doi.org/10.1155/2020/1521876.

Yu, E., Ren, S., Tang, H., Li, Y., dan Fang, C. (2019) "Improvement on Structural Forms of Pile Group Foundations of Deepwater Bridges." Shock and Vibration 2019, 1–15. http://dx.doi.org/10.1155/2019/7381852.

DETEKSI KERUSAKAN PADA STRUKTUR RANGKA BATANG RUANG DENGAN MENGGUNAKAN *BINARY BAT ALGORITHM* DAN *EUCLIDEAN DISTANCE* SEBAGAI FUNGSI OBYEKTIF

Richard Frans[1*] dan Yoyong Arfiadi[2]

[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang No. 23, Makassar*
***e-mail**: richardfrans.rf@gmail.com*
[2] Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta
e-mail: yoyong.ar@uajy.ac.id

ABSTRAK

Deteksi kerusakan merupakan salah satu tahapan penting dari suatu sistem monitoring kerusakan struktur (*structural health monitoring system*). Resiko kerusakan bahkan keruntuhan dapat dihindari dengan melakukan deteksi kerusakan secara berkala, selain itu, perawatan (*maintenance*) dan penanganan dapat dilakukan dengan efektif. Terdapat berbagai metode yang telah diusulkan untuk mendeteksi kerusakan dari metode statik hingga perilaku dinamik dari struktur. Penelitian ini membahas suatu metode untuk mendeteksi kerusakan elemen/batang pada struktur rangka batang ruang berdasarkan salah satu kriteria/perilaku dinamik dari struktur, yaitu frekuensi natural dari struktur. Metode ini menggabungkan antara algoritma optimasi, yaitu *binary bat algorithm* dan *euclidean distance* sebagai fungsi obyektif, dimana perhitungan *euclidean distance* berdasarkan pada selisih frekuensi natural struktur analisis dan frekuensi natural struktur aktual (kondisi mengalami kerusakan). Struktur rangka batang ruang yang ditinjau adalah struktur rangka batang ruang dengan 32 elemen/batang dengan berbagai skenario kerusakan, mulai dari scenario kerusakan tunggal, ganda hingga kerusakan pada berbagai elemen/batang. Selain itu, pada penelitian ini, nilai biner digunakan untuk merepresentasikan ada atau tidaknya kerusakan pada masing-masing elemen. Berdasarkan hasil yang didapatkan, metode yang diusulkan dapat dengan akurat memprediksi elemen/batang yang mengalami kerusakan untuk berbagai skenario kerusakan dengan iterasi yang kurang dari 100. Hal ini menunjukkan tingkat keefektifan dari algoritma BBA untuk mendapatkan solusi yang optimum secara konvergen.

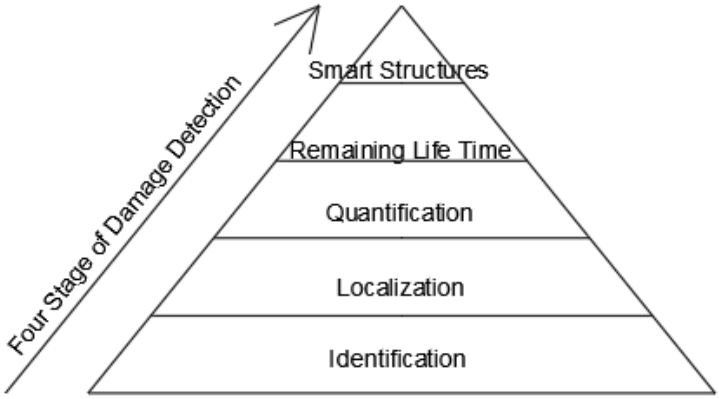
Kata kunci: deteksi kerusakan, struktur rangka batang ruang, *binary bat algorithm*, *euclidean distance*.

1. PENDAHULUAN

Sistem monitoring kesehatan struktur didefinisikan sebagai “proses untuk menerapkan identifikasi kerusakan pada bidang *aerospace*, sipil, serta mekanikal infrastruktur. Proses ini meliputi pengamatan struktur dari waktu ke waktu menggunakan pengukuran berkala. Hasil ekstraksi pada proses ini akan dianalisis untuk menentukan kondisi kesehatan pada struktur tersebut (Wilson et al, 2018). Penjaminan fungsi yang optimal dari semua komponen dalam suatu struktur adalah hal yang sangat penting bagi para perancang dan pengguna. Dalam banyak situasi, pemantauan yang berkelanjutan dapat mengidentifikasi kerusakan pada tahap awal serta menghindari kemungkinan kerusakan, kecelakaan, dan bencana yang disebabkan oleh pemeriksaan yang kurang memadai atau kerusakan dalam proses evaluasi (Burgos et al, 2020). Salah satu tahapan dalam suatu sistem monitoring kesehatan struktur adalah deteksi elemen yang mengalami kerusakan (*damage*). Menurut Sohn dan Farrar (2001), kerusakan didefinisikan sebagai perubahan properti elemen baik secara material maupun geometrik pada suatu sistem struktur termasuk perubahan *boundary condition* dan sistem sambungan, yang berdampak negatif pada kinerja dari sistem struktur. Secara umum, terdapat 4 (empat) tingkatan dalam mendeteksi kerusakan struktur menurut Rytter (1993), yaitu:

1. Tingkat pertama, mendeteksi apakah terjadi kerusakan pada struktur tersebut (*damage identification*). Hal ini biasanya ditandai dari perubahan perilaku struktur yang tidak teratur dimana dalam kondisi tertentu dapat diartikan sebagai kemungkinan kerusakan.
2. Tingkat kedua, menentukan lokasi kerusakan pada struktur tersebut secara lokal (*damage localization*). Elemen/bagian yang mengalami kerusakan ditentukan dengan menggunakan beberapa metode yang telah dikembangkan sesuai dengan informasi yang didapatkan.
3. Tingkat ketiga, menentukan tingkat kerusakan/klasifikasi kerusakan pada elemen tersebut (da*mage quantification*). Pada tingkat ini, kuantifikasi penurunan/perubahan material/geometrik pada elemen/bagian yang mengalami kerusakan akan dilakukan pada tingkatan ini. Luaran dari tingkat ketiga ini adalah penurunan kekakuan/kekuatan/performa pada elemen/bagian yang mengalami kerusakan.

4. Tingkat keempat, menentukan sisa layan dari elemen/bagian yang mengalami kerusakan (*remaining life time*).



Gambar 1. Tingkat deteksi kerusakan (Burgos et al, 2020)

Pada penelitian ini, suatu metode tingkat dua diusulkan untuk mendeteksi kerusakan elemen dari suatu struktur rangka batang ruang. Konsep dari metode ini adalah dengan mengombinasikan algoritma optimasi dan membandingkan vektor frekuensi natural struktur analisis dan frekuensi natural struktur aktual. Frekuensi natural struktur analisis didapatkan berdasarkan data kekakuan dari elemen yang dikalikan dengan faktor penurunan kekakuan sedangkan frekuensi natural struktur aktual adalah frekeunsi natural struktur dalam kondisi mengalami kerusakan. Untuk menentukan selisih kedua vektor frekuensi ini, digunakan nilai *euclidean distance* sebagai fungsi ojektif.

2. *BINARY BAT ALGORITHM* (BBA)

Bat algorithm pertama kali diperkenalkan oleh Yang (2010). Algoritma ini terinspirasi oleh cara kelelawar menggunakan "*echolocation*". Menurut Mirjalili, Mirjalili, dan Yang (2013), bat algorithm ini dianggap lebih efektif dibandingkan dengan algoritma lain, seperti algoritma genetika dan *particle swarm optimization*. Persamaan umum yang diterapkan dalam *bat algorithm* menurut Yang (2010) adalah sebagai berikut

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \tag{1}$$

$$\boldsymbol{v}_i^{t+1} = \boldsymbol{v}_i^t + (\boldsymbol{x}_i^t - \boldsymbol{x}_*)f_i \tag{2}$$

$$\boldsymbol{x}_i^{t+1} = \boldsymbol{x}_i^t + \boldsymbol{v}_i^{t+1} \tag{3}$$

dimana f adalah frekuensi, β adalah angka acak dari 0 sampai 1, $\boldsymbol{v}$ adalah vektor kecepatan, $\boldsymbol{x}$ adalah vektor posisi serta $\boldsymbol{x}_*$ adalah lokasi global terbaik pada iterasi tersebut. Selain menggunakan persamaan (1), (2), dan (3), terdapat persamaan tambahan untuk memperbarui lokasi lokal dari kelelawar tersebut, yaitu

$$\boldsymbol{x}_{new} = \boldsymbol{x}_{old} + \varepsilon A^t \tag{4}$$

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \tag{5}$$

$$r_i^{t+1} = r_i^0[1 - \exp(-\gamma t)] \tag{6}$$

dimana: A_i adalah *loudness*, r_i adalah *rate of pulse emission*, γ dan α adalah konstanta (biasanya diambil $\gamma = \alpha$)

Persamaan (1) hingga (6) diterapkan untuk mengatasi masalah yang bersifat kontinu dengan variabel riil,

sedangkan dalam kasus ini, variabel yang digunakan adalah variabel biner. Oleh karena itu, persamaan (1) hingga (6) dimodifikasi agar dapat diterapkan pada optimasi dengan variabel biner. Mirjalili, Mirjalili, dan Yang (2014) melakukan modifikasi pada *bat algorithm* yang awalnya dirancang untuk variabel riil, sehingga menjadi alat optimasi untuk variabel biner yang dikenal sebagai *binary bat algorithm* (BBA). Teori ini menggunakan fungsi transfer berbentuk v (*v-shaped transfer function*). Persamaan yang digunakan untuk memperbarui posisi dan kecepatan mengikuti persamaan (7) dan (8).

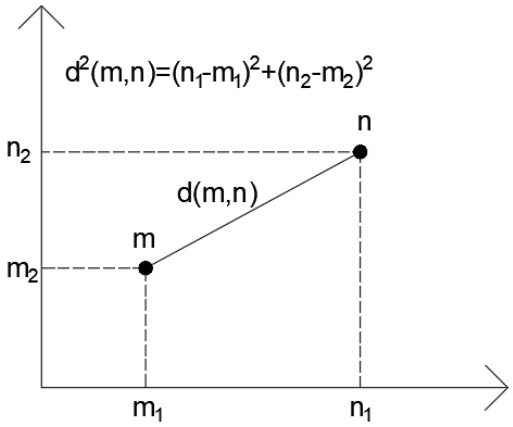
$$V\left(v_i^k(t)\right) = \left|\frac{2}{\pi} arctan\left(\frac{\pi}{2}\right) v_i^k(t)\right| \tag{7}$$

$$x_i^k(t) = \begin{cases} \left(x_i^k(t)\right)^{-1}, & if\ rand < V\left(v_i^k(t)\right) \\ x_i^k(t), & rand \geq V\left(v_i^k(t)\right) \end{cases} \tag{8}$$

dimana: $x_i^k(t)$ dan $v_i^k(t)$ masing-masing dalah posisi dan kecepatan kelelawar ke-*i* pada iterasi *t* pada dimensi ke-*k*, dan $\left(x_i^k(t)\right)^{-1}$ adalah komplemen dari $x_i^k(t)$.

3. *EUCLIDEAN DISTANCE*

Euclidean distance atau yang biasa disebut sebagai jarak Euclidean didefinisikan sebagai jarak antara dua buah titik. Jarak ini juga sering disebut sebagai jarak Phytagoras dikarenakan persamaan yang digunakan sama dengan rumus Pyhtagoras. Gambar 2 menunjukkan ilustrasi untuk menentukan jarak Euclidean. Penerapan konsep jarak Euclidean telah digunakan dalam berbagai bidang keilmuan seperti kesehatan, industri, sains, teknik, olah citra, dan lain sebagainya (Sekarrini, et al, 2020; Jannah dan Humaira, 2019; Nabilla, et al, 2023; Dokmanic, et al, 2015).



Gambar 2. Ilustrasi penentuan jarak Euclidean

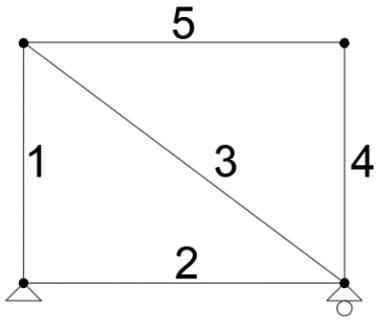
Pada penelitian ini jarak Euclidean ini digunakan untuk mendapatkan hubungan antara dua buah vektor. Secara umum, persamaan Euclidean Norm yang digunakan dapat dilihat pada persamaan (9).

$$||v|| = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} |V_k|^2} \tag{9}$$

dimana: $||v||$ merupakan nilai yang menggambarkan perbedaan antara dua buah vektor sedangkan V_k adalah selisih antara vektor pertama dan vektor kedua, dimana tiap vektor memiliki n-elemen.

4. ANGKA BINER

Penggunaan nilai biner pada penelitian ini dimaksudkan untuk merepresentasikan elemen yang mengalami kerusakan. Angka 0 merepresentasikan tidak terjadi kerusakan pada elemen tersebut sebaliknya angka 1 merepresentasikan terdapat kerusakan pada elemen tersebut. Sebagai contoh, jika terdapat struktur rangka batang bidang sederhana seperti yang terlihat pada Gambar 3, jika vektor dari nilai biner menunjukkan hasil = [1 0 1 1 0], hal ini berarti bahwa terdapat kerusakan pada elemen/batang 1, 3 dan 4 sedangkan elemen/batang 2 dan 5 tidak mengalami kerusakan.

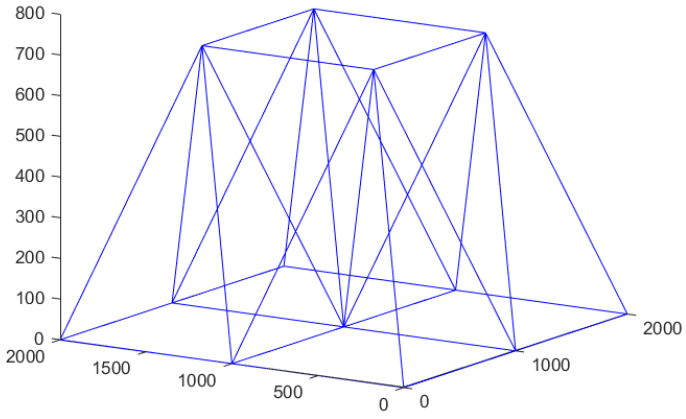


Gambar 3. Contoh struktur rangka batang bidang

5. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini, struktur rangka batang ruang dengan 32-batang ditinjau sesuai yang dapat dilihat pada Gambar 4. Bentuk ini merupakan modul piramid dengan panjang, lebar dan tinggi masing-masing 2000 mm, 2000 mm, 700mm. Konfigurasi struktur rangka batang ruang ini diambil dari penelitian yang dilakukan oleh Bezerra, et al (2009); Freitas, et al (2019); Frans dan Arfiadi (2024). Modulus elastisitas material dan ukuran penampang diambil seragam, yaitu sebesar 68,95 MPa dan 1354,8 mm2. Tabel 1 menunjukkan empat skenario kerusakan yang digunakan. Perlu diketahui sebelumnya, batasan masalah pada penelitian ini adalah penurunan kekakuan yang dialami oleh elemen yang mengalami kerusakan adalah sama, yaitu sebesar 20% sehingga kekakuan residual struktur yang mengalami kerusakan adalah 80% dari kekakuan mula-mula (kekakuan pada saat kondisi sehat).

Gambar 4. Struktur rangka batang ruang dengan 32-batang



Tabel 1. Skenario kerusakan dari struktur rangka batang ruang

No	Skenario	Elemen yang mengalami kerusakan
1	S1	6
2	S2	8,32
3	S3	3,8,10,15
4	S4	2,3,8,10,15,22,25,32

Fungsi obyektif pada penelitian ini adalah untuk meminimumkan nilai *Euclidean Norm* dari 2 (dua) buah vektor. Vektor pertama adalah vektor frekuensi natural analisis sedangkan vektor kedua adalah vektor yang berisi frekuensi natural dari struktur yang mengalami kerusakan (kondisi aktual). Kedua vektor ini dibandingkan dengan menggunakan persamaan (9) yang merupakan hasil penyesuaian persamaan (10)

$$fitness = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} |\omega_{analisis} - \omega_{aktual}|^2} \quad (10)$$

dimana: $fitness$ merupakan nilai yang menggambarkan perbedaan antara dua buah vektor frekuensi natural sedangkan $\omega_{analisis}$ adalah vektor frekuensi natural analisis dan ω_{aktual} adalah vektor frekuensi natural aktual (struktur yang mengalami kerusakan), n adalah jumlah ragam yang dipertimbangkan.

Seluruh perhitungan termasuk pembuatan algoritma, fungsi dan analisis struktur dikerjakan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB R2022b (Mathworks, 2021; 2023).

6. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 2 menunjukkan variabel optimasi yang digunakan. Jumlah iterasi maksimum yang digunakan dalah 500 iterasi dengan jumlah partikel dan jumlah variabel yang sama, yaitu 32. Nilai ini sesuai dengan jumlah elemen / batang yang ada dan digunakan sebagai representasi nilai biner. Nilai *loudness* dan *pulse rate* diambil sama, yaitu sebesar 0,1.

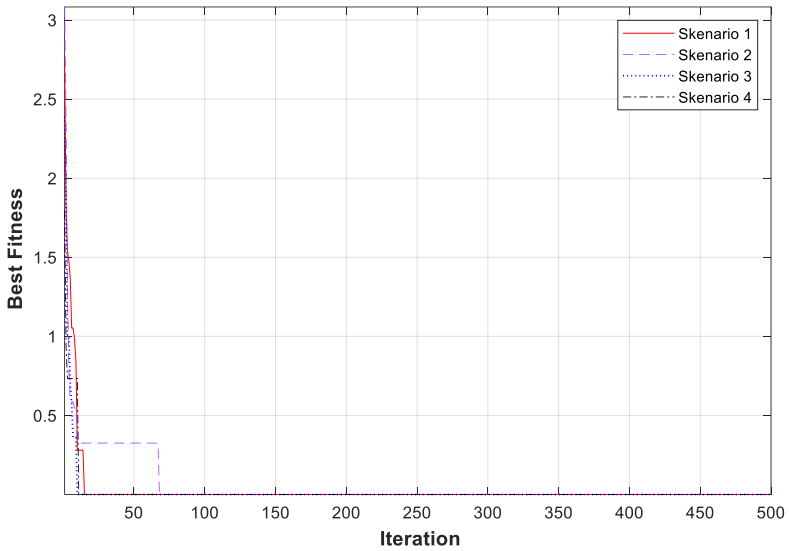
Tabel 2. Variabel optimasi dengan menggunakan BBA

Variabel optimasi	Nilai
Maksimum iterasi	500
Jumlah partikel	32
Jumlah variabel	32
Loudness	0,1
Pulse rate	0,1

Tabel 3. Hasil vektor angka biner untuk masing-masing elemen

Skenario	Hasil angka biner yang ditunjukkan
S1	[0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
S2	[0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]
S3	[0 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]
S4	[0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1]

Tabel 3 menunjukkan hasil vektor angka biner untuk masing-masing skenario. Untuk skenario pertama, vektor angka biner menunjukkan nilai [0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]. Pada kolom-6, angka biner menunjukkan nilai 1, yang berarti bahwa terjadi penurunan kekakuan/kerusakan pada elemen ke-6. Sama halnya pada skenario kedua, vektor angka biner menunjukkan [0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1], angka biner 1 ditunjukkan pada kolom 8 dan 32, yang menunjukkan bahwa elemen 8 dan 32 mengalami penurunan kekakuan/kerusakan. Pada skenario ketiga dan keempat, vektor angka biner menunjukkan [0 0 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0] dan [0 1 1 0 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1], yang berarti bahwa terjadi kerusakan pada elemen 3,8,10 dan 15 untuk skenario ketiga dan elemen 2,3,8,10,15,22,25,32 pada skenario keempat.



Gambar 5. Penurunan nilai fitness untuk tiap iterasi

Gambar 5 menunjukkan penurunan nilai fitness untuk tiap iterasi, dapat terlihat bahwa solusi yang didapatkan konvergen untuk seluruh skenario kerusakan dan solusi yang didapatkan dapat mencapai kekonvergenan dengan kurang dari 100 iterasi. Hal ini menunjukkan bahwa BBA memiliki kemampuan yang baik untuk mendapatkan solusi yang optimum dengan jumlah iterasi yang sedikit (<100 dari 500 iterasi maksimum yang ditetapkan).

7. KESIMPULAN

Penelitian ini membahas teknik deteksi kerusakan pada struktur rangka batang ruang dengan 32-elemen/batang. Teknik deteksi kerusakan yang digunakan adalah gabungan dari BBA dan konsep *euclidean distance* dimana *euclidean distance* digunakan untuk membandingkan dua vektor yang merupakan vektor frekuensi natural analisis dan frekuensi natural struktur aktual (yang mengalami kerusakan) sedangkan BBA digunakan untuk mencari lokasi kerusakan dari struktur rangka batang ruang tersebut dengan memanfaatkan nilai biner yang memrepresentasikan ada atau tidaknya kerusakan pada suatu elemen. Terdapat berbagai skenario kerusakan yang ditinjau, mulai dari kerusakan tunggal, kerusakan ganda, hingga kerusakan pada beberapa elemen/batang. Berdasarkan hasil yang didapatkan, gabungan antara BBA dan konsep *Euclidean Distance* dapat dengan akurat menentukan lokasi elemen yang mengalami kerusakan pada struktur rangka batang ruang tersebut. Solusi konvergen yang didapatkan kurang dari 100 iterasi, hal ini juga menggambarkan keefektifan dari BBA sebagai salah satu algoritma optimasi untuk variabel biner.

DAFTAR PUSTAKA

Bezerra, L.M.; Freitas, C.A.S.; Matias, W.T. dan Nagato, Y. (2009). “Increasing load capacity of steel space trusses with end-flattened connections”. *Journal of Constructional Steel* Research, Vol. 65, 2197-2206.

Burgos, D.A.T., Vargas, R.C.G., Pedraza, C., Agis, D. dan Pozo, F. (2020). “ Damage identification in structural health monitoring: a brief review from its implementation to the use of data-driven applications”. *Sensors*, Vol. 20, 733.

Dokmanic, R. Parhizkar, J. Ranieri dan M. Vetterli. (2015). "Euclidean Distance Matrices: Essential theory, algorithms, and applications”. *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 32, No. 6, pp. 12-30.

Frans, R. dan Arfiadi, Y. (2024). “Damage detection in space truss structures using a third-level approach”. Discover Civil Engineering, 1:13.

Freitas, C.A.S., Silva, V.W., Bezzerra, L.M., Junior, F.F.S.M., Neto, V.C.P. dan Ribeiro, B.A.T. (2019). “Experimental analysis of space trusses with typical connections reinforced with steel and sisal resin spacers”. *Advanced Steel Construction*, Vol. 15, No. 4, 398–405.

Junnah, M. dan Humaira, N. (2019). “Implementasi metode euclidean distance untuk ekstraksi fitur jarak pada citra skeleton”. *Jurnal Ilmiah Informatika Komputer Volume*, Vol. 24, No. 2, 134-139.

MathWorks. (2023). MATLAB: Primer, Version 9.14. The Mathworks, Inc.

MathWorks. (2021). MATLAB: Programming Fundamental, Version 9.10. The Mathworks, Inc.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. dan Yang, X.S. (2014). “Binary bat algorithm”. *Neural Computing and Applications*, Vol. 25, 663-681.

Nabilla, V.H., Fitria, D., Permana, D., dan Fitri, F. (2023). “Comparison of haversine and euclidean distance formulas for calculating distance between regencies in west sumatra”. UNP *Journal Of Statistics And Data Science*, Vol

1, No.3, 120-125.
Rytter, A, Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures. Ph.D. Thesis, University of Aalborg, Aalborg, Denmark, 1993.
Sekkarini, C.E., Sumarmi, Bachri, S., Taryana, D., dan Giofandi, E.A. (2022). “Euclidean Distance Modeling of Musi River in Controlling the Dengue Epidemic Transmission in Palembang City”. Open Access Macedonian Journal of Medical Sciences, Vol. 10(G), 422-429.
Sohn, H. dan Farrar, C.R. (2001). “Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals”. *Smart Mater. Struct.* Vol. 10, 446–451.
Wilson, C.L., Lankar, K., Roy, S., Kopsaftopoulos, F., dan Chang F-K. (2018). Structural Health Monitoring of Composites. Comprehensive Composite Materials II, Vol 7, pp 382-407.
Yang, X.S. (2010). Natured-inspired optimization algorithms. Elsevier, London.

EVALUASI STORY DRIFT PADA STRUKTUR GEDUNG PERKANTORAN 5 LANTAI DENGAN SAP2000

Sadvent M Purba[1],

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan,*
Jl. MH Thamrin Boulevard 1100, Banten.
e-mail: sadvent23@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia, yang terletak di dalam Cincin Api Pasifik, adalah wilayah yang sangat rentan terhadap gempa bumi dengan intensitas tinggi. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan infrastruktur yang mampu menahan gempa untuk memastikan keselamatan dan ketahanan struktur dalam jangka panjang. Laporan ini bertujuan untuk menganalisis sebuah gedung perkantoran lima lantai di Kemang, Jakarta Selatan, sesuai dengan persyaratan dalam SNI 1726:2019 tentang ketahanan gempa untuk struktur bangunan.Analisis dilakukan dalam tiga tahap utama: pra-analisis, analisis, dan kesimpulan. Tahap pra-analisis meliputi penentuan lokasi, peruntukan, dimensi gedung, serta perhitungan N-SPT dan respons spektrum gempa. Tahap analisis mencakup perhitungan manual dan penggunaan aplikasi SAP2000 untuk menentukan apakah gedung memenuhi persyaratan SNI 1726:2019. Hasil analisis menunjukkan bahwa gedung tersebut tidak aman terhadap gempa karena nilai simpangan antar lantai melebihi batas yang diizinkan. Simpangan antar lantai respon spektrum arah-x ada pada lantai 2 sebesar 565, 06 mm, arah-y ada pada lantai 2 sebesar 691,45 mm sedangkan kinerja batas ultimit strory drift izin adalah 46,15 pada kedua arah. Kesimpulan dari laporan ini menegaskan bahwa gedung perlu didesain ulang dengan perkuatan tambahan, seperti perkuatan sambungan balok kolom, penambahan dinding geser, atau penggunaan kolom dan balok yang lebih besar untuk memenuhi persyaratan keamanan gempa.Evaluasi dan desain yang lebih detail diperlukan untuk memastikan keamanan dan ketahanan struktur terhadap gempa.

Kata kunci: struktur tahan gempa, simpangan antar lantai, SAP2000, SNI 1726:2019, analisis seismik

1. PENDAHULUAN

Latar belakang

Indonesia merupakan negara yang terletak di dalam Ring of Fire, yang dikenal sebagai kawasan dengan aktivitas seismik tinggi. Hal ini menjadikan Indonesia sangat rentan terhadap kejadian gempa bumi dengan intensitas serta magnitudo yang tinggi. Selain itu, sebagai negara berkembang, Indonesia memerlukan infrastruktur yang kuat dan tahan gempa untuk mengakomodasi pertumbuhan penduduk dan kebutuhan ekonomi yang terus meningkat. Pembangunan infrastruktur yang tahan gempa sangat penting untuk memastikan keselamatan penghuni serta menjaga ketahanan bangunan dalam jangka waktu panjang. Salah satu standar yang digunakan dalam perencanaan dan analisis ketahanan gempa di Indonesia adalah SNI 1726:2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung. Standar ini menetapkan persyaratan minimum yang harus dipenuhi oleh bangunan agar dapat bertahan dan tetap fungsional selama dan setelah terjadinya gempa bumi. Dalam konteks ini, penggunaan perangkat lunak analisis struktural seperti SAP2000 menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa desain bangunan memenuhi standar ketahanan gempa yang telah ditetapkan.

Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis ketahanan gempa pada sebuah gedung 5 lantai yang terletak di Kemang, Jakarta Selatan, sesuai dengan persyaratan dalam SNI 1726:2019. Analisis ini mencakup beberapa tahap, yaitu:

1. **Tahap Pra-Analisis**: Meliputi penentuan lokasi, peruntukan, dan dimensi gedung, serta perhitungan N-SPT dan respons spektrum gempa untuk lokasi tersebut.
2. **Tahap Analisis**: Dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk menghitung simpangan antar lantai dan gaya geser dasar seismik, serta membandingkan hasil perhitungan dengan persyaratan dalam SNI 1726:2019.
3. **Tahap Kesimpulan**: Menyimpulkan apakah gedung telah memenuhi persyaratan ketahanan gempa yang ditetapkan dan memberikan rekomendasi perkuatan jika diperlukan.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai pentingnya desain struktural yang tahan gempa serta langkah-langkah yang diperlukan untuk memastikan keselamatan dan ketahanan bangunan di wilayah yang rawan gempa.

2. LANDASAN TEORI

Konsep dasar gempa bumi dan struktur tahan gempa. Gempa bumi adalah fenomena alam yang disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik yang melepaskan energi dalam bentuk gelombang seismik. Struktur bangunan harus dirancang untuk menahan beban dinamis yang dihasilkan oleh gempa bumi, yang sering kali lebih kompleks dan berbahaya daripada beban statis. Oleh karena itu, penting untuk memahami karakteristik gempa bumi dan bagaimana bangunan meresponsnya

Standar perencanaan ketahanan gempa di indonesia (SNI 1726:2019). SNI 1726:2019 adalah standar yang digunakan di Indonesia untuk perencanaan ketahanan gempa pada struktur bangunan gedung dan non-gedung. Standar ini mengatur persyaratan minimum yang harus dipenuhi oleh bangunan agar dapat bertahan selama dan setelah gempa bumi terjadi. Beberapa aspek penting dari standar ini meliputi penentuan beban gempa, respon spektrum, serta koefisien modifikasi respons yang sesuai dengan tipe struktur dan lokasi geografis

Analisis dinamis menggunakan SAP2000. SAP2000 adalah perangkat lunak analisis struktural yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis respons struktur terhadap beban, termasuk beban gempa. Dalam analisis ini, SAP2000 digunakan untuk melakukan analisis modal dan analisis respons spektrum untuk menentukan periode getar alami bangunan serta distribusi gaya gempa pada setiap lantai.

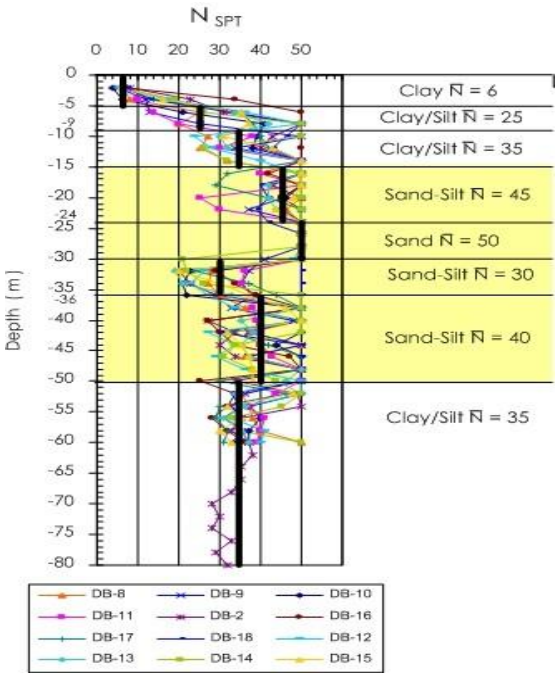
Simpangan antar lantai (story drift). Simpangan antar lantai adalah pergeseran relatif antara dua lantai berturut-turut yang terjadi akibat beban lateral, seperti gempa bumi. Standar SNI 1726:2019 mengatur batas maksimum simpangan antar lantai untuk memastikan bahwa deformasi bangunan tetap dalam batas yang aman dan tidak menyebabkan kerusakan signifikan pada elemen struktural maupun non-struktural.

Perkuatan struktur. Untuk memastikan bahwa bangunan dapat menahan gempa dengan aman, beberapa metode perkuatan dapat diterapkan, seperti peningkatan ukuran dan kekuatan elemen struktural (balok dan kolom), serta penambahan elemen struktural khusus seperti dinding geser (shear wall). Dinding geser adalah elemen vertikal yang didesain untuk menahan gaya lateral dan membantu mengurangi simpangan antar lantai. Dengan landasan teori ini, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi ketahanan gempa bangunan 5 lantai menggunakan perangkat lunak SAP2000 dan memastikan bahwa desain bangunan memenuhi persyaratan standar ketahanan gempa yang berlaku di Indonesia

3. DATA DAN PEMODELAN

Lokasi dan spesifikasi gedung, Lokasi: Kemanhg, Jakarta Selatan. Jenis Bangunan: Gedung perkantoran 5 lantai. Dimensi: Panjang 30 meter, lebar 20 meter, dan tinggi total 20 meter (dengan masing-masing lantai setinggi 4 meter)

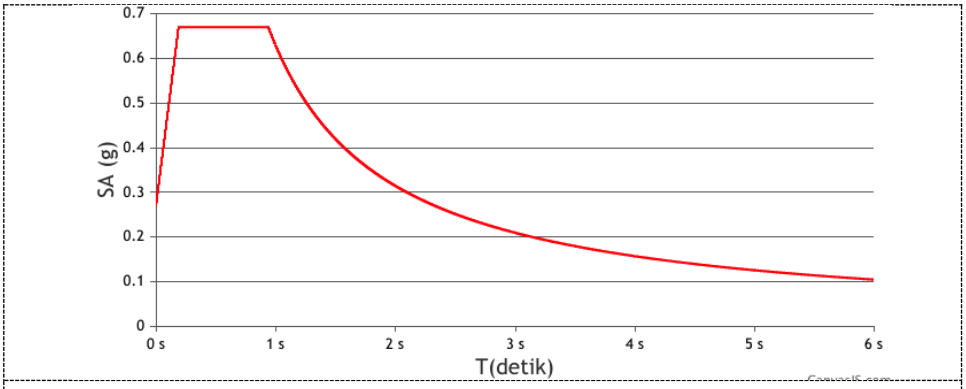
Data tanah hasil borlog. Berdasarkan data tanah hasil borlog pada area sekitar bangunan gedung Menara Z di atas, didapakan nilai N30 rata-rata sebesar 27,135. Nilai ini berada di antara nilai 15 – 50 yang artinya termasuk dalam kelas situs SD (tanah sedang). Namun karena hanya terdapat satu data tanah dari minimal dua yang disyaratkan dalam SNI 1726:2012 pasal 5.1. dan SNI 1726:2019 pasal 5.1. maka kelas situs yang digunakan bukan lagi SD (tanah sedang) tetapi SE (tanah lunak) untuk mendapatkan hasil yang lebih konservatif



Gambar 1. Analisis N-SPT di Kemang Jakarta (Firmansyah, 2011)

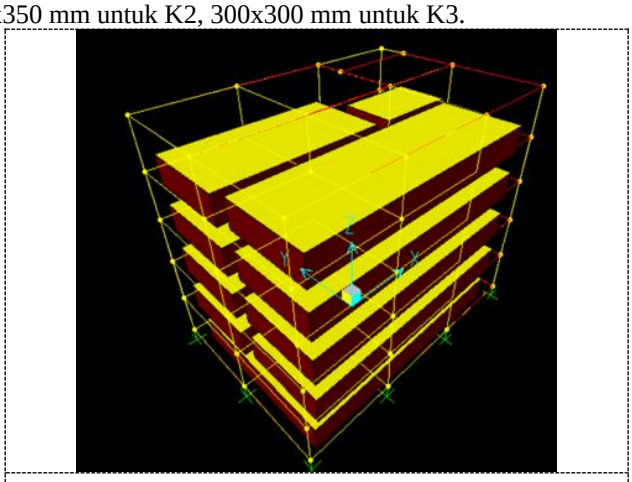
Parameter gempa dan material struktur. Data gempa berdasarkan peta zonasi gempa Indonesia. Respon spektrum gempa

untuk lokasi Kemang, Jakarta Selatan. Nilai Ss diambil sebesar 0.75g, nilai S1 diambil sebesar 0.35g. Faktor amplikasi getaran Fa sebesar 1.20 dan Fv sebesar 1,95. Nilai S_{DS} sebesar 0,60 g dan nilai S_{D1} sebesar 0,46 g. T0 = 0,19 detik, Ts= 0,94 detik, Beton bertulang dengan mutu beton K-300. Baja dengan mutu baja ASTM A36.



Gambar 2. Spektrum Respon Desain, Jakarta Selatan, Kelas SE-Tanah Lunak

Pemodelan struktur menggunakan SAP2000. Kolom dan balok struktur bangunan ini menggunakan material beton dengan mutu 30 MPa, menandakan kekuatannya yang tinggi dalam menahan beban tekan. Beton ini memiliki berat jenis 2400 kg/m3, menunjukkan kepadatan material yang cukup untuk memberikan struktur yang kokoh dan stabil. Elastic modulus yang digunakan pada beton menggunakan rumus 4700 x v $f c'$ MPa. Balok digunakan ukuran 400 x 200 mm. Pelat lantai yang digunakan adalah slab beton dengan tebal 120 mm yang sama di setiap lantai. Ukuran masing-masing kolom 400x400 mm untuk K1, 350x350 mm untuk K2, 300x300 mm untuk K3.



Gambar 3. Pemodelan Mengggunakan SAP2000 (Tampak Samping)

Perhitungan pembebanan struktur. Dari hasil perhitungan, ditentukkan total beban kolom untuk seluruh gedung sebesar 499.55 kN. Total beban balok untuk seluruh gedung sebesar 1152.32 kN. beban pelat total untuk seluruh gedung adalah 3490.85 kN. Total beban gravitasi sebesar 2945,16 kN. Beban total untuk seluruh gedung ditentukkan dari tambahan dari beban mati akibat kolom, balok dan pelat lantai dan juga beban gravitasi yang telah dihitung dari lantai dasar sampai lantai atap yakni 8087,89 kN

.

4. ANALISA DAN KESIMPULAN

Perhitungan untuk menentukan geser dasar seismic (V). Perhitungan untuk geser dasar seismik dengan V = Cs.W diperoleh geser seismik arah V-x = 616,255 kN dan V-y = 616,255 kN. Distribusi Gempa selanjutnya dikalikan 0,85 V-x = V-x = 523,82 kN. Distribusi beban lateral pada setiap lantai disajikan melalui tabel berikut:

Tabel 1. Distribusi Gempa Vertikal Arah X dan Y

Lantai	hi (m)	W (kN)	Wx.hi^k (kNm)	Cvx	Fi (kN)	100% (kN)	30% (kN)
GF	0	1810.76	0.000	0.00	0.000	0.000	0.00

Lt.1	3	1406.80	4831.041	0.07	36.963	36.963	11.09
Lt.2	6	1406.80	10521.979	0.15	80.506	80.506	24.15
Lt.3	9	1406.80	16590.058	0.24	126.934	126.934	38.08
Lt.4	12	1406.80	22916.807	0.33	175.341	175.341	52.60
Lt.5	15	649.91	13602.077	0.20	104.072	104.072	31.22
	Total		8087.89	68461.96	1.00	523.817	523.817

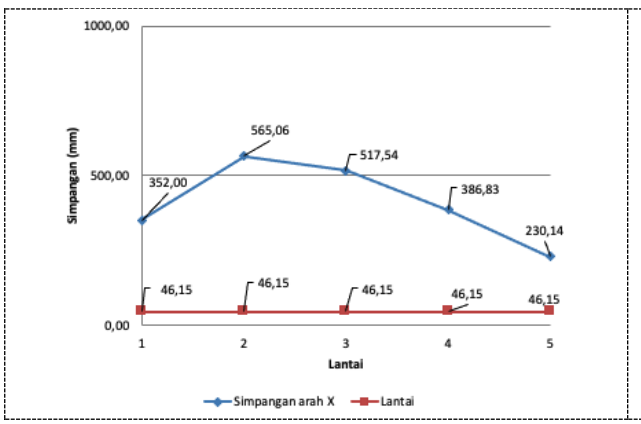
Hasil analisa struktur dan simpangan antar lantai tingkat. Nilai δxe adalah nilai simpangan yang didapatkan dari simulasi dalam SAP2000. Dalam perhitungan ini rumus diatas digunakan dua kali untuk menentukkan dua jenis simpangan yaitu simpangan total pada suatu tingkat dan simpangan antar tingkat. Perbedaan antara dua nilai ini adalah nilai δxe yang digunakan pada rumus diatas, Dimana perhitungan simpangan total menggunakan hanya nilai simpangan δxe untuk tingkat yang ditinjau sedangkan perhitungan simpangan antar tingkat menggunakan nilai simpangan δxe yang ditemukan dari pengurangan nilai δxe pada tingkat di bawah dari nilai δ xe dari Tingkat yang ditinjau. Dalam perhitungan di excel simpangan total, Δ disebutkan sebagai perpindahan total dan simpangan antar tingkat, δ disebut sebagai story drift.

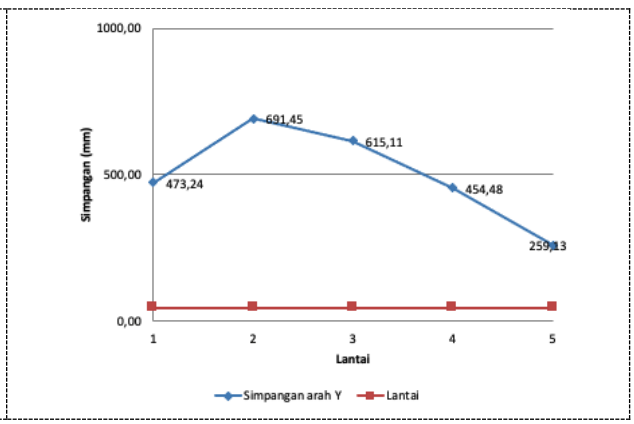
Tabel 2. Simpangan Antar Lantai Respon Spektrum Arah-X (Kinerja Batas Ultimit)

Lantai	Elevasi	Perpindahan Lantai δxe(mm)	Perpindahan Total δx(mm)	Story Drift Δ (mm)	Story Drift izin Δa (mm	Status
Lt.1	3	63.99922	351.99571	352.00	46.15	tidak aman
Lt.2	6	166.73726	917.05	565.06	46.15	tidak aman
Lt.3	9	260.83624	1434.60	517.54	46.15	tidak aman
Lt.4	12.4	331.16876	1821.43	386.83	46.15	tidak aman
Lt.5	15	373.0127	2051.57	230.14	46.15	tidak aman

Tabel 3. Simpangan Antar Lantai Respon Spektrum Arah-Y (Kinerja Batas Ultimit)

Lantai	Elevasi	Perpindahan Lantai δxe(mm)	Perpindahan Total δx(mm)	Story Drift Δ (mm)	Story Drift izin Δa (mm	Status
Lt.1	3	86.04371	473.240405	473.24	46.15	tidak aman
Lt.2	6	211.76199	1164.69	691.45	46.15	tidak aman
Lt.3	9	323.6004	1779.80	615.11	46.15	tidak aman
Lt.4	12.4	406.23279	2234.28	454.48	46.15	tidak aman
Lt.5	15	453.34772	2493.41	259.13	46.15	tidak aman





Gambar 4a. Simpangan antar Lantai X)	Gambar 4b.Simpangan antar Lantai Y

5. KESIMPULAN.

Analisis dengan SAP 2000 menunjukkan bahwa bangunan dengan beban gempa SNI 1726:2019 di Kemang, Jakarta, tidak aman saat gempa terjadi. Pada hasil simpangan atau defleksi yang terjadi telah melebihi batas simpangan yang ada di syarat SNI 1726:2019. Meskipun pembebanan dari gempa respon spektrum diperbesar dengan faktor skala SNI, bangunan tetap harus di desain kembali dengan beberapa perkuatan untuk memenuhi syarat keamanan. Salah satu cara untuk membuat banguan untuk lebih tahan akan gaya gempa yang terjadi adalah dengan memberikan tambahan perkuatan di bagian sambungan balok kolom atau juga memperbesar kolom dan balok yang digunakan. Selain itu solusi lain juga dapat diberikan yaitu penambahan dinding geser atau shear wall. Dinding geser merupakan dinding yang di desain khusus pada sebuah bangunan untuk berfungsi sebagai penahan beban seismik dan beban lateral lainnya. Dengan demikian hasil dari analisis ini bangunan perlu di evaluasi dan di desain kembali. Perlu diingatkan bahwa hasil analisis menggunakan aplikasi SAP 2000 versi student yang merupakan aplikasi lama. Hasil analisis dapat berbeda jika menggunakan beberapa aplikasi analisis struktur yang lebih akurat seperti ETABS atau BIM. Selain itu bangunan yang di desain merupakan bangunan sederhana yang gampang untuk dianalisis. Untuk pemahaman yang lebih jelas dan detail, diperlukan evaluasi perhitungan dengan aplikasi yang lebih akurat dan desain yang lebih detail.

DAFTAR PUSTAKA

Firmansyah, I. (2011, August 25). Simplified Soil Profiles dan Daya Dukung Fondasi Tiang di Jakarta.https://irawanfirmansyah.wordpress.com/2011/08/25/simplified-soil-profiles-dan-daya-d ukung-fondasi-tiang-di-jakarta/

Saputra, E. (2018, April 16). Perkembangan Peraturan Ketahanan Gempa di Indonesia. Retrieved from Catatan Kuliah Belajar Ilmu Teknik Sipil dan Kegempaan: https://farmadel.wordpress.com/2018/04/16/perkembangan-peraturan-ketahanan-gempa-di-indonesia/

SNI 1726. (2012). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

SNI 1726. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

SNI 1727. (2020). Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Sodik, A. S., & Andayani, R. (2021). Pengaruh Penerapan SNI 1726:2019 Terhadap Desain Struktur Rangka

KAJIAN LITERATUR SISTEM SAMBUNGAN BALOK SLOOF PRACETAK KONSTRUKSI RUMAH SEDERHANA TAHAN GEMPA

Israel Padang[1], Rudy Djamaluddin[2], Herman Parung[3], dan Arwin Amiruddin[4]

[1)]Mahasiswa Program Doktor Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp 0811422111, E mail: civilrael1107@gmail.com
[2),] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 0811466610, E mai ; rudy0011@gmail.com
[3)]Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp. 087840023116, E mail: parungherman@gmail.com
[4)]Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp. 082190423578, E mail: a.arwinamiruddin@yahoo.com.

ABSTRAK

Gempa bumi adalah salah satu bencana alam yang paling merusak, terutama di Indonesia yang terletak di Cincin Api Pasifik dan memiliki curah hujan tinggi, sehingga sering mengalami gempa, letusan gunung berapi, banjir, dan tsunami. Inovasi dalam teknologi konstruksi tahan gempa sangat penting untuk pemulihan pasca-bencana, terutama dalam pembangunan kembali rumah-rumah yang rusak dengan cepat dan efisien. Beton pracetak adalah solusi yang populer karena kualitasnya yang lebih baik dan waktu konstruksi yang lebih singkat, namun desain dan implementasi sistem sambungan yang efektif adalah tantangan utama. Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi teknik dan metode sistem sambungan balok pracetak untuk pondasi rumah sederhana tahan gempa melalui studi literatur. Studi ini mengidentifikasi jenis-jenis sambungan seperti sambungan basah, kering, dan semi-kering, serta menganalisis kinerja sambungan dalam berbagai pengujian laboratorium. Hasil studi literatur ini ditemukan bahwa sambungan yang dirancang dengan baik mampu mentransfer beban secara aman dan efektif, serta memastikan integritas struktural selama gempa. Makalah ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang desain dan konstruksi sambungan balok pracetak yang dapat mendukung percepatan pembangunan rumah tahan gempa di Indonesia.

Kata kunci: gempa bumi, beton pracetak, sambungan balok, konstruksi, rumah tahan gempa

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan salah satu bencana alam yang paling merusak, yang dapat menyebabkan kerugian besar baik dalam hal nyawa maupun properti. Indonesia, sebagai bagian dari Cincin Api Pasifik, selain itu Indonesia memiliki curah hujan yang sangat tinggi menyebabkan Indonesia termasuk negara rawan dilanda bencana seperti seperti gempa bumi, letusan gunung berapi, banjir hingga tsunami. (Indonesiabaik.id). Statistik Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BPBD) mencatat jumlah kejadian bencana di Indonesia termasuk dalam kategori sangat tinggi. Tercatat dalam 5 tahun terakhir bencana di atas angka rata-rata 3000 kejadian setiap tahunnya. Bahkan terbesar di tahun 2020 mencapai 5003 kejadian bencana. BNPB mencatat lebih dari 42.000 rumah warga rusak akibat bencana alam sepanjang tahun 2020. Kejadian bencana dari tahun ke tahun menjadi catatan sekaligus data betapa bencana sangat merugikan bagi kelangsungan hidup manusia sebagai sebuah histori. Terdapat kecenderungan peningkatan kejadian bencana setiap tahun, dimana total kejadian bencana di tahun 1815 berjumlah 1 meningkat menjadi 3.885 kejadian pada tahun 2019 (Yulianto et al., 2021). Oleh karena itu, inovasi dalam teknologi konstruksi tahan gempa sangat penting. Salah satu tantangan utama dalam pemulihan pasca-bencana adalah membangun kembali rumah-rumah yang rusak atau hancur dengan cepat dan efisien. Pemulihan ini merupakan tahap penting dalam mengembalikan kehidupan normal bagi warga yang terkena dampak. Namun, pembangunan rumah dengan cara konstruksi yang konvensional memerlukan waktu yang lama dan sumber daya yang besar, yang dapat menunda pemulihan dan meningkatkan penderitaan korban bencana. Sistem struktur beton pracetak merupakan salah satu alternatif teknologi dalam perkembangan konstruksi di Indonesia yang bisa dilakukan dengan lebih terkontrol, lebih ekonomis, serta mendukung efisiensi waktu, efisiensi energi, dan mendukung pelestarian lingkungan (Sianturi, 2012). Hal ini sejalan dengan kebutuhan percepatan pembangunan rumah sederhana korban yang terkena dampak bencana pada saat terjadi bencana alam yang tahan terhadap gempa.

Beton pracetak memiliki keunggulan dalam kualitas dan konstruksi yang lebih pendek waktu. Sambungan struktur beton pracetak penting untuk keberhasilan konstruksi (Djamaluddin et al., n.d.). Sistem sambungan yang digunakan untuk menghubungkan elemen-elemen pracetak, harus direncanakan agar dapat berperilaku dengan baik, dalam mentransfer beban gravitasi maupun beban lateral. Di samping itu, sistem sambungan tersebut haruslah dapat mempercepat pelaksanaan konstruksi dan mudah untuk dilaksanakan. Penggunaan balok pracetak dalam konstruksi telah menjadi solusi yang semakin populer karena berbagai keunggulannya, termasuk kecepatan pembangunan, kontrol kualitas yang lebih baik, dan efisiensi biaya. Namun, salah satu tantangan utama dalam penggunaan balok pracetak adalah desain dan implementasi sistem sambungan yang efektif dan efisien. Sistem sambungan yang baik harus mampu mentransfer beban dengan aman dan efektif, serta memastikan integritas struktural selama dan setelah

terjadinya gempa. Artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai teknik dan metode sistem sambungan balok pracetak yang telah terbukti efektif dalam konteks pondasi rumah sederhana tahan gempa.

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur. Metode studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelolah bahan penelitian (Zed, 2008:3), sebagai langkah awal dalam perencanaan penelitian dengan memanfaatkan kepustakaan untuk memperoleh data lapangan dan membentuk kerangka berpikir pada penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur melibatkan pengumpulan informasi dari berbagai sumber yang relevan dengan topik yang dibahas. Sumber-sumber yang digunakan termasuk jurnal ilmiah, buku, laporan penelitian, artikel konferensi, dan standar konstruksi. Pencarian literatur dilakukan melalui database online seperti Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, dan database akademik lainnya. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian literatur meliputi "precast beam connection", "earthquake-resistant foundation", "seismic performance of precast structures", dan "efficient construction methods". Literatur yang ditemukan kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi teknik dan metode sambungan balok pracetak yang telah terbukti efektif dalam uji laboratorium maupun aplikasi lapangan.

3. PEMBAHASAN

Jenis Sambungan Balok Pracetak

Berbagai jenis sambungan balok pracetak telah dikembangkan dan diuji untuk memastikan kinerjanya dalam kondisi gempa. Beberapa jenis sambungan yang umum digunakan antara lain:

1. *Wet Connection* (Sambungan Basah)

Sambungan ini merupakan sambungan dengan cara groutting atau penyaluran tulangan menggunakan tulangan biasa sebagai penyambung/penghubung antar elemen beton baik antar pracetak ataupun antara pracetak dengan cor ditempat. Elemen pracetak yang sudah berada di tempatnya akan dicor bagian ujungnya untuk menyambungkan elemen satu dengan yang lain agar menjadi satu kesatuan yang monolit. Sambungan jenis ini sering diterapkan dalam pelaksanaan konstruksi, karena tergolong mudah dalam pelaksanaannya. Selain itu sambungan ini dapat membuat bangunan menjadi lebih kaku dibanding menggunakan sambungan jenis lain. Menurut sudut pandang praktisi, sambungan basah dapat menghemat biaya dan cara pemasangannya yang lebih mudah dibandingkan dengan sambungan kering akan tetapi, memerlukan setting time yang cukup lama (Taher, 2007).

2. *Dry Connection* (Sambungan Kering)

Sambungan jenis ini menggunakan penghubung mekanis seperti baut, sambungan plat baja, atau sistem interlock. Sambungan kering lebih cepat dalam pemasangan dan tidak memerlukan waktu pengeringan, namun harus dirancang dengan presisi untuk memastikan keselarasan dan kekuatan yang cukup. Kekurangan dari sambungan jenis ini yaitu pelaksanaannya yang tidak mudah sehingga membutuhkan tenaga ahli dan biaya pengerjaannya lebih mahal dibandingkan sambungan basah. Retak yang tersembunyi pada bagian plat baja yang tertanam di dalam beton juga menjadi salah satu faktor dari kekurangan sambungan ini.

3. *Semi-Dry Connection* (Sambungan Semi-Kering)

Kombinasi antara sambungan basah dan kering, menggunakan perekat atau grouting untuk memperkuat penghubung mekanis. Sambungan ini menawarkan keseimbangan antara kekuatan dan efisiensi waktu, namun memerlukan teknologi perekat yang tepat untuk mengoptimalkan hasilnya.

Kinerja Sambungan dalam Beberapa Pengujian

Penelitian tentang sambungan beton pracetak sudah cukup banyak dilakukan. Berbagai inovasi ditemukan untuk mendapatkan model dan sistem sambungan yang efektif dan efisien pada kebutuhan konstruksi dewasa ini. Penelian Penelitian (Zheng et al., 2023). Hasildari penelitian ini adalah bahwa perilaku lentur dari balok segmen beton pracetak UHPC dengan kawat tarik tak terikat dipengaruhi oleh jenis sambungan dan jumlah sambungan. Meskipun kekuatan lentur dari komponen pracetak lebih rendah daripada balok monolitik, namun menunjukkan perilaku yang lebih lentur. Gagalnya balok segmen umumnya terjadi pada bagian lentur, dan distribusi regangan sepanjang ketinggian balok bersifat linear. Selain itu, bentuk sambungan juga mempengaruhi kapasitas dukung lentur. Hasil simulasi FE menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data uji, meskipun terdapat perbedaan yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan dan kerusakan material. Penelitian ini memberikan wawasan berharga untuk desain dan konstruksi jembatan segmen beton pracetak UHPC.

Penelitian (Ro et al., 2021).Sebuah studi eksperimental tentang perilaku lentur sistem balok modular beton pracetak menggunakan pelat baja yang disisipkan. Hasil dari penelitian ini memperlihatkan retakan awal terjadi di tengah-tengah semua spesimen uji. Pada sistem balok modular PC yang diusulkan, PCM-A dan PCM-B, retakan berlanjut sepanjang bentuk sambungan ke zona kompresi seiring dengan peningkatan beban setelah terjadi retakan lentur awal. PCM-B dengan panjang sambungan 700 mm (dua kali lipat dari spesimen PCM-A) lebih rapuh. Namun, penyambungan antara modul PC dipastikan karena sambungan antara modul PC tidak lepas sampai pengujian dihentikan. Beban maksimum dari PCM-A dan PCM-B masing-masing adalah 81% dan 78% dari beban maksimum spesimen monolitik. Kapasitas tahan beban anggota modular PC biasanya sekitar 70–85% dibandingkan dengan balok RC standar.

Penelitian (Nguyen et al., 2023).Penelitian Nguyen dan kawan-kawan menggunakan loop untuk menghubungkan elemen beton pracetak. Variabelnya adalah panjang tumpang tindih, diameter lentur, dan jarak antara batang loop dalam satu pasang. Temuan menunjukkan bahwa mengurangi panjang tumpang tindih dan diameter lentur mengurangi kekuatan lentur sambungan loop. Selanjutnya, jarak antara batang loop memiliki efek yang tidak berarti pada kapasitas dukung tetapi berdampak signifikan pada kinerja lentur. Analisis elemen hingga tiga dimensi dilakukan untuk memprediksi perilaku mekanik sambungan loop. Simulasi numerik menguatkan hasil eksperimen dalam hal perilaku beban-defleksi dan regangan batang penguat. Akhirnya, persamaan empiris diusulkan untuk memprediksi kekuatan lentur dari beberapa sambungan loop vertikal.

Penelitian (Djamaluddin et al., n.d.) 2015.Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan lembaran CFRP pada sambungan balok-kolom sistem portal beton pracetak memiliki kapasitas lentur sekitar 85% dari spesimen monolit. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa sistem sambungan menggunakan lembaran CFRP dengan kunci geser dapat menjadi alternatif dalam sistem sambungan, terutama untuk sistem portal yang utamanya menahan beban vertikal. Namun, sistem sambungan pracetak masih memiliki keuletan yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen monolit. Selain itu, ditemukan bahwa sabuk pada lembaran CFRP longitudinal dapat menyebabkan pemutusan dini serat terluar, yang mengurangi kapasitas lentur. Studi ini memberikan wawasan berharga untuk desain dan konstruksi struktur beton pracetak menggunakan lembaran CFRP.

Penelitian (Lu et al., 2021)meneliti perilaku lentur balok beton pracetak dengan lengan ganda yang diisi beton di atas pengujian tiga titik dan empat titik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa lengan baja pada balok berperilaku memuaskan, dan ulir membantu meningkatkan kekakuan awalnya. Beban retak pertama dari semua balok pra-cetak lebih rendah daripada balok referensi karena efek antarmuka. Dengan peningkatan diameter batang transisi bawah, kapasitas beban yield dan ultimate dari spesimen pracetak di bawah lenturan tiga titik meningkat sebesar 9,0% dan 21,0%, masing-masing. Balok dengan lengan ganda yang diisi beton menunjukkan kekentalan yang lebih baik dengan lebar retakan maksimum yang 41,2% dan 28,6% lebih besar dari balok referensi di bawah lenturan tiga titik dan empat titik, masing-masing.

Penelitian (Kummara and Senthil Kumar, 2023). Penelitian ini membandingkan kinerja sambungan balok-balok yang terbuat dari balok monolitik dan pracetak di bawah beban lentur. Dua jenis sambungan balok-balok pracetak yang berbeda dan balok monolitik dikenai uji beban lentur. Sambungan balok-balok pracetak disatukan dengan sambungan pipa baja yang dilas dan sambungan pipa Poly Vinyl Chloride. Beban lentur diterapkan pada panjang 1/3 dan 1/4 dari tumpuan. Uji lentur yang dilakukan pada balok pracetak dan balok monolitik menggunakan mesin uji universal memberikan evaluasi terhadap kekuatan lentur, mekanisme kegagalan, dan parameter deformasi dari balok monolitik dan balok pracetak yang tersambung. Hasil investigasi ini menunjukkan bahwa balok dengan sambungan pipa baja yang dilas memiliki kekuatan lentur yang setara dan defleksi 10,3% lebih rendah daripada balok monolitik. Kesimpulannya, balok yang tersambung dengan pipa baja yang dilas lebih unggul daripada balok beton bertulang monolitik dan dapat digunakan untuk menyambungkan komponen balok beton pracetak.

Penelitian (Peng & Yan, 2022)bereksperimen untuk meneliti kinerja sambungan basah pada jembatan beton ultra-tinggi yang diprefabrikasi (UHPC). Mode kegagalan spesimen, kapasitas lentur ultimate, distribusi regangan, dan kurva beban-defleksi diselidiki. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur dari balok sambungan lebih rendah daripada balok lengkap. Di antara lima spesimen dengan sambungan basah, sambungan romboid yang dilas dengan strip atas dan bawah memiliki kekakuan terbesar, kapasitas resistensi retakan tertinggi, dan kinerja lentur terbaik. Dari yang terbaik hingga yang terburuk, sisa spesimen sambungan basah mengikuti urutan berikut: sambungan romboid tanpa pengelasan dengan strip, sambungan vertikal dengan strip, sambungan romboid, dan sambungan vertikal. Sesuai dengan hasil pengujian dan analisis teoritis terkait, hasil penelitian ini mengusulkan rumus untuk menghitung kapasitas lentur dari balok dengan sambungan UHPC.

Penelitian (Li et al., 2022)Dalam penelitian ini, respons dinamis satu sambungan beton bertulang monolitik (RC) dan tiga sambungan PC dengan konfigurasi sambungan basah yang berbeda diselidiki dengan menggunakan sistem uji dampak . Perilaku dampak dari sambungan RC monolitik dan PC diperiksa dan dibandingkan dalam hal mode kegagalan, respons dinamis, dan disipasi energi. Efek dari berbagai konfigurasi sambungan basah terhadap respons dinamis sambungan PC yang dianalisis ditemukan bahwa kerusakan antarmuka antara balok PC dan sambungan mengakibatkan integritas sambungan PC yang berkurang. Selain itu, model numerik dari sambungan balok-kolom dikembangkan dengan menggunakan perangkat lunak LS-DYNA dan dikalibrasi dengan data uji. Model numerik yang dikalibrasi digunakan untuk menyelidiki pengaruh berbagai konfigurasi sambungan basah terhadap kinerjanya yang terkena dampak di lokasi yang berbeda. Hasil numerik menunjukkan bahwa kunci geser dan tulangan antarmuka yang digunakan untuk sambungan basah bermanfaat untuk menahan kerusakan yang dipimpin oleh geser tetapi kurang efektif dalam menahan kerusakan yang dipimpin oleh lentur yang diinduksi oleh beban dampak. Oleh karena itu, sambungan basah harus dirancang dengan baik untuk sambungan PC agar dapat menahan skenario pembebanan dampak yang ditentukan.

Penelitian (Zhou et al., 2022)menggunakan jenis sambungan balok pracetak yang dirakit di dalam jangka dengan sambungan baut-pelat baja (PBSPB), di mana pelat baja berbentuk U menutupi web dan zona tarik balok beton. Pelat baja dan baut digunakan untuk menghubungkan dua balok pendek yang dirakit untuk menahan lentur dan geser akibat efek eksternal. Untuk menyelidiki efek ketebalan pelat baja dan rasio jangka-dalam pada perilaku lentur balok, uji perilaku statis dilakukan pada enam PBSPB dan satu balok tempa-in-situ. Semua PBSPB menunjukkan kinerja yang sangat baik dengan retakan terbatas di bawah kondisi yang sama; hanya kerusakan kecil yang diamati, yang terdiri dari jumlah kecil beton yang terkelupas dan pergeseran pinggir pelat baja. Model analisis elemen hingga (ABAQUS)

dari PBSPB yang diusulkan dikembangkan untuk memverifikasi beban ultimat dan situasi kerusakan dari setiap spesimen, rumus perhitungan kapasitas lentur yang disederhanakan untuk PBSPB dikembangkan, dan hasil teoritis konsisten dengan hasil eksperimental. Hasil menunjukkan bahwa balok beton pracetak baru memiliki kapasitas lentur yang baik. Balok dengan pelat baja yang lebih tebal di jangka memiliki kekuatan yang lebih tinggi karena kekakuan yang lebih tinggi. Meningkatkan rasio jangka-dalam meningkatkan beban ultimat dan hampir tidak memengaruhi mekanisme kegagalan.

Penelitian (Tumengkol et al., 2022)Penelitian ini menemukan bahwa sambungan balok-kolom pracetak dengan pen dowel memiliki kinerja yang baik dalam menanggung beban gempa bumi di bawah kondisi seismik sedang dan kuat. Penggunaan pen dalam sambungan meningkatkan kapasitas beban, kekakuan, dan disipasi energi. Nilai daktilitas dari sambungan pracetak dengan pen sedikit lebih rendah daripada sambungan monolitik, namun masih memenuhi persyaratan. Studi merekomendasikan penggunaan sambungan pracetak dengan pen untuk aplikasi praktis. Banyak referensi disediakan untuk bacaan lebih lanjut. Kapasitas beban dan daktilitas sambungan balok-kolom pracetak dengan pen lebih besar daripada sambungan monolitik. Sambungan pracetak dengan 4 pen memiliki kapasitas beban dan daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang memiliki 2 pen. Keberadaan pengecoran di area sambungan balok meningkatkan kekakuan dan kapasitas beban sambungan pracetak. Nilai daktilitas untuk spesimen dikategorikan sebagai sedang sesuai dengan ASCE 41-17. Daktilitas lengkungan untuk sambungan balok-kolom pracetak menggunakan pen juga lebih tinggi daripada sambungan monolitik. Perilaku sambungan balok-kolom pracetak dengan pen lebih kuat dalam menahan beban siklik. Artikel ini juga memberikan detail metode pengujian dan hasil untuk berbagai jenis sambungan balok-kolom.

Penelitian (Kataoka et al., 2012). Melakukan penelitian sambungan balok kolom pracetak dengan sambungan pelat baja, luas baja yang digunakan pada penutup beton pelat inti berongga sama, dengan variasi jumlah batang yang melewati kolom dan yang ditempatkan berdampingan dengan kolom. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa sambungan dengan batang yang berdampingan dengan kolom menunjukkan peningkatan kekakuan dan kontrol retakan yang lebih baik. Menurut klasifikasi, kedua sambungan yang diuji dapat dianggap sebagai semi-rigid.

Penelitian (Esmaeili and Ahooghalandary, 2020). Menurut Esmaeili meskipun prosedur pemasangan yang mudah, sebagian besar sambungan kering tidak menunjukkan kinerja yang dapat diterima dalam hal keuletan dan disipasi energi. Di sisi lain, sambungan semi-monolitik memerlukan waktu penundaan yang lama untuk pengecoran dan perancah di lokasi konstruksi dan mengakibatkan kepadatan tulangan di sambungan balok-kolom. Selain itu, sebagian besar balok pracetak dalam kedua pendekatan tersebut tidak memiliki permukaan dukungan yang sesuai untuk menciptakan kondisi sambungan balok ke pelat yang diinginkan. Kemudian Esmaeili melakukan inovasi pada penelitian ini dengan sambungan balok-kolom beton pracetak yang mudah dipasang yang diperkuat dengan kotak baja dan pelat perifer. Hasilnya, Hasil uji menunjukkan bahwa PBC yang diusulkan memiliki kapasitas pemikul beban, disipasi energi, dan keuletan yang lebih tinggi daripada IBC yang setara dan memenuhi semua persyaratan gempa dari kriteria ACI374.1-05 untuk sambungan tahan momen. Terakhir, sambungan tersebut disimulasikan dengan metode elemen hingga (FEM) dalam perangkat lunak ATENA untuk mengembangkan hasil uji. Pada tahap ini, prediksi analisis elemen hingga untuk kapasitas pemikul beban, pola retakan, dan nilai regangan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil uji.

Penelitian (*_8_ NIKEN*, n.d.) melakukan penelitian untuk mengetahui perilaku lentur pada sambungan model takik balok pracetak. Dari pengamatan pasca pengujian, analisa hasil pengujian, hasil perhitungan dengan anggapan balok monolit dan pengamatan keretakan dapat diperoleh kesimpulan bahwa sistem sambungan ini mempunyai perilaku lentur seperti struktur monolit namun disarankan dilakukan peninjauan terhadap mekanisme geser. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi SNI (Standar Nasional Indonesia) yang paling ketat dapat tercapai dengan perpindahan 4,66 mm dan pembebanan 17,326 tf pada kondisi balok elastis. Retak pertama muncul pada pembebanan 6,64 tf yang setara dengan 86,8% dari perhitungan pembebanan statik. Beban maksimum adalah 23,99 tf atau 62% dari perhitungan pembebanan statik, hal ini sesuai dengan teori kelelahan bahwa pembebanan berulang mengurangi 40-55% dari pembebanan statik. Retak pertama adalah retak lentur dan kemudian retak tersebut berkembang menjadi tipe diagonal.

Penelitian (*V A Noorhidana (2006) - Analisis Perilaku Balok Beton Pracetak Dengan Wet-Joint Yang Menerima Lenturan*, n.d.)Hasil penelitiannya memperlihatkan bahwa balok beton pracetak dengan sambungan basah (*wet joint*) dengan sambungan tulangan yang ujungnya dibengkokkan (BP1) dengan sambungan tulangan yang dilas satu sama lain (BP2), mempunyai perilaku yang hampir sama dengan balok beton monolit (BM), dilihat dari hubungan beban lendutan, ketahanan lentur (*toughness*) dan pola retak. Sehingga disimpulkan bahwa tipe sambungan basah dengan tulangan lewatan yang dilas maupun tulangan lewatan yang ujungnya dibengkokkan dapat diterapkan dalam konstruksi bangunan.

Penelitian (Palembangan et al., 2020). Untuk menentukan dan menganalisis perilaku lentur dari sambungan balok-kolom luar ganda yang lurus karena beban lateral siklik. Terdapat 3 (tiga) spesimen uji skala, monolitik BK, tipe SBK 1, dan tipe SBK 2. Model sambungan pada balok adalah sambungan alur ganda lurus dan menggunakan metode sambungan mekanis dan pengecoran. Pemuatan dengan beban lateral bergantian diasumsikan sebagai beban siklik. Hasilnya menunjukkan bahwa stabilitas spesimen tipe SBK 1 dan tipe 2 dalam hal karakteristik kurva loop histeresis memiliki kurva yang mirip dengan monolitik BK. Perpindahan terbesar dalam kondisi tekan terjadi pada tipe SBK 2 sementara kondisi tarik terjadi pada monolitik BK. Dari hasil studi, juga diketahui bahwa beban lateral berbanding lurus dengan perpindahan, di mana semakin tinggi beban lateral yang ditanggung maka semakin besar perpindahan yang dialami dan sebaliknya.

Menurut (Zheng et al., 2023), kekuatan lentur komponen prefabrikasi 9~15% lebih rendah daripada balok monolit,

sementara itu, bentuk sambungan juga memengaruhi kapasitas dukung lentur. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Maryoto, 2017), di mana penyambung antara segmen balok beton pracetak memegang peranan yang sangat penting. Panjang sambungan berpengaruh terhadap kuat lentur balok beton segemental. Namun kapasistas lentur balok beton segmental masih dibawah kapasitas lentur balok beton tanpa sambungan. Penelitian sistem sambungan pada balok pracetak menggunakan pelat baja dilakukan oleh (Ro et al., 2021), memperlihatkan hasil sistem balok modular PC yang diusulkan mencapai sekitar 80% dari kinerja struktural dibandingkan dengan spesimen monolitik, dengan keuletan sekitar 1,3 kali lipat lebih besar. Penelitian sambungan balok ke balok pracetak digabungkan dengan sambungan pipa las baja dan sambungan pipa Polivinil Klorida yang dilakukan oleh (Kummara & Senthil Kumar, 2023) menunjukkan bahwa balok terhubung dengan konektor pipa las baja memiliki kekuatan lentur yang setara dan defleksi 10,3% lebih rendah daripada balok monolitik. Peneliti ini menyimpulkan bahwa balok terhubung dengan pipa las baja lebih unggul daripada balok beton bertulang monolitik dan dapat digunakan untuk menghubungkan anggota balok beton pracetak. Penelitian yang dilakukan oleh (Peng & Yan, 2022) juga menunjukkan bahwa jenis sambungan menentukan kapasitas lentur balok sambungan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur balok sambungan lebih rendah daripada balok monolit.

Dari beberapa penelitian ini sejalan dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu menemukan model sambungan balok pracetak yang memiliki kinerja efektif, waktu dan biaya pelaksanaan yang efisien dalam pengembangan inovasi sambungan beton pracetak dalam dunia konstruksi. Menurut sudut pandang praktisi, selain memiliki kinerja kekuatan struktural yang lebih baik dan kapasitas deformasi yang lebih tinggi, sambungan basah dapat menghemat biaya dan cara pemasangannya yang lebih mudah dibandingkan dengan jenis sambungan lainnya. Akan tetapi, memerlukan setting time yang cukup lama.

Efisiensi Biaya dan Waktu

Efisiensi biaya dan waktu merupakan faktor penting dalam pemilihan sistem sambungan balok pracetak. Sambungan kering cenderung lebih murah dan cepat karena tidak memerlukan waktu pengeringan, namun mungkin memerlukan material tambahan untuk memastikan kekuatan seismik yang memadai. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa meskipun sambungan kering lebih cepat, biaya tambahan untuk elemen penghubung dan peredam getaran dapat meningkatkan biaya total konstruksi. Sambungan basah, meskipun lebih mahal dan memakan waktu lebih lama, menawarkan kekuatan struktural yang lebih baik dan kapasitas deformasi yang lebih tinggi. Penggunaan beton cast-in-place dalam sambungan basah memastikan transfer beban yang efektif dan kontinuitas struktural yang baik . Sambungan semi-kering dapat menjadi pilihan optimal jika teknologi perekat yang digunakan dapat diandalkan dan efisien. Studi menunjukkan bahwa sambungan semi-kering dengan penggunaan perekat atau grouting dapat mengurangi waktu konstruksi sambil mempertahankan kinerja seismik yang baik . Selain itu, sambungan semi-kering menawarkan fleksibilitas dalam desain dan konstruksi, memungkinkan adaptasi terhadap berbagai kondisi proyek dan persyaratan desain.

4. KESIMPULAN

Dari tinjauan ini menunjukkan bahwa inovasi model sambungan beton pracetak merupakan penelitian yang luas dan sangat menarik. Kinerja sambungan balok pracetak dalam menghadapi gempa bumi sangat bergantung pada desain dan implementasi sambungan tersebut. Beberapa studi menunjukkan bahwa sambungan basah memiliki kinerja seismik yang baik karena mampu mendistribusikan beban gempa secara merata dan memiliki kapasitas deformasi yang tinggi . Namun, sambungan basah memerlukan waktu pengeringan yang lama dan kontrol kualitas yang ketat selama pemasangan. Sambungan kering, di sisi lain, lebih cepat dan efisien dalam konstruksi, tetapi sering kali memerlukan elemen tambahan seperti peredam getaran atau penghubung fleksibel untuk meningkatkan kinerja seismiknya . Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan peredam getaran dapat secara signifikan meningkatkan kinerja seismik sambungan kering dengan mengurangi perpindahan relatif antar elemen pracetak . Sambungan semi-kering menawarkan fleksibilitas dan kinerja yang baik, dengan kombinasi kekuatan dari sambungan basah dan efisiensi waktu dari sambungan kering. Penggunaan perekat atau grouting dalam sambungan semi-kering dapat meningkatkan kapasitas beban dan deformasi sambungan, asalkan teknologi perekat yang digunakan dapat diandalkan dan diaplikasikan dengan tepat.

DAFTAR PUSTAKA

_8_ NIKEN. (n.d.).

Djamaluddin, R., Rante, H., & Irmawati, R. (n.d.). *FLEXURAL CAPACITY OF THE PRECAST RC BEAM-COLUMN CONNECTION USING CFRP SHEET*.

Esmaeili, J., & Ahooghalandary, N. (2020). Introducing an easy-install precast concrete beam-to-column connection strengthened by steel box and peripheral plates. *Engineering Structures*, *205*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110006

Kataoka, M. N., Ferreira, M. A., & El Debs, A. L. H. C. (2012). *A study on the behavior of beam-column connections in precast concrete structures: experimental analysis Estudo do comportamento de ligações viga-pilar em estruturas pré-moldadas de concreto: análise experimental* (Vol. 5, Issue 5).

Kummara, S. P., & Senthil Kumar, N. (2023). Flexural capacity of the new precast beam-to-beam connection. *Sādhanā*, *48*(4), 255. https://doi.org/10.1007/s12046-023-02266-1

Li, H., Chen, W., Huang, Z., Hao, H., Ngo, T. T., Pham, T. M., & Yeoh, K. J. (2022). Dynamic response of monolithic and precast concrete joint with wet connections under impact loads. *Engineering Structures*, *250*. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113434

Lu, Z., Wu, B., Yang, S., Hou, J., Ji, Z., Li, Y., Huang, J., & Zhang, M. (2021). Experimental study on flexural behaviour of prefabricated concrete beams with double-grouted sleeves. *Engineering Structures*, *248*, 113237. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113237

Maryoto, A.-. (2017). Pengaruh Panjang Sambungan Pada Beton Prategang Segmental Bertulangan Limbah. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan; Vol 19, No 1 (2017): Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan; 65-70 ; 2503-1899 ; 1411-1772 ; 10.15294/Jtsp.V19i1*. https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jtsp/article/view/9500

Nguyen, Q.-T., Maki, T., Mutsuyoshi, H., & Ishihara, Y. (2023). Flexural Behavior of Precast Concrete Slab Connections using Loop Steel Bars and Mortar. *Journal of Advanced Concrete Technology*, *21*(6), 436–449. https://doi.org/10.3151/jact.21.436

Palembangan, M. T., Parung, H., Amiruddin, A. A., & Simbolon, R. (2020). Flexural behavior of double straight notch joint beam column exterior due to lateral cyclic load. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *473*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012144

Peng, K., & Yan, B. (2022). Experimental study of the flexural behaviour of ultra-high-performance concrete beam with wet joint. *Magazine of Concrete Research*, *74*(2), 70–80. https://doi.org/10.1680/jmacr.20.00078

Ro, K. M., Kim, M. S., Cho, C. G., & Lee, Y. H. (2021). An experimental study on the flexural behavior of precast concrete modular beam systems using inserted steel plates. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(9). https://doi.org/10.3390/app11093931

Sianturi, N. M. (2012). TINJAUAN PENGGUNAAAN BALOK PRACETAK PADA PEMBANGUNAN GEDUNG. In *Jurnal Rancang Sipil* (Vol. 1, Issue 1).

Tumengkol, H. A., Irmawaty, R., Parung, H., & Amiruddin, A. (2022). Precast concrete column beam connection using dowels due to cyclic load. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, *35*(1). https://doi.org/10.5829/ije.2022.35.01a.09

V A Noorhidana (2006) - Analisis perilaku balok beton pracetak dengan wet-joint yang menerima lenturan. (n.d.).

Yulianto, S., Apriyadi, R. K., Aprilyanto, A., Winugroho, T., Ponangsera, I. S., & Wilopo, W. (2021). Histori Bencana dan Penanggulangannya di Indonesia Ditinjau Dari Perspektif Keamanan Nasional. *PENDIPA Journal of Science Education*, *5*(2), 180–187. https://doi.org/10.33369/pendipa.5.2.180-187

Zed, Mestika 2003. Metode Penelitian Kepustakaan. Jakarta : Yayasan Obor Indonesia

Zheng, H., Chen, D., Ou, M., Liang, X., & Luo, Y. (2023). Flexural Behavior of Precast UHPC Segmental Beams with Unbonded Tendons and Epoxy Resin Joints. *Buildings*, *13*(7). https://doi.org/10.3390/buildings13071643

Zhou, W., Xu, Z., & Ma, C. (2022). Flexural behavior of precast concrete beams in-span assembled with bolt-steel

plate joints. *Structures*, *43*. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.067

KAJIAN SPEKTRUM KAPASITAS NON-ENGINEERED BUILDING (NEB) DENGAN ANALISIS STATIC PUSHOVER

Hendramawat Aski Safarizki[1*], Stefanus Adi Kristiawan[2], Senot Sangadji[2], Syarifuddin Nur Wahid[1], dan Rafif Hanan Muwaffaq[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Veteran Bangun Nusantara, Sukoharjo*
***e-mail**: hendra.mawat@gmail.com*
[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
e-mail: s.a.kristiawan@ft.uns.ac.id; s.sangadji@ft.uns.ac.id
[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Veteran Bangun Nusantara, Sukoharjo
***e-mail**: nwahid421@gmail.com; rafifhanan72@gmail.com*

ABSTRAK

Kondisi geologis Kabupaten Pacitan dilewati oleh sesar grindulu dan berhadapan langsung dengan daerah subduction menjadikan wilayah Kabupaten Pacitan rawan terjadi gempa bumi. Dinding sebagai elemen bangunan Non-Engineered Building (NEB) dapat mempengaruhi respon bangunan terhadap gempa yang terjadi. Dinding pengisi seringkali dianggap sebagai bagian non-struktural dalam struktur *open frame*. Pemasangannya dinding pengisi biasanya dikerjakan setelah semua elemen utama seperti balok, kolom, dan pelat selesai dikerjakan dalam proses konstruksi. Dalam proses perencanaan, sering kali dinding pengisi tidak diperhitungkan sebagai elemen struktur. Dengan menggunakan analisis *static pushover* maka dapat diketahui perilaku kinerja seismik struktur bangunan rumah tinggal terhadap gempa pada program SeismoStruct. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis bangunan Non-Engineered Building (NEB) dengan membandingkan bangunan NEB tanpa dinding pengisi terhadap NEB dengan dinding pengisi. Analisis dilakukan dengan bantuan program seismostruct dengan melakukan modeling struktur sesuai dengan data yang ada di lapangan.

Kata kunci: dinding pengisi, gempa, Non-Engineered Building, spektrum kapasitas, *static pushover*

1. PENDAHULUAN

Gempa tidak mengakibatkan kematian tetapi keruntuhan bangunan akibat gempa yang dapat menimbulkan korban jiwa. Indonesia sering dilanda gempa bumi karena terletak pada pertemuan lempeng tektonik Wilayah Kabupaten Pacitan berada di jalur cincin api (*ring of fire*) (Ahsani, 2023; Kristiawan et al., 2023). Kondisi geologis Kabupaten Pacitan dilewati oleh sesar grindulu dan berhadapan langsung dengan daerah subduction menjadikan wilayah Kabupaten Pacitan rawan terjadi gempa bumi. Dengan adanya kejadian gempa bumi di Indonesia, maka banyak dikembangkan analisis-analisis gempa terhadap struktur (Utami, 2019).

Dalam menganalisis struktur bangunan gedung tahan gempa metode yang digunakan adalah *Performance Based Earthquake Engineered* (PBEE). PBEE terbagi menjadi dua, yaitu *Performance Based Seismic Design* (PBSD) dan *Performance Based Seismic Evaluation* (PBSE). Evaluasi pada PBSD salah satunya adalah dengan menggunakan analisis nonlinier pushover. Analisa pushover merupakan salah satu metode analisis *performance based seismic design* yang memanfaatkan teknik analisa non-linier berbasis komputer untuk menganalisa perilaku inelastis struktur dari berbagai macam intensitas gerakan tanah (gempa), dengan memberikan pola beban statik tertentu dalam arah lateral yang besarnya ditingkatkan secara bertahap *(incremental*) sampai struktur tersebut mencapai target *displacement* tertentu atau mencapai pola keruntuhan tertentu (Sultan, 2016).

Perencanaan bangunan tahan gempa pada umumnya didasarkan pada analisa elastik yang di beri faktor beban untuk simulasi kondisi bangunan ultimit (batas). Kenyataannya, perilaku runtuh struktur bangunan pada saat gempa besar adalah pada saat kondisi inelastis. Dengan merencanakan suatu struktur dengan beban gempa, banyak aspek yang mempengaruhinya diantaranya adalah periode bangunan, sangat dipengaruhi oleh massa struktur serta kekakuan struktur tersebut. Kekakuan struktur sendiri dipengaruhi oleh kondisi struktur, bahan yang digunakan serta dimensi struktur yang digunakan. Evaluasi untuk memperkirakan kondisi inelastik struktur bangunan pada saat gempa perlu untuk mendapatkan jaminan bahwa kinerjanya memuaskan pada saat terjadinya gempa (Almufid & Hidayah, 2019).

Dinding pengisi

Sistem struktur dengan dinding pengisi merujuk pada penggunaan dinding atau panel sebagai elemen yang mampu menahan gaya arah horizontal. Dinding pengisi umumnya berfungsi sebagai pembatas interior atau eksterior dalam struktur beton bertulang, khususnya untuk bangunan kelas menengah. Pemasangan dinding pengisi dilakukan setelah selesainya struktur utama, bersamaan dengan tahap penyelesaian bangunan. Oleh karena itu, dalam perencanaannya, dinding pengisi dianggap sebagai komponen non-struktural yang tidak mempengaruhi pemodelan struktur, asal beban yang dihasilkan telah dipertimbangkan sebelumnya, misalnya dengan mengasumsikannya sebagai beban merata (Bastian, 2020).

Ketika dinding pengisi mengalami tingkat pembebanan yang relatif kecil, kontribusinya terhadap kekakuan dan kekuatan struktur tetap penuh. Pada situasi tersebut, kekuatan dinding pengisi masih belum terlampaui, dan meskipun

portalnya mengalami kerusakan, kekakuan struktur secara keseluruhan tetap terjaga. Dinding akan mengalami keruntuhan jika gempa kuat terjadi, hal itu dapat menurunkan kekakuan struktur dan menyebabkan kegagalan tingkat lunak (Sudarsana et al., 2023).

Dinding pengisi seringkali dianggap sebagai bagian non-struktural dalam struktur open frame. Pemasangannya dinding pengisi biasanya dikerjakan setelah semua elemen utama seperti balok, kolom, dan pelat selesai dikerjakan dalam proses konstruksi. Dalam proses perencanaan, sering kali dinding pengisi tidak diperhitungkan. Namun, dalam beberapa kasus, ketika terdapat beban lateral yang signifikan (misalnya akibat gempa), dinding pengisi dapat memberikan kontribusi besar terhadap kekakuan dan kekuatan struktur, sehingga perilaku keruntuhan struktur tersebut menjadi berbeda dari portal terbuka (Pascanawaty et al., 2020).

Static pushover analysis

Analisis beban dorong statik pada struktur bangunan merupakan suatu pendekatan untuk melakukan analisis baik secara linier maupun non-linier dalam 2 dimensi atau 3 dimensi, di mana dampak dari gempa bumi terhadap struktur bangunan dipertimbangkan sebagai beban-beban statik yang berfungsi menahan pada pusat massa dari setiap lantai. Nilai-nilai tersebut ditingkatkan secara bertahap hingga melebihi batas pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan sendi plastis pertama di dalam struktur bangunan. Selanjutnya, dengan peningkatan beban, struktur mengalami perubahan bentuk dari keadaan elastis menjadi elasto-plastis yang signifikan hingga mencapai titik ambang keruntuhan (Safarizki et al., 2013).

Static Pushover Analysis bertujuan untuk memproyeksikan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi, serta untuk mengidentifikasi bagian-bagian kritis dari struktur. Analisis ini juga berguna untuk menentukan wilayah-wilayah yang memerlukan perhatian khusus dalam hal pendetailan atau stabilitas. Dalam analisis ini, suatu pola beban lateral statik dikenakan pada struktur secara bertahap dengan faktor pengali yang ditingkatkan hingga mencapai target perpindahan lateral tertentu dari suatu titik referensi. Titik referensi yang biasanya digunakan adalah titik pada atap atau pusat massa atap (Pramudhita & Buwono, 2019).

Analisis pushover melibatkan pembentukan kurva pushover, yakni sebuah grafik yang menggambarkan keterkaitan antara gaya geser dasar (V) dengan perpindahan titik acuan pada atap (D). Dalam proses pushover, struktur diberikan gaya dorong hingga mencapai titik leleh di satu atau lebih titik di dalam struktur tersebut. Kurva kapasitas ini menunjukkan fase linear sebelum mencapai titik leleh, kemudian transisi ke perilaku nonlinier. Selain itu, karakteristik kurva pushover dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban dorongan (Pramudhita & Buwono, 2019)

Capacity Spectrum Method (CSM) merupakan salah satu cara untuk mengetahui kinerja suatu struktur. Dalam suatu analisis static pushover akan didapat kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (base shear) dan simpangan (displacement). Kurva kapasitas ini kemudian diubah menjadi spektrum kapasitas dalam format ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum). Spektrum kapasitas merupakan kurva yang menunjukkan hubungan antara spectral acceleration (Sa) dan spectral displacement (Sd) (Mamesah et al., 2014).

Kurva kapasitas yang didapatkan dari analisis pushover memiliki perbedaan dengan hasil analisis dinamis nonlinier riwayat waktu. Keandalan analisis pushiver menurun sejalan dengan berpengaruhnya ragam yang lebih tinggi (Benjamin Lumantarna et al., 2004). Diharapkan pemilihan *Static Pushover Analysis* pada evaluasi bangunan Non-Engineered Building (NEB) yang sederhana dan hanya satu lantai dapat memberikan nilai yang mendekati analisis dinamis nonlinier riwayat waktu.

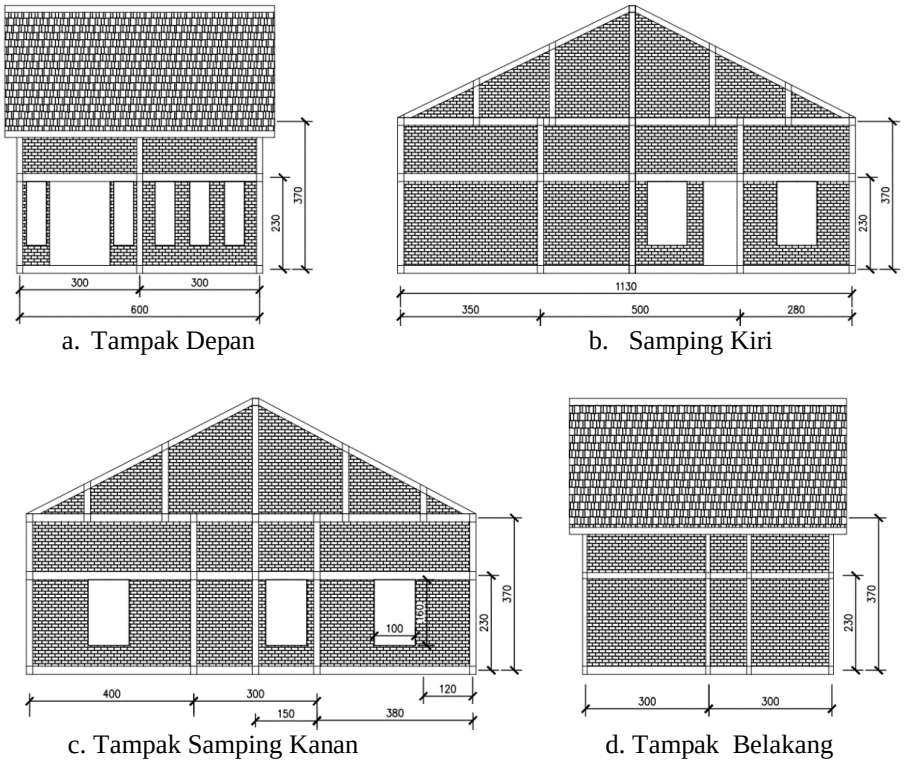
Non-Engineered building (NEB)

Bangunan Non-Engineered Building (NEB) adalah bangunan-bangunan yang dalam proses pendiriannya tanpa bantuan teknis perencanaan yang benar, tetapi hanya mengikuti kebiasaan dan praktek setempat. Ciri bangunan NEB pada bangunan rumah tinggal di wilayah Pacitan antara lain menggunakan tulangan polos, diameter pembesian yang tidak sesuai pedoman perencanaan bangunan tahan gempa (SNI 1726:2019, 2019), jarak sengkang yang tidak memadai, detil joint yang tidak memenuhi syarat, pencampuran beton yang tidak terukur, serta pengecoran beton yang buruk (Kristiawan et al., 2023). Struktur Non-Engineered Building (NEB) sangat rapuh karena berbagai tingkat kerusakan dapat terjadi pada level drfit ratio yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan batas yang ada pada code struktur yang ada (Kristiawan et al., 2024).

Makalah ini bertujuan untuk melakukan analisis bangunan Non-Engineered Building (NEB) dengan membandingkan bangunan NEB tanpa dinding pengisi terhadap NEB dengan dinding pengisi. Analisis dilakukan dengan bantuan program *seismostruct* dengan melakukan modeling struktur sesuai dengan data yang ada di lapangan.

2. MODEL STRUKTUR

Struktur Non-Engineered Building (NEB) yang ditinjau seperti tampak pada Gambar 1 adalah rumah sederhana yang berlokasi di Desa Kendal, Kecamatan Punung, Kabupaten Pacitan. Dimensi bangunan yang ditinjau berukuran panjang 11,30 meter dan lebar 6 meter. Untuk tinggi total bangunan yaitu 3,70 meter. Pemodelan struktur ini dilakukan dengan menggunakan software seismostruct. Analisis ini dilakukan dengan cara analisa *static pushover*. Bentuk dari bagian elemen balok dan kolom sesuai dengan kondisi riil di lapangan dengan dimensi balok 11x15 cm dan kolom 11x11 cm. Hasil pengujian mutu nilai kuat tekan beton 3,96 MPa (K 47,71) dan Tegangan Luluh baja berada pada nilai 4120,84 kg/cm2 (404,12 MPa). Bentuk dan mutu elemen ini menunjukkan bahwa struktur termasuk kategori



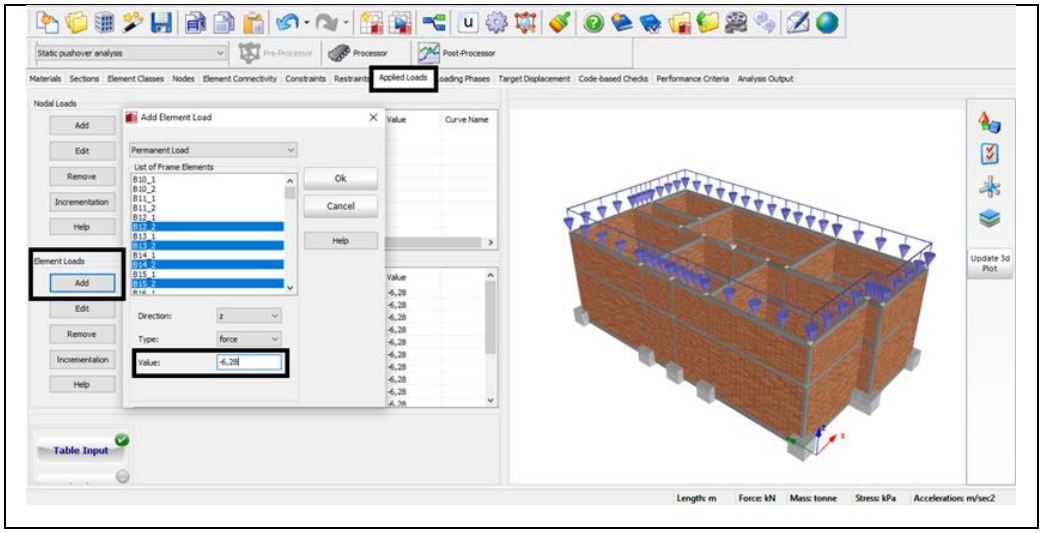
a. Tampak Depan b. Samping Kiri

c. Tampak Samping Kanan d. Tampak Belakang

Gambar 1. Gambar struktur NEB yang ditinjau.

Pemodelan struktur dilakukan dengan sistem struktur rangka tanpa dan dengan dinding pengisi (*infill frame*), bentuk rangka 3 dimensi ini dibuat dengan program *seismostruct* seperti tampak pada Gambar 2, untuk dapat mengetahui perbedaan antara NEB tanpa dinding pengisi dan dengan dinding pengisi. Setelah melakukan pemodelan, selanjutnya menginput data pembebanan kedalam program seismostruct. Setelah pemodelan struktur dan pemasukan data struktur sesuai dengan material dan spesifikasi yang digunakan selesai dilakukan, serta pembebanan juga telah diinput kedalam program *seismostruct*, maka tahapan selanjutnya yaitu melakukan analisis struktur *(run analisis*).

Run analisis dilakukan untuk melakukan perhitungan dalam menentukan gaya-gaya dalam dan respon struktur yang terjadi. Perhitungan dilakukan berdasarkan standar masing-masing yang berkaitan seperti hitungan untuk pengaruh beban gempa yang didasarkan pada tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur gedung dan non gedung, yang dimana pada penelitian ini mengacu pada (SNI 1726:2019). Setelah analisis data selesai dilakukan selanjutnya akan memperoleh output dari analisis tersebut yang selanjutnya dapat dibuat kesimpulan sesuai dari output tersebut



Gambar 2. Model Struktur NEB dalam Seismostruct

3. ANALISIS PUSHOVER

Hasil analisis pushover yaitu kurva kapasitas yang menunjukkan perilaku struktur yang menghubungkan antara perpindahan atap (*roof displacement*) pada sumbu X dalam satuan meter (m) dan gaya geser dasar (*base shear*) pada

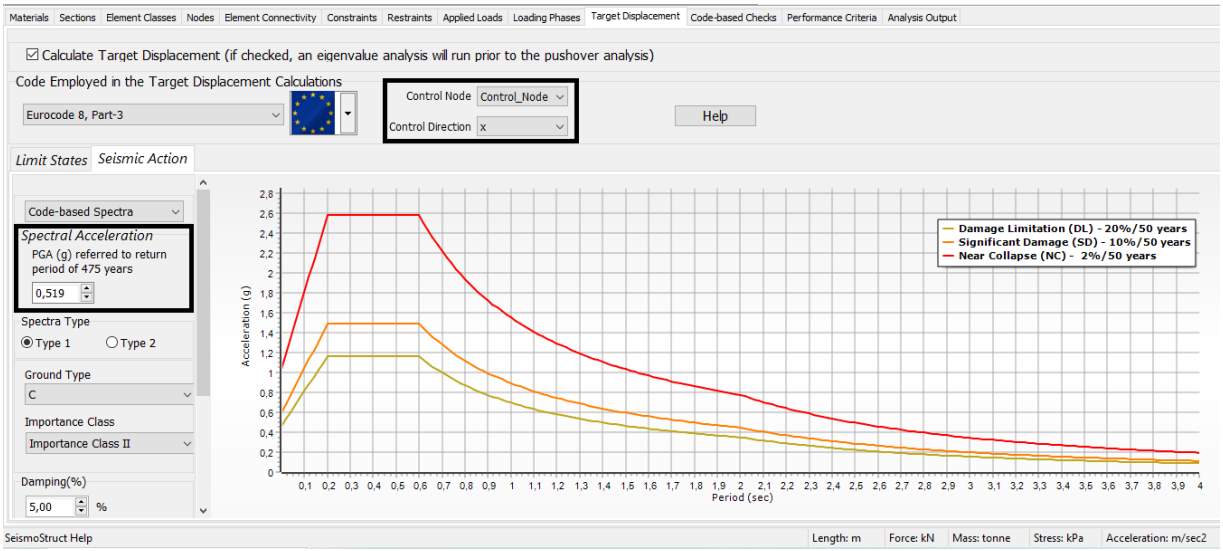
sumbu ... rusakan berdasa... lakukan analisis static pushover dalam program *seismostruct*, yaitu sebagai berikut:

Loading phases

Penentuan target displacement pada seismostruct merupakan langkah penting sebelum dilakukan running analysis. Pada tahap ini beban akan ditingkatkan sampai titik keruntuhan struktur tercapai. Oleh karena itu, dibutuhkan nilai kunci yaitu berapa kali struktur akan diberikan dorongan beban lateral *(steps)* dan sejauh apa struktur akan didorong atau bisa disebut dengan target perpindahan. Pada seismostruct, tahap ini masuk kedalam fase *"loading phases"*.

Control node pada target displacement

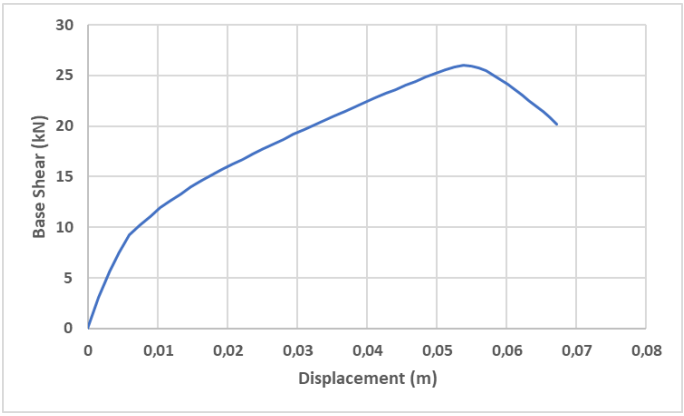
Pada tahap ini menentukan *control node* yang sesuai atau harus sama dengan analisis output pada seismostruct. Selain itu juga menentukan nilai Peak Ground Acceleration (PGA). Nilai PGA didapat dari website RSA Cipta Karya dengan nilai PGA pada daerah Kendal, Pacitan, yaitu 0,519.



Gambar 3. Penentuan Control Node dan PGA

Kurva kapasitas

Setelah dilakukan tahap pre-processor sebelumnya, selanjutnya masuk ke tahap processor yang dimana pada tahap ini kita dapat melakukan running analysis dari model yang telah dibuat. Berdasarkan hasil running analisis terhadap struktur yang telah dimodelkan, terdapat output berupa kurva kapasitas, yang dimana kurva kapasitas ini merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara beban lateral yang dapat ditahan oleh struktur (*base shear*) dan perpindahan lateral yang dialaminya *(displacement).* Adapun kurva kapasitas hasil dari analisis static pushover dengan program seismostruct dapat dilihat pada Gambar 4 untuk bangunan NEB tanpa dinding pengisi. Analisa juga dilakukan pada model bangunan NEB dengan dinding pengisi.



Gambar 4. Kurva Kapasitas bangunan NEB tanpa dinding pengisi

4. SPEKTRUM KAPASITAS

Setelah didapatkan kurva kapasitas dari hasil analisis static pushover, selanjutnya kurva kapasitas tersebut diubah menjadi spektrum kapasitas dengan format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*). Spektrum kapasitas menggambarkan hubungan antara *spectra displacement* (Sd) dan *spectra acceleration* (Sa) yang terjadi saat

struktur menerima percepatan tanah tertentu.

Perhitungan nilai α1 dan PF1

Sebelum dilakukan konversi kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas perlu dilakukan eigenvalue analisis untuk mengetahui massa struktur. Massa struktur akan dihitung secara otomatis pada seismostruct dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Massa pada Struktur yang ditinjau

Lantai	Massa (m)	Berat (W) (m x 9,81)
Roof	57,994	568,929
Lantai dasar	13,903	136,391
Total	71,898	705,321

Setelah didapat massa dan berat struktur dari analisis eigenvalue, selanjutnya dapat mengubah kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas dalam format ADRS (Acceleration Displacement Response Spectrum) seperti Tabel 2.

Tabel 2. Konversi ke ADRS

Lantai	W (kN)	m	ϕ	ϕ^2	m x ϕ	m x ϕ^2
Roof	568,9299	57,9949	0,000548	0,000000301	0,031807	0,0000174
Lantai dasar	136,3913	13,9033	0,000433	0,000000187	0,006016	0,0000026
$\sum$	705,3213	71,89819	0,000981	0,000000488	0,037822	0,0000200

Selanjutnya dilakukan perhitungan α1 dan PF1 sebagai parameter untuk mengubah kurva kapasitas menjadi spektrum kapasitas. Adapun perhitungannya sebagai berikut:

$$\alpha 1 = \frac{(m \times \phi)^2}{(m \times \phi^2) \times m}$$

$$= \frac{(0{,}037822)^2}{0{,}0000200 \times 71{,}89819}$$

$$= 0{,}992502$$

$$PF1 = \frac{(m \times \phi)}{(m \times \phi^2)}$$

$$= \frac{(0{,}037822)}{(0{,}0000200)}$$

$$= 1886{,}696$$

$$PF1 \times \phi roof = 1886{,}696 \times 0{,}000548$$

$$= 1{,}03474$$

Konversi ke spektrum kapasitas

Setelah didapat nilai α1 dan PF1, selanjutnya dapat melakukan perhitungan konversi dari kurva kapasitas (displacement - base shear) menjadi spektrum kapasitas (spectral displacement – spectral acceleration) berdasarkan teori dalam ATC-40. Adapun perhitungan Sa dan Sd sebagai berikut:

$$Sd = \frac{\Delta roof}{PF1 \times \phi roof}$$

$$= \frac{0{,}00048814}{1{,}03474}$$

$$= 0{,}000472$$

$$Sa = \frac{V/W}{\alpha 1}$$

$$= \frac{18{,}2009/705{,}3213}{0{,}992502}$$

$$= 0{,}026$$

dengan :

PF1 = Faktor partisipasi ragam untuk ragam 1

α1 = Koefisien massa ragam untuk ragam 1

V = Gaya geser dasar

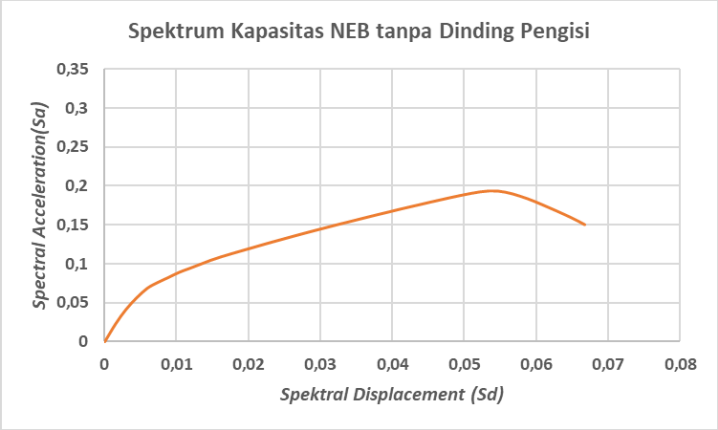
W = Berat struktur

Δroof = Perpindahan atap

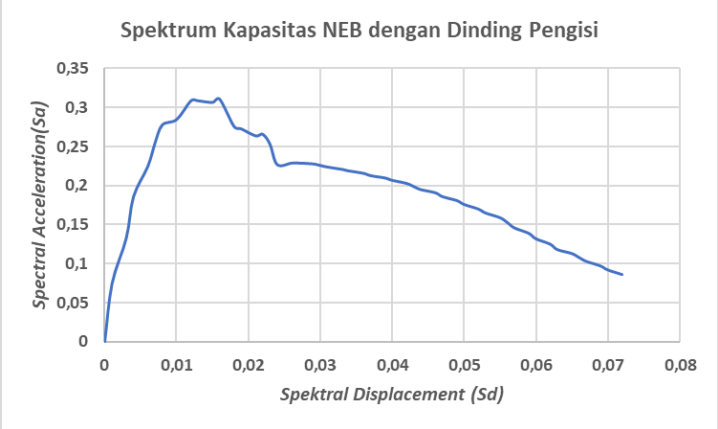
Sd = Spektrum perpindahan

Sa = Spektrum percepatan

Setelah dihitung Sd dan Sa hingga step 50, maka diperoleh hasil kurva spektrum kapasitas seperti yang tertera pada Gambar 5 dan Gambar 6 berikut ini.

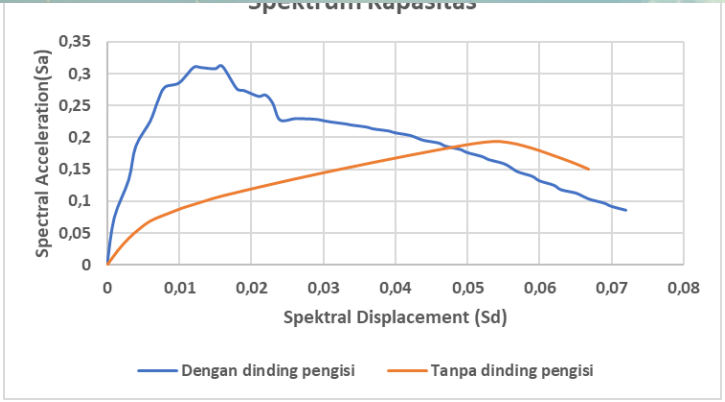


Gambar 5. Spektrum Kapasitas Bangunan NEB tanpa Dinding Pengisi



Gambar 6. Spektrum Kapasitas Bangunan NEB dengan Dinding Pengisi

Berdasarkan spektrum kapasitas pada gambar 5, dapat diketahui nilai dengan *spectral acceleration* (Sa) maksimum sebesar 0,194 yang terjadi pada *spectral displacement* (Sd) 0,053 pada struktur eksisting bangunan NEB tanpa Dinding Pengisi. Sedangkan berdasarkan hasil spektrum kapasitas pada Gambar 6 dapat diketahui nilai *spectral acceleration* (Sa) maksimal sebesar 0,311 yang terdapat pada *spectral displacement* (Sd) 0,016 untuk bangunan NEB dengan dinding pengisi. Dari Gambar 5 dan Gambar 6 kemudian dapat dilakukan perbandingan nilai Spektrum Kapasitas untuk bangunan NEB tanpa dinding pengisi dan NEB dengan dinding pengisi seperti tampak pada Gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan Spektrum Kapasitas Bangunan NEB

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan, didapatkan perbedaan nilai kurva spektrum kapasitas. Tampak perbedaan bentuk Spektrum Kapasitas Bangunan NEB tanpa dinding pengisi jika dibandingkan dengan NEB dengan dinding pengisi. Nilai *spectral acceleration* (Sa) maksimal pada bangunan NEB dengan dinding pengisi lebih tinggi jika dibandingkan dengan bangunan NEB tanpa dinding pengisi pada posisi *spectral displacement* (Sd) yang lebih rendah. Hal ini menunjukan bahwa dinding pengisi dapat memberikan pengaruh kekakuan pada bangunan NEB .

DAFTAR PUSTAKA

Ahsani, M. (2023). *Jalur Ring of Fire Butuh Bangunan Tahan Gempa*. https://radarmadiun.jawapos.com/pacitan/801717977/jalur-ring-of-fire-butuh-bangunan-tahan-gempa

Almufid, A., & Hidayah, S. (2019). Perencanaan Struktur Atas Gedung Hunian 12 Lantai Menggunakan SRPMK. *Jurnal Teknik*, *8*(2). https://doi.org/10.31000/jt.v8i2.2229

Bastian, E. (2020). Analisis Pengaruh Infilled Frame Terhadap Displacement Analysis the Effect of Infilled Frame To Displacement Frame Structure. *Jurnal Penelitian Dan Kajian Ilmiah Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat*, *XIV*(01), 52–59.

Benjamin Lumantarna, Iksan Gunawan, & Eka Wijaya. (2004). Keandalan Analisa Pushover Untuk Meramal Prilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka Dengan Reentrant Corner. *Civil Engineering Dimension*, *6*(1), 1–6. http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/civ/article/view/15580

Kristiawan, S. A., Safarizki, H. A., Purwanto, E., Sangadji, S., Trisnawan, A. D., & Nugroho, T. S. (2024). Damage State of Non-Engineered Residential Buildings Owing To Earthquakes: a Case Study in Pacitan Regency, Indonesia. *Civil and Environmental Engineering*, *20*(1), 426–439. https://doi.org/10.2478/cee-2024-0033

Kristiawan, S. A., Safarizki, H. A., Purwanto, E., Sangadji, S., Trisnawan, A. D., & Nugroho, T. S. (2023). Penentuan Batasan Tingkat Kerusakan Seismik Pada Bangunan Non-Engineered di Pacitan. *KoNTekS Ke-17 Balikpapan*, 558–568.

Mamesah, H. Y., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2014). Analisis Pushover pada Bangunan dengan Soft First Story. *Jurnal Sipil Statik*, *2*(4), 214–224.

Pascanawaty, M. S., Ernawati, A., Tech, S. T. M., Teknik, S. F., & Mataram, U. M. (2020). Analisis Perkuatan Struktur Kerangka Abngunan Bertingkat terhadap Beban Gempa dengan Infilled Frame. *Ulul Albab*, *24*(2), 80–90.

Pramudhita, G., & Buwono, H. K. (2019). Analisis Nonlinier Static Pushover Struktur Gedung Bertingkat Soft Story Dengan Menggunakan Material Beton Bertulang Dan Beton Prategang Pada Balok Bentang

Panjang. *Jurnal Konstruksia*, *10*(2), 95–106.

Safarizki, H. A., Kristiawan, S. A., & Basuki, A. (2013). Evaluation of the Use of Steel Bracing to Improve Seismic Performance of Reinforced Concrete Building. *Procedia Engineering*, *54*, 447–456. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.040

Sudarsana, I. K., Widiarsa, I. B. R., Negara, M. K. A., & Wirawan, I. P. A. P. (2023). Pengaruh Dinding Bata Bertulang Terhadap Kinerja Struktur Rangka Dengan Dinding Pengisi (Infilled Frame). *Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil Dan Teknik Informasi*, *6*(1), 1–10. https://doi.org/10.38043/telsinas.v6i1.4224

Sultan, M. A. (2016). Evaluasi Struktur Beton Bertulang. *Jurnal Sipil Sains*, *06*, 1–8.

Utami, A. M. D. (2019). Analisis Kinerja Struktur Gedung Bertingkat dengan Metode Respon Spectrum Ditinjau pada Drift dan Displacement Menggunakan Software ETABS. *Jurnal Infrastruktur*, *4*(1), 65–71. https://doi.org/10.35814/infrastruktur.v4i1.721

PERILAKU LINK BAJA KASTELA PADA STRUKTUR RANGKA BRESING EKSENTRIS

Desi Sandy[1] , H. Parung[2] , and R. Irmawaty[3] and A.A. Aminuddin[4]

[1)] Mahasiswa Pascasarjana Doktor Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa, Telp 081241042142, E mail: sandy.mylife@yaho.co.id

[2)] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 087840023116, E mail ; parungherman@yahoo.co.id

[3)] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 08114619672, E mail ; Rita_irmaway@yahoo.co.id

[4)] Dosen Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino, Km-6 Gowa Telp 082190423578, E mail ; a.arwinamiruddin@yahoo.com

ABSTRAK

Salah satu alternatif dalam merancang bangunan gedung tahan gempa adalah dengan menggunakan struktur *Eccentrically Braced Frame* (EBF). Sistem struktur EBF merupakan sebuah sistem penahan gaya lateral untuk bangunan gedung berstruktur baja di mana sistem ini dapat juga diartikan sebagai suatu hybrid antara *Moment-Resisting Frames* (MRF) yang konvensional dan *Concentrically Braced Frames* (CBF). Sistem struktur EBF merupakan sistem yang mensyaratkan perilaku inelastik hanya terjadi pada balok link selama pembebanan gempa sehingga link akan mengalami rotasi inelastik sedangkan komponen lainnya dari EBF tetap elastik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari kemampuan struktur bangunan pada elemen balok link baja kastela, dalam menahan beban siklik. yang menggunakan sistem EBF tipe Split K-Braces dengan benda uji berjumlah 1 (satu) panjang link yakni 600 mm. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban siklik pada ujung balok mulai dengan jarak 0,16 mm, hingga spesimen hancur. Menganalisis perilaku elemen link dari sistem struktur EBF pada kekuatan, kekakuan, serta disipasi energi balok link akibat diberi beban siklik.

Kata Kunci: link, beban siklik, tegangan, kekakuan, perpindahan, disipasi energi

1. PENDAHULUAN

Struktur bangunan di Indonesia harus didesain tahan terhadap gempa. Salah satu sistem struktur yang memenuhi persyaratan sebagai struktur penahan gempa adalah sistem rangka baja dengan bressing eksentris *(Eccentrically Braced Frames* (EBF)). Sistem struktur *Eccentrically Braced Frame* (EBF) merupakan sistem yang membatasi perilaku inelastik hanya terjadi pada balok link yang berada diantara dua pengekang eksentrik, sedangkan bagian balok luar, kolom dan pengekang diagonal tetap elastik selama beban seismik bekerja. Perilaku inelastis berupa kekuatan, kekakuan, dan daktilitas serta kinerja model struktur K-Split EBF saat terjadinya gempa diuji dengan beban siklik. Oleh karena itu banyak penelitian eksperimental dan analisis terdahulu yang difokuskan untuk mempelajari perilaku seismik dari link pendek.

Terdapat tiga kriteria balok link yang dimungkinkan dalam sistem struktur EBF yaitu; link pendek, link menengah dan link panjang. Kriteria ini ditentukan dari normalisasi panjang link dengan rasio antara kapasitas momen plastis (Mp) dan kapasitas geser plastis (Vp). Klasifikasi link ini yaitu link dengan rasio panjang kurang dari 1,6 dikategorikan sebagai link pendek atau link geser dikarenakan pelelehan geser yang dominan terjadi. Link dengan rasio panjang lebih dari 2,6 dikategorikan sebagai link panjang atau link lentur disebabkan lebih dominannya pelelehan lentur. Sedangkan link dengan rasio panjang di antara 1,6 sampai 2,6 dikategorikan sebagai link menengah atau link geser-lentur dikarenakan pelelehan yang terjadi merupakan kombinasi dari geser dan lentur. Penelitian yang dilakuan oleh Musmar [2012] menunjukkan bahwa sistem EBF dengan pelelehan geser (*shear link*) lebih stabil dan menunjukkan daktilitas yang lebih dibandingkan link yang mengalami pelelehan lentur. Hal ini disebabkan gaya geser internal yang terjadi konstan sepanjang link dan pelelehan pada bagian web berlangsung sepanjang bidang web dari link. Analisa numerik yang dilakukan oleh Hashemi [8] terhadap rangka EBF dengan kriteria link panjang menunjukkan bahwa pelelehan pada balok link disebabkan karena gaya lentur. Penyerapan energi pada bagian sayap penampang lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi link geser dikarenakan terjadinya premature buckling pada bagian sayap dari balok link. Untuk mengurangi hal ini maka dapat dikontrol penempatan pengaku badan pada balok link walaupun tidak terlalu efisien karena adanya pengaruh torsi. Pemakaian link panjang lebih disukai dalam arsitektur karena lebih memungkinkan pemanfaatan area dibawah balok link untuk area bukaan [9], sedangkan link pendek selalu dianjurkan dalam pemakaian karena menunjukkan daktilitas, kekakuan dan kekuatan yang lebih baik dibandingkan tipe link yang lainnya [1]. Oleh karena itu banyak penelitian eksperimental dan analisis terdahulu yang difokuskan untuk mempelajari perilaku seismik dari link.

Material baja mempunyai karakteristik yang unik dibandingkan dengan material struktur lainnya, dengan mengandalkan pada sifat daktilitas dan kekuatannya yang tinggi maka struktur baja sangat cocok digunakan untuk daerah-daerah dengan tingkat seismisitas yang tinggi. Material baja unggul dibidang yang lain, hanya saja harganya relatif mahal. Dalam pemakaiannya kadang ada yang tidak bisa diberdayakan penuh, ada bagian yang kurang berfungsi. Sebab itu ada beberapa strategi optimasi. Tiap strategi ada risiko atau konsekuensinya. Untuk itu perlu diketahui beberapa strategi optimasi yang telah berhasil diaplikasikan.

Salah satu strategi optimasi adalah balok kastela (*castellated beam*) dimana optimasi ini memodifikasi ukuran profil menjadi lebih tinggi sehingga momen inersia menjadi lebih besar. Hal ini akan meningkatkan tegangan lenturnya karena jarak dari garis netral ke bagian luar profil bertambah tanpa menambah berat sendiri dari profil tersebut. Balok baja kastella adalah balok yang mempunyai elemen pelat badan berlubang, yang dibentuk dengan cara membelah bagian tengah pelat badan, kemudian bagian bawah dari belahan tersebut dibalik dan disatukan kembali antara bagian atas dan bawah dengan cara digeser sedikit kemudian pada pelat badan yang telah disatukan kemudian dilas

2. METODOLOGI

Pada penelitian ini dilakukan terhadap portal EBF yang memiliki lebar balok 4000 mm dan tinggi portal 3000 mm dengan panjang link yang digunakan sebesar 600 mm.. Profil elemen struktur portal EBF yang digunakan yaitu profil baja untuk kolom digunakan profil H 200,200,8,12, balok link dan balok luar link digunakan profil WF 150,75,8,5.5, dan bracing digunakan profil UNP 100,50,5, model sampel pada Gambar 1.



Gambar 1. Benda uji

Set up pengujian benda uji di laboratorium dilakukan sesuai dengan pemodelan. dengan menghubungkan salah satu ujung portal benda uji dengan aktuator Dartec yang bekerja dengan gerakan tarik-tekan dalam arah tegak lurus sumbu balok link. link disambung dengan balok menggunakan baut berdiameter besar dan pelat yang tebal Pembebanan diberikan melalui aktuator pada ujung atas link berupa perpindahan siklik quasi statik yang diatur mengikuti pola pembebanan yang telah ditentukan. Pemasangan alat Instrumen yakni *strain gauge* dan *linear variable displacement transducer* (LVDT). Strain gauge adalah alat untuk mengukur regangan yang terjadi pada tempat strain gauge dipasang, sedangkan LVDT adalah alat untuk mengukur perpindahan (displacement) yang terjadi pada tempat LVDT dipasang. Pencatatan dilakukan selama pembebanan terhadap besarnya beban yang bekerja, perpindahan ujung atas link, dan regangan pada link, yaitu regangan aksial pada pelat sayap dan regangan geser pada pelat badan link. Pembebanan dihentikan ketika terjadi penurunan bacaan beban puncak pada siklus pembebanan, yang akan ditunjukkan pula oleh kegagalan yang terjadi pada benda uji.

Loading protocol yang tercantum pada AISC 2005[16] digunakan untuk mendefinisikan beban yang berupa displacement pada spesimen. Perpindahan mulai 0,16 mm diberikan pada saat siklus pembebanan pertama untuk pemberian beban siklik. Pemberian beban tersebut kemudian diteruskan dengan besaran yang sesuai dengan ketentuan hingga link mengalami kegagalan. Namun pada pemodelan kali ini pemberian beban yang dilakukan secara bertahap dibatasi hanya sampai siklus ke-25 atau sama dengan perpindahan sebesar 26 mm.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil pengujian tarik baja

Pengujian ini meliputi pengujian kuat tarik profil baja dilakukan terhadap 1 buah spesimen dengan ukuran plat Ø 12,5 mm. Hasil pemeriksaan kuat tarik profil baja IWF 150,75,8,5.5 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian tarik profil baja IWF 150,75,8,5.5

Sampel Plat	*f*y (N/mm²)	*f*u (N/mm²)	Pmax N	E Mpa
Ø 12,5	247,4	372,3	29.04	200000

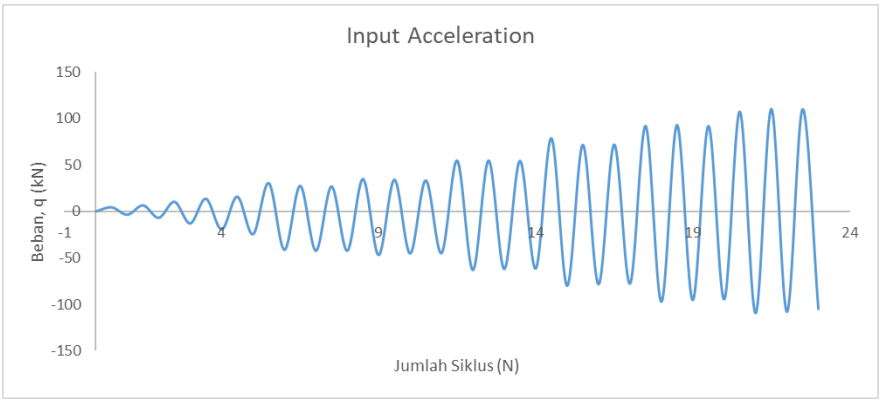
Berdasarkan data –data profil penampang pada Tabel 2, menunjukkan bahwa profil IWF 150 yang dimodifikasi menjadi profil baja kastella tanpa pengurangan berat dan mempunyai pertambahan tinggi. Sehingga momen inersianya meningkat. Berdasarkan tinggi dan nilai momen inersia dari profil baja kastella dibandingkan dengan profil IWF 300 yang mempunyai nilai momen inersia yang hampir sama dengan profil kastella tetapi memiliki berat yang lebih dari profil baja kastella. Sedangkan data-data dari profil baja kastella dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data dimensi penampang baja kastella

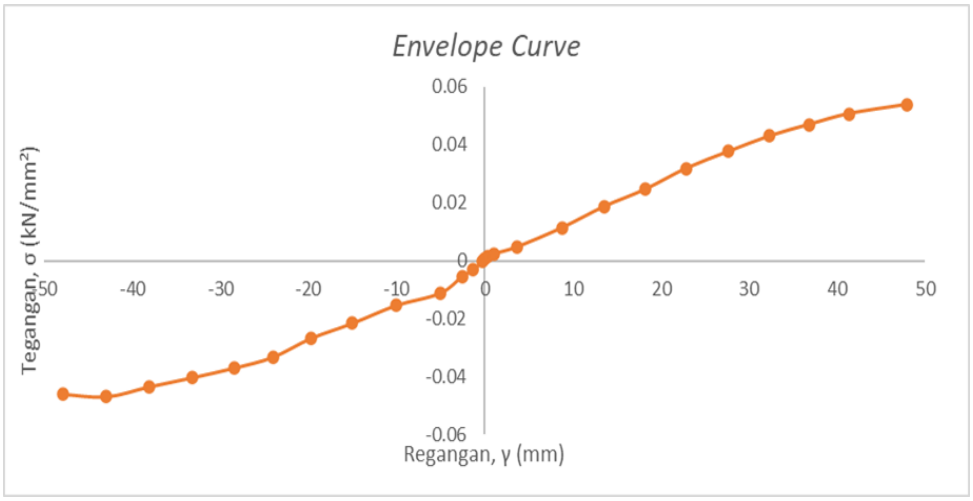
Dimensi	Satuan	BC-60^o
d_g	mm	305
d_s	mm	3,95
H	mm	10,5
‘e	mm	9
‘b	mm	6
A	mm^2	3189,5
I_x	mm^4	42110560
r_x	mm	114,9
S_x	mm^3	276134,8197

3.2 Tegangan dan Regangan

Analisa pada portal EBF link 600 menunjukkan bahwa pada beban siklik sebesar 125.835 kN untuk beban tarik dan beban tekan sebesar 117.96 kN, pada siklus 23. Adapun input accerelari seperti yang ditampilkan dalam Gambar 2. Bagian web dari link menunjukkan tegangan pada bagian balok link dengan tegangan maksimum tarik yang dihasilkan sebesar 47,88 kN/mm2 dan tegangan maksimum tekan yang dihasilkan sebesar 43,6 kN/mm2. Sedangkan nilai regangan maksimum tarik yang dihasilkan sebesar 0.0358 dan regangan maksimum tekan yang dihasilkan sebesar 0.03765, ditunjukkan pada gambar 2. Peningkatan tegangan dan regangan siklus ke-23 seperti yang ditunjukkan Gambar 3.

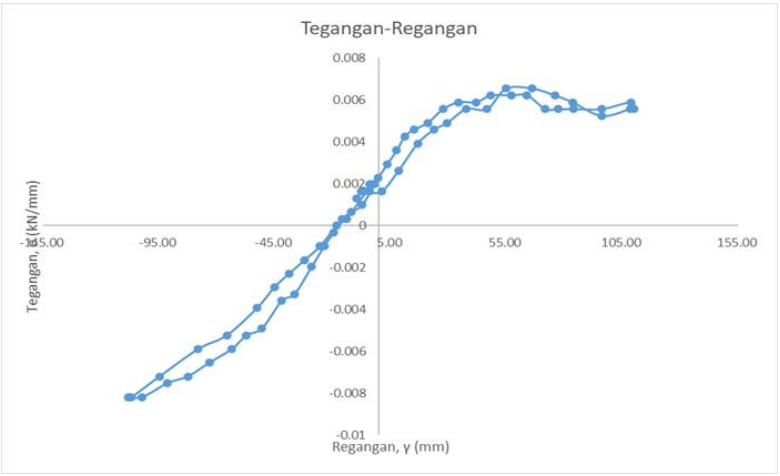


Gambar 2. *Input acceleration*



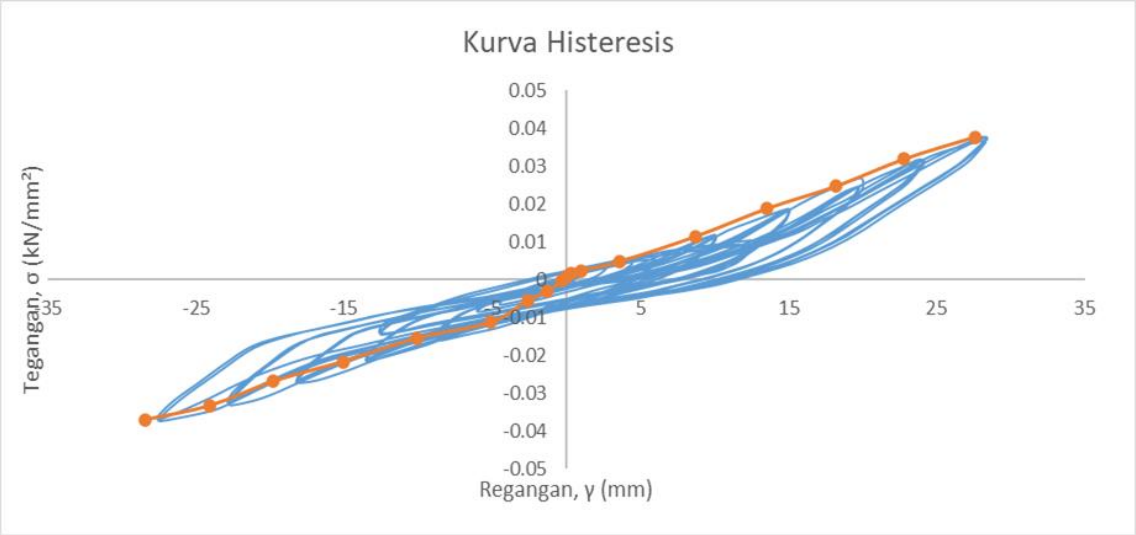
Gambar 3. *Envelope Curve* (Perbandingan tegangan dan regangan)

Peningkatan tegangan dan regangan siklus ke-23 seperti yang ditunjukkan Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan tegangan dan regangan pada siklus 23

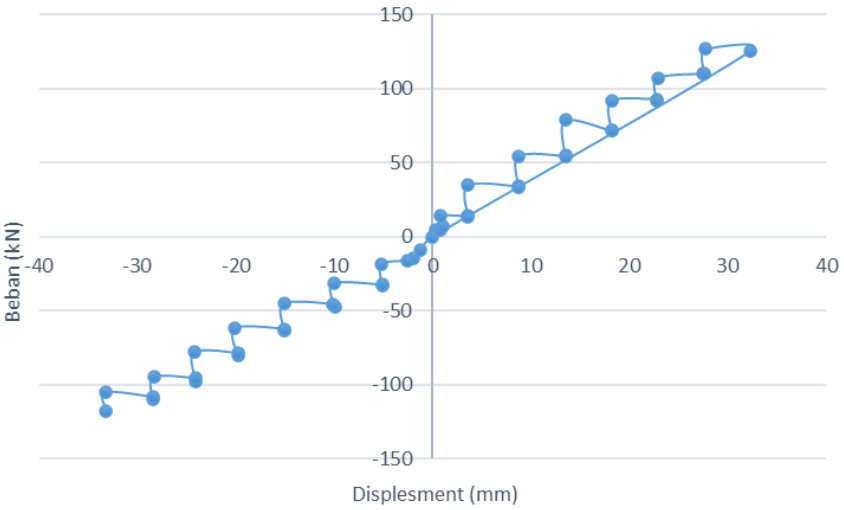
Spesimen mengalami kondisi ultimate pada saat spesimen mengalami siklus pembebanan ke-23 dimana spesimen mengalami displacement pada saat kondisi ultimate link terjadi adalah sebesar 32.32 mm pada beban tarik dan beban tekan perpindahan yang terjadi sebesar 33.18 mm pada beban tekan. Dimana link mampu menahan beban sebesar 125.835 kN untuk beban tarik dan beban tekan sebesar 117.96 kN, dapat dilihat dari kurva hysteresis pada Gambar 5,



Gambar 5. Kurva hysteresis

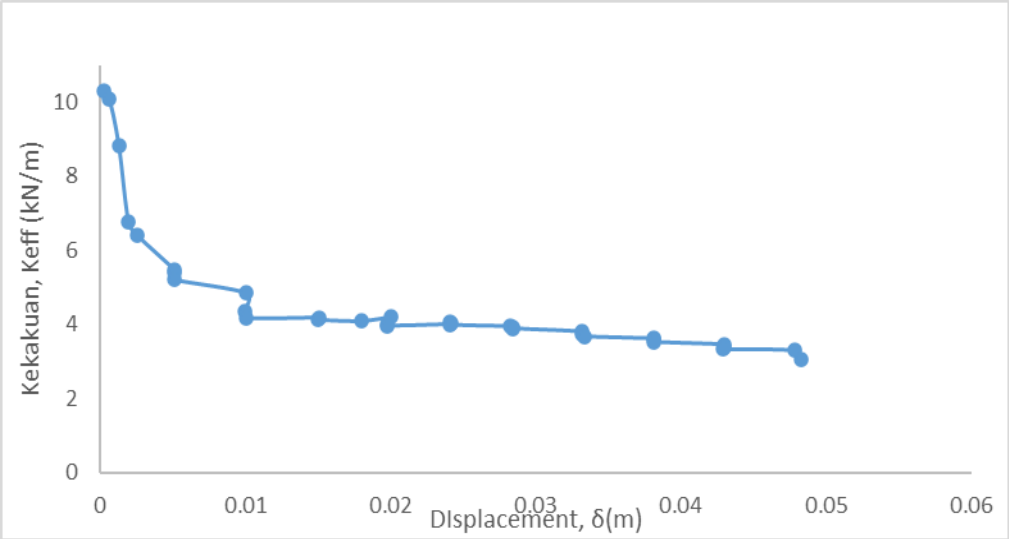
3.3 Kekuatan, Kekakuan dan Perpindahan

Pengaruh peningkatan beban siklik terhadap tegangan dan perpindahan yang dihasilkan. kemudian dikembangkan menjadi grafik hubungan perpindahan vs beban dan perpindahan vs tegangan. Dari hasil perbandingan perpindahan terhadap beban yang ditunjukkan pada Gambar 6 menunjukkan bahwa perpindahan yang terjadi saat beban sebesar 125.835 kN untuk beban tarik dan beban tekan sebesar 117.96 kN pada link adalah sebesar 32.32 mm pada beban tarik dan beban tekan perpindahan yang terjadi sebesar 28,42 mm.



Gambar 6. Perbandingan beban dan perpindahan

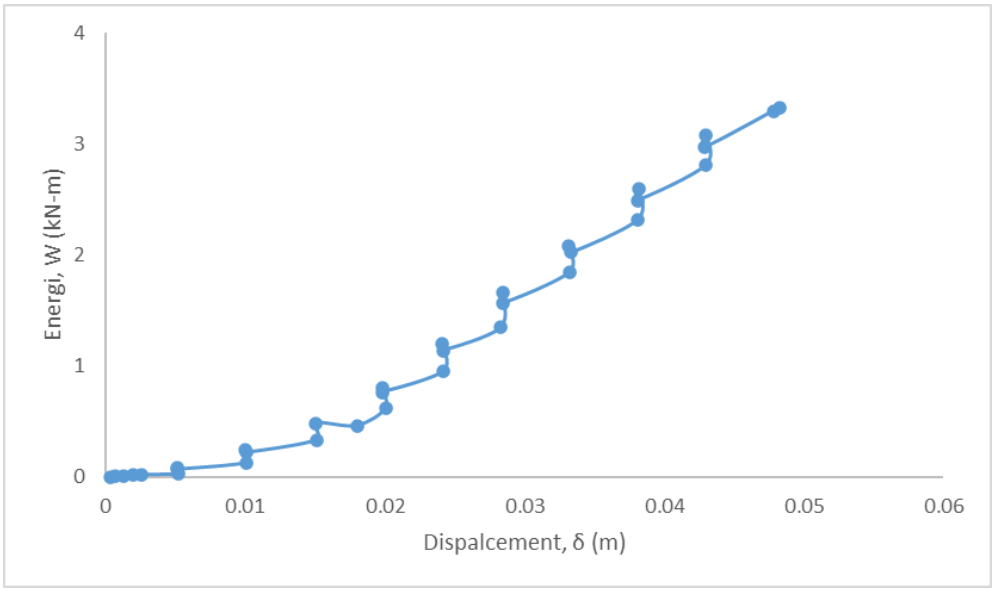
Besarnya nilai kekuatan dan kekakuan dapat ditinjau dari grafik kekakuan vs perpindahan yang diperoleh dari link dengan pemberian beban siklik portal EBF memiliki kekakuan relatif sebesar 3.80761 kNm pada siklus 23 . Hal ini dapat dipahami bahwa bresing pada EBF masih berperan sebagai pengaku, nilai kekakuan dapat pada gambar 7.



Gambar 7. Perbandingan kekakuan dengan perpindahan

3.4. Disipasi energi

Sedangkan kemampuan link dalam mendisipasi energi dapat diketahui dengan memberikan beban siklik pada elemen link. Pemberian beban disesuaikan dengan besarnya displacement yang dicapai oleh benda uji pada saat benda uji mencapai kekuatan maksimum sebelum mengalami keruntuhan, Pada benda uji ini mampu mendisipasi energi sebesar 1,6571 kNm disaat spesimen mengalami ultimate pertama terjadi pada siklus ke-22 dengan displacement yang dialami spesimen sebesar 0.02842 m atau 28,42 mm.



Gambar 8. Perbandingan disipasi energi dengan perpindahan

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Portal EBF dengan menggunakan link 600 mm memberikan distribusi tegangan maksimum tarik yang dihasilkan sebesar 47,88 kN/mm2 dan tegangan maksimum tekan sebesar 43,6 kN/mm2..
2. Dengan besaran pembeban, portal EBF dengan link 600 memiliki kekakuan dan kekuatan beban sebesar 125.835 kN untuk beban tarik dan beban tekan sebesar 117.96 kN. Sedangkan nilai kekakuan relative sebesar 3.80761 kNm
3. Perpindahan yang dihasilkan pada portal EBF sebesar 0.02842 m atau 28,42 mm dan benda uji ini mampu mendisipasi energi sebesar 1,6571 kNm.

3. Mekanisme keruntuhan pada link terjadi pada siklus 23.

5. PENUTUP

Makalah yang kami sajikan ini adalah hasil eksperimental awal (benda uji 1) dan belum mempunyai suatu perbandingan dengan benda uji yang lain. Studi secara eksperimental untuk benda benda uji 2 dan 3 masih dilakukan di laboratorium Struktur Gempa UNHAS. Dan kami sangat mengharapkan masukan-masukan dari teman-teman Peneliti, Praktisi dan Mahasiswa untuk kesempurnaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Daneshmand, Ardeshir, dan Behrokh H. Hashemi. (2011), "*Performance of Intermediate and Long Links in Eccentrically Braced Frames". Journal of Constructional Steel Research*, 70 (11) : 167-176.

Engelhardt, Michael D. (2007), "*Design of Seismic- Resistant Steel Building Structures*". *AISC Module for Teaching the Principles of Seismic-Resistant Design of Steel Building Structures, American Institute of Steel Construction*, Chicago, Illinois.

Ricles, James M., dan Egor P. Popov. (1994), "*Inelastic Link Element for EBF Seismic Analysis*". *Journal of Structural Engineering*, 120 (2): 441-463.

Popov. Egor P., Kazuhiko Kasai, dan Michael D. Engelhardt. 1987. "*Advances in Design of Eccentrically Braced Frames*". *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 20, No. 1, Maret.

Richards, Paul W., dan Chia-Ming Uang. (2005), "*Effect of Flange Width-Thickness Ratio on Eccentrically Braced Frames Link Cyclic Rotation Capacity*". Journal of Structural Engineering, 131 (10): 1546-1552.

Bruneau, Michel, Chia-Ming Uang, dan Rafael Sabbelli. (2011), "*Ductile Design of Steel Structures – Second Edition*". McGraw-Hill Companies, Inc., United States of America.

Musmar, M.A. 2012. "*Effect of Link on Eccentrically Braced Frames*". Journal of Engineering Sciences, Assiut University. Vol 40, 1 (1): 35-43.

Hashemi, Seyed H. (2011), "*Ductility and Ultimate Strength of Ecce trick Braced Frame*". Proceeding of International Conference on Advanced Materials Engineering, Kairo, Mesir, 1-3 Oktober.

Berman, Jeffrey W., Taichiro Okazaki, dan Heidrun O. Hauksdottir. (2010), "*Reduced Link Sections for Improving the Ductility of Eccentrically Braced Frame Link-to-Column Connections*". *Journal of Structural Engineering*, 136 (5) : 543-553.

ANSI/AISC, 341-10. (2010), "*Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*". *American Institute of Steel Construction*, Chicago, Illinois.

KUAT LENTUR BALOK BETON YANG MENGGUNAKAN BATANG POHON AREN SEBAGAI TULANGAN

Israel Padang[1*], Zwengly Lodi Honta[2], Jufri Manga[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jl. Jendral Sudirman No.9, Makale*
***e-mail**: israelpadang@ukitoraja.ac.id*

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jl. Jendral Sudirman No.9, Makale*
***e-mail**: zwengly@ukitoraja.ac.id*

[3]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Jl. Jendral Sudirman No.9, Makale
e-mail: jufri@ukitoraja.ac.id

ABSTRAK

Dalam penelitian ini, batang pohon aren (Arenga pinnata) diusulkan sebagai alternatif tulangan pada balok beton untuk memberikan solusi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan di industri konstruksi. Penggunaan material konvensional seperti baja memiliki dampak lingkungan yang signifikan, terutama dalam proses produksinya yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Dengan meningkatnya kesadaran terhadap isu lingkungan dan keterbatasan sumber daya alam, pencarian alternatif material yang lebih efisien dan mudah diakses menjadi sangat penting. Selain itu, biaya material baja relatif tinggi dan sering kali memerlukan impor dari luar wilayah. Batang pohon aren dipilih karena merupakan material lokal yang dapat diperbarui, memiliki kekuatan mekanis yang baik, seperti kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang cukup tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi batang pohon aren (Arenga pinnata) sebagai alternatif tulangan pada balok beton dalam rangka menciptakan solusi konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Batang pohon aren dipilih karena sifat mekanisnya yang unggul, seperti kekuatan tarik dan tekan yang signifikan, serta modulus elastisitas yang cukup tinggi, sehingga memungkinkan penggunaannya dalam aplikasi struktural. Dalam penelitian ini, dilakukan serangkaian uji lentur terhadap balok beton yang ditulangi dengan batang kayu aren, yang kemudian dibandingkan dengan balok beton yang tidak memiliki tulangan untuk mengetahui kontribusi tulangan dari batang pohon aren terhadap kuat lentur balok beton. Hasil uji menunjukkan bahwa balok beton dengan tulangan batang pohon aren memiliki kekuatan dan daya lentur yang cukup baik, dimana nilai kuat lentur rata-rata untuk balok BLTA adalah 4,93 MPa, sementara untuk balok BLK hanya 3,20 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan tulangan batang pohon aren pada balok BLTA meningkatkan kapasitas lentur sebesar 1,73 MPa. Jika dihitung dalam persentase, peningkatan kapasitas lentur tersebut adalah sekitar 54,06% dibandingkan dengan balok BLK tanpa tulangan. Temuan ini menunjukkan bahwa batang pohon aren memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai material tulangan alternatif, yang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada baja tetapi juga memberikan solusi yang lebih ramah lingkungan dalam industri konstruksi.

Kata kunci: batang kayu aren, tulangan, balok beton, kapasitas lentur, konstruksi.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan pesat industri konstruksi telah meningkatkan permintaan akan material konstruksi, terutama baja sebagai bahan tulangan. Namun, keterbatasan sumber daya alam dan dampak lingkungan yang signifikan dari produksi baja telah mendorong pencarian alternatif yang lebih berkelanjutan. Proses produksi baja secara global berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, sehingga pengurangan penggunaannya dalam konstruksi dapat berperan penting dalam upaya menurunkan jejak karbon industri ini (Olugbenga et al., 2022). Selain itu, biaya penggunaan baja sebagai tulangan relatif tinggi.

Dalam perkembangan terkini, telah muncul penggunaan material alami sebagai substitusi tulangan baja pada beton. Misalnya, batang bambu dan batang pohon aren kini dipertimbangkan sebagai alternatif tulangan, yang mendukung konsep daur ulang dan penggunaan material lokal, serta mengurangi ketergantungan pada material yang harus diimpor dari lokasi yang jauh. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengeksplorasi penggunaan bambu sebagai pengganti tulangan, dengan fokus pada kapasitas lentur balok beton. Sifat mekanis bambu menjadikannya alternatif yang layak untuk menggantikan baja, di mana perkuatan dengan bambu mampu meningkatkan kapasitas beban lentur maksimum pada balok beton. Kekuatan tarik bambu yang tinggi, yang hampir sebanding dengan baja, juga mendukung kapabilitas beban tersebut (Nuralinah D., 2016).

Namun, secara umum, performa balok bertulangan bambu masih di bawah balok beton bertulangan baja. Sebagai contoh, dalam penelitian yang dilakukan oleh Suryani & Budi (2016), diperoleh kekuatan lentur 3,98 N/mm² untuk bambu dan 12,3693 N/mm² untuk baja, menunjukkan bahwa kapasitas lentur balok tulangan baja sekitar tiga kali lebih baik daripada tulangan bambu. Temuan ini mendorong para peneliti untuk terus mencari solusi yang dapat

meningkatkan kekuatan lentur bambu hingga mencapai potensi optimalnya sebagai tulangan. Salah satu solusi yang telah dicoba adalah laminasi bambu dengan plastik, sebagaimana yang dilakukan oleh Artanto (2022), yang menunjukkan bahwa kuat lentur rata-rata balok tulangan bambu laminasi lingkaran mencapai 63,68% dari tulangan baja, sedangkan balok tulangan bambu laminasi persegi mencapai 64,90% dari balok tulangan baja.

Gagasan penggunaan batang pohon aren sebagai alternatif tulangan pada balok didasari oleh kemiripannya dengan bambu. Penelitian yang dilakukan oleh Sri et al. mengkaji sifat mekanis dan kekuatan lentur balok bertulangan kayu panggoh (aren) secara teoritis dan eksperimental, dengan hasil yang tidak jauh berbeda. Hasil uji sifat mekanis menunjukkan nilai modulus elastisitas sebesar 131.649,6 kg/cm², yang menurut Tata Cara Perencanaan Konstruksi Kayu (PKKI 2002) menempatkan kayu panggoh atau aren pada kategori mutu E18, hampir setara dengan bambu.

Pohon aren secara umum tumbuh secara lokal di berbagai wilayah tropis dengan ketinggian 100 – 1.400 meter di atas permukaan laut (MDPL), terutama di daerah Tana Toraja dan Toraja Utara. Masyarakat Toraja memanfaatkan aren dan lidi dari pohon aren untuk kerajinan sapu, memanfaatkan arak dari pohon aren untuk minuman pada acara adat, serta memanfaatkan batangnya untuk konstruksi bangunan. Penelitian menunjukkan bahwa tanaman aren memiliki potensi besar dalam berbagai aspek, termasuk sebagai bahan konstruksi. Batang pohon aren dikenal memiliki sifat ringan dan kuat, yang membuatnya potensial sebagai material tulangan yang mampu memberikan dukungan struktural memadai. Selain itu, sifat daur ulang dan biodegradabel pohon aren juga mendukung prinsip-prinsip keberlanjutan, mengurangi limbah dan dampak lingkungan setelah penggunaannya (ArsitekHijau) (Green Indonesia). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pemahaman mengenai potensi penggunaan batang pohon aren sebagai tulangan pada balok beton, serta merangsang inovasi dalam pengembangan konstruksi berkelanjutan yang ramah lingkungan. Penelitian ini juga diharapkan dapat mencakup pengembangan desain konstruksi yang mempertimbangkan karakteristik unik batang ijuk, sekaligus memastikan keberlanjutan dan keamanan strukturalnya.

2. LANDASAN TEORI

Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang merupakan elemen struktural yang esensial dalam konstruksi bangunan modern, menggabungkan beton dan tulangan baja untuk mengatasi beban lentur dan geser. Beton, yang kuat dalam menahan tekan namun lemah dalam tarik, diperkuat dengan tulangan baja untuk meningkatkan kapasitas lenturnya. Kombinasi antara beton dan baja ini memungkinkan balok menahan beban besar dan mendistribusikan tekanan secara merata di seluruh elemen bangunan. Balok beton bertulang sering digunakan untuk menahan beban struktural utama, seperti lantai dan atap. Beton berperan sebagai material kompresi, sementara baja berperan dalam menahan tegangan tarik. Penelitian oleh Putra (2020), menyoroti pentingnya pemilihan material yang tepat dan perancangan yang baik untuk memastikan kinerja balok beton bertulang dalam kondisi beban maksimum. Beton bertulang merupakan solusi yang ekonomis dan tahan lama, menjadikannya pilihan utama dalam konstruksi.

Seiring dengan perkembangan teknologi, penelitian tentang balok beton bertulang juga mengalami kemajuan signifikan. Salah satu inovasi penting adalah penggunaan bahan alam sebagai pengganti tulangan baja. Bambu dan serat alam telah menjadi fokus penelitian dalam beberapa tahun terakhir karena ketersediaannya yang melimpah dan sifat mekanis yang baik. Penelitian oleh Wijaya (2021), menunjukkan bahwa bambu memiliki kuat tarik yang sebanding dengan baja, menjadikannya alternatif yang layak untuk tulangan beton. Selain itu, penggunaan bambu sebagai tulangan dapat mengurangi biaya produksi dan dampak lingkungan, mengingat bambu adalah material yang dapat diperbarui dengan siklus pertumbuhan yang cepat. Selain itu, serat alam seperti serat kelapa dan arenjuga telah diteliti sebagai alternatif tulangan. Penelitian ini mengungkapkan bahwa serat alam dapat meningkatkan kinerja balok beton dalam hal ketahanan terhadap retak dan deformasi, sekaligus mendukung keberlanjutan dalam konstruksi. Penggunaan bahan alam ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada baja, tetapi juga berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi jejak karbon dan mempromosikan penggunaan material lokal.

Kinerja balok beton bertulang sangat bergantung pada desain dan implementasi yang tepat. Kesalahan dalam perancangan atau pemasangan dapat menyebabkan kegagalan struktural yang fatal. Penelitian oleh Hidayat dan Setiawan (2021) menekankan pentingnya uji laboratorium sebelum penerapan di lapangan untuk memastikan kinerja optimal dari balok beton bertulang. Di sisi lain, penggunaan material alam seperti bambu dan serat alam dalam balok beton bertulang juga mendukung prinsip keberlanjutan. Penggunaan bahan-bahan ini membantu mengurangi limbah dan emisi karbon, sekaligus mendukung ekonomi lokal dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia secara melimpah di berbagai wilayah Indonesia. Balok beton bertulang adalah elemen kunci dalam konstruksi bangunan yang menawarkan kombinasi kekuatan, ketahanan, dan efisiensi biaya. Perkembangan teknologi dan inovasi dalam penggunaan bahan alam terus meningkatkan kinerja dan keberlanjutan balok ini. Penelitian lebih lanjut dalam desain dan material yang digunakan akan terus berkontribusi pada peningkatan kualitas dan efisiensi balok beton bertulang di masa depan.

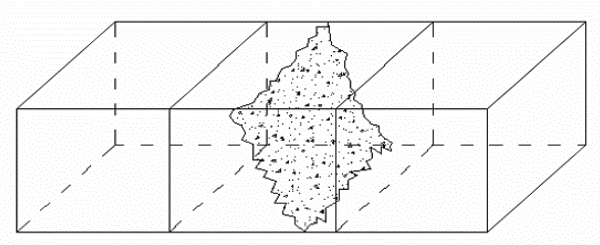
Kuat Lentur Balok

Menurut SNI 4431-2011 kuat lentur balok beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan

untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan kepadanya, sampai benda uji patah, dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas. Rumus-rumus perhitungan yang digunakan adalah :

a. Untuk pengujian dimana bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), maka kuat lentur beton dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

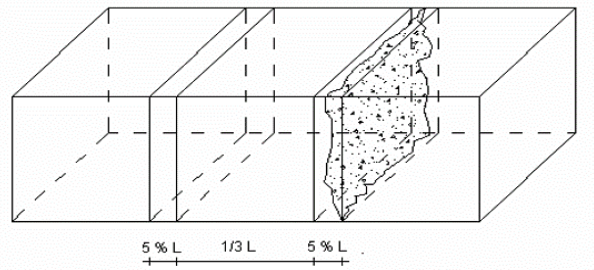
$$\sigma_1 = \frac{\boldsymbol{P.L}}{\boldsymbol{b.h^2}} \quad (1)$$



Gambar 1. Patah pada 1/3 bentang tengah

b. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan, maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan sebagai berikut:

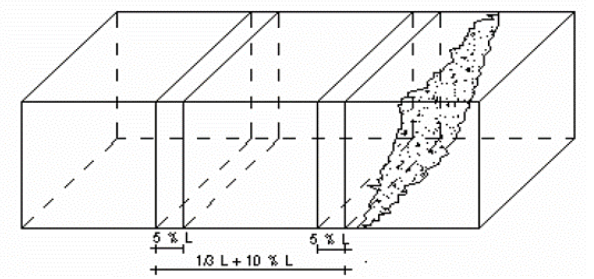
$$\sigma 1 = \frac{\boldsymbol{P.a}}{\boldsymbol{b.h^2}} \quad (2)$$



Gambar 2. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang

Dimana, σ_1 = Kuat lentur benda uji (MPa), P = Beban uji (kN), L = Jarak (bentang) antara dua garis perletakan (mm), b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm), h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm), a = jarak rata-rata antar tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada 4 tempat pada sudut dari bentang (mm), 1 Kg = 9,8 N dan 1 kN = 101,97 kg.

c. Untuk benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah lebih dari 5%, hasil pengujian tidak digunakan.



Gambar 3. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang

Batang Pohon Aren dan Sifat Mekanis

Batang pohon aren (Arenga pinnata) adalah material alami yang telah banyak diteliti karena potensinya sebagai

alternatif material konstruksi di wilayah tropis. Kayu ini memiliki tekstur keras dan serat yang kuat, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi struktural. Berdasarkan penelitian Sri et al. (2022), modulus elastisitas batang pohon aren tercatat sebesar 131,649.6 kg/cm², menunjukkan kekuatannya yang sebanding dengan kayu berkualitas tinggi seperti bambu. Kuat tekan batang pohon aren berkisar antara 40 hingga 60 MPa, sedangkan kuat tariknya berkisar antara 80 hingga 120 MPa, menunjukkan kemampuan signifikan sebagai material alternatif dalam konstruksi (Indriani & Setiawan, 2021). Penelitian lain oleh Sutrisno et al. (2020) mengindikasikan bahwa penambahan serat batang pohon aren pada beton dapat meningkatkan kuat lentur sebesar 12%, sementara Yusuf & Nanda (2021) menemukan bahwa batang pohon aren memiliki kekuatan yang cukup untuk digunakan sebagai tulangan pada struktur beton ringan. Selain itu, Wahyu & Priyadi (2023) menunjukkan bahwa dengan pengawetan yang tepat, batang pohon aren mampu bertahan dalam kondisi lembap dan memberikan kontribusi signifikan terhadap kekuatan beton ringan. Sifat mekanis yang unggul ini menjadikan batang pohon aren sebagai alternatif yang layak untuk material bangunan konvensional seperti baja, terutama dalam aplikasi yang memerlukan bahan alami yang ringan namun kuat.

METODE PENELITIAN

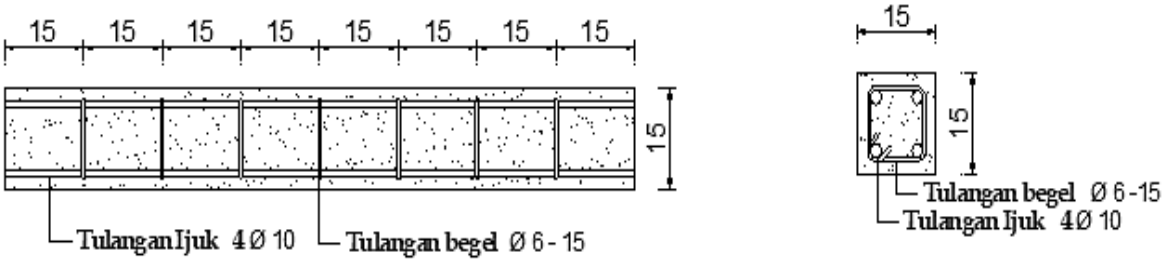
Penelitian ini dilakukan dengan metode studi eksperimental di laboratorium. Benda uji balok beton tanpa tulangan BLK dan balok beton tulangan batang pohon aren BLTA dibuat untuk mengetahui kontribusi kuat lentur dari pemanfaatan batang pohon aren sebagai tulangan. Balok beton dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 120 cm masing-masing variasi dibuat 2 benda uji antara lain 2 buah balok beton tanpa tulangan dan 2 buah balok dengan tulangan dari batang pohon aren. Mutu beton direncanakan 20 Mpa. Batang pohon aren dipilih dari batang kayu yang sudah tua, dibentuk berdiameter 10 mm dan diaplikasikan sebagai tulangan lentur. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian karakteristik agregat kasar dan halus menggunakan standar *American Society For Testing and Materials (ASTM)*, pengujian kuat tekan benda uji silinder 15x30 sebanyak 3 buah pada umur 28 hari, uji tarik tulangan batang pohon aren dilakukan di Laboratorium Universitas Kristen Indinesia Paulus Makassar dan uji lentur balok dilakukan di laboratorium Universitas Kristen Indonesia Toraja. Desain model dan penampang benda uji mengacu pada Buku Saku Petunjuk Konstruksi Bangunan Sederhana Dinas PUPR 2022.

Tabel 1 . Benda uji balok

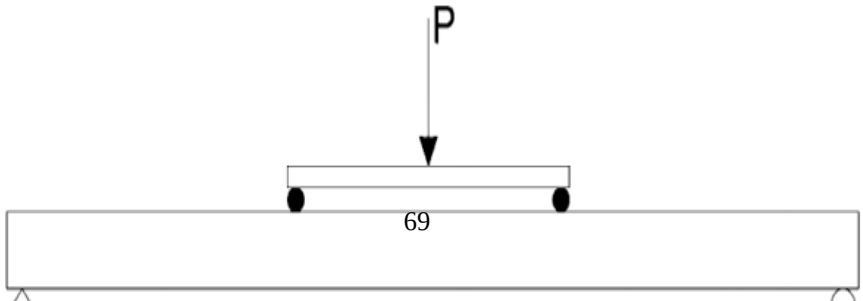
No.	Kode Benda Uji	D Tulangan	Jumlah
1	BLK	-	2 buah
2	BLTA	10 mm	2 buah



Gambar 4. Model Benda uji Balok BLK



Gambar 5. Model Benda uji Balok BLTA



Gambar 6. Model Pembebanan Benda Uji

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Tabel 2. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar

No.	Jenis Pengujian	Standar	Hasil	Keterangan
1	Kadar Lumpur	0.2 % - 6 %	0,671 %	Memenuhi
2	Bobot Isi			
	Kondisi Padat	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,629 gr/cm³	Memenuhi
	Kondisi Lepas	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,447 gr/cm³	Memenuhi
3	Kadar Air	0.5 % - 5 %	1,215 %	Memenuhi
4	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Oven)	1.6 - 3.1 gr	2,673 gr	Memenuhi
5	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Permukaan)	1.6 - 3.1 gr	2,684 gr	Memenuhi
6	Berat Jenis Semu	1.6 - 3.1 gr	2,704 gr	Memenuhi
7	Penyerapan Air	0.2 % - 5 %	0,433 %	Memenuhi
8	Abrasi (Keausan)	15 – 40 %	20,020 %	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar menunjukkan bahwa semua parameter uji memenuhi standar yang ditetapkan *American Society For Testing and Materials (ASTM).*

Hasil Pengujian Karekteristik Agregat Halus

Tabel 3. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus

NO.	Jenis Pengujian	Standar	Hasil	Keterangan
1	Kadar Lumpur	0.2 % - 6 %	2,459 %	Memenuhi
2	Bobot Isi			
	Kondisi Padat	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,424 gr/cm³	Memenuhi
	Kondisi Lepas	1.2 - 1.9 gr/cm³	1,233 gr/cm³	Memenuhi
3	Kadar Air	0.5 % - 5 %	4,458 %	Memenuhi

NO.	Jenis Pengujian	Standar	Hasil	Keterangan
4	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Oven)	1.6 - 3.1 gr	2,269 gr	Memenuhi
5	Berat Jenis Bulk (Atas Dasar Kering Permukaan)	1.6 - 3.1 gr	2,360 gr	Memenuhi
6	Berat Jenis Semu	1.6 - 3.1 gr	2,496 gr	Memenuhi
7	Penyerapan Air	0.2 % - 5 %	4,024 %	Memenuhi

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar menunjukkan bahwa semua parameter uji memenuhi standar yang ditetapkan *American Society For Testing and Materials (ASTM)*.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton normal silinder 15 cm x 30 cm sebanyak 3 buah benda uji dilakukan setelah mencapai umur 28 hari. Pengujian kuat tekan beton normal dapat dilihat pada **Tabel 4**.



Gambar 7 . Pengujian kuat tekan beton

Tabel 4 Hasil pengujian kuat tekan silinder beton normal

No	Berat (kg)	Beban (N)	Luas Penampang Silinder (mm^2)	Kuat Tekan f'_c (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata f'_c (MPa)
BN 1	12,049	340000	17662,5	19,25	18,68
BN 2	12,124	320000	17662,5	18,12	
BN 3	12,057	330000	17662,5	18,68	

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Uji mutu beton dilakukan di umur 28 hari untuk mengetahui apakah mutu rencana tercapai sebelum aplikasi pada balok beton. Berdasarkan hasil uji tekan diperoleh mutu beton rata-rata sebesar 18,68 Mpa. Hasil memperlihatkan mutu rencana tercapai 94,3%.

Hasil Pengujian Kuat Tarik Tulangan



Gambar 8 . Pengujian kuat tarik tulangan batang aren

Tabel 5 Hasil pengujian kuat tarik tulangan

Jenis Kayu	No. Kode	Beban (kN)	Luas Penampang Tul. As (Cm^2)	Kuat Tarik (Kg/Cm^2)	Kuat Tarik Rata-rata (Kg/Cm^2)
Kayu Aren	W-Ta-1	9,1	1	927,93	907,54
	W-Ta-2	8,7	1	887,14	

Sumber : Hasil Pengujian di Laboratorium Teknik Sipil UKIP Makassar , 2024

Hasil uji tarik tulangan batang pohon aren diperoleh kuat tarik rata-rata sebesar 907,54 kg/cm^2 atau sekitar 89,016 Mpa.

Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok

Tabel 6 Hasil pengujian kuat lentur balok

Sumber : Hasil Penelitian di Laboratorium Teknik Sipil UKI Toraja, 2024

Dari tabel hasil uji lentur balok memperlihatkan kinerja lentur rata-rata balok BLTA dengan tulangan batang pohon

Kode Benda Uji	L (mm)	h (mm)	b (mm)	P (KN)	P(Kg)	$\sigma 1$	
						Kg/mm^2	Mpa
BLK 1	450	150	150	24	2447,28	0,326	3,20
BLK 2	450	150	150	24	2447,28	0,326	3,20
		Rata – rata				0,326	**3,20**
BLTA 1	450	150	150	36	3670,92	0,489	4,80
BLTA 2	450	150	150	38	3874,86	0,517	5,06
		Rata – rata				0.503	**4,93**

aren mencapai 0,503 Kg/mm^2 atau sekitar 4,93 Mpa. Kontribusi kuat lentur jika dibandingkan dengan BLK dengan kuat lentur rata-rata sebesar 0,326 Kg/mm^2 atau sekitar 3,20 Mpa adalah 1,73 Mpa atau meningkatkan perfoma lentur balok sebesar 54,06%.

Kondisi Benda Uji Pasca Pembebanan



Gambar 9. Kondisi benda uji BLK pasca pembebanan



Gambar 10. Kondisi benda uji BLTA pasca pembebanan

Berdasarkan gambar kondisi benda uji pasca pembebanan, terlihat bahwa balok BLK yang tidak memiliki tulangan mengalami retakan yang signifikan di tengah bentang, menunjukkan ketidakmampuannya dalam menahan beban lentur yang diberikan. Hal ini mengindikasikan bahwa balok tanpa tulangan memiliki keterbatasan kekuatan struktural terhadap gaya tarik yang terjadi pada saat pembebanan. Sebaliknya, balok BLTA yang menggunakan tulangan batang kayu arenmemperlihatkan adanya retakan yang lebih terkontrol dan tidak separah retakan pada balok BLK. Ini menunjukkan bahwa penggunaan tulangan kayu aren memberikan kontribusi dalam meningkatkan kekuatan tarik dan daktilitas balok, sehingga mampu menahan pembebanan dengan lebih baik dibandingkan balok tanpa tulangan. Tulangan batang pohon aren berfungsi untuk mendistribusikan tegangan tarik yang terjadi, mengurangi konsentrasi tegangan di satu titik, dan memperlambat keruntuhan.

Pembahasan

- Keunggulan Kekuatan Lentur: Penggunaan tulangan kayu aren mampu meningkatkan kekuatan lentur balok beton hingga 54,06% dibandingkan dengan balok tanpa tulangan. Hal ini menunjukkan bahwa kayu aren dapat memberikan dukungan struktural yang signifikan.
- Keberlanjutan: Kayu aren adalah material yang terbarukan dan ramah lingkungan, berbeda dengan baja yang memerlukan proses produksi yang intensif energi dan menghasilkan emisi gas rumah kaca.
- Ketersediaan Lokal: Kayu aren banyak ditemukan di wilayah tropis, sehingga dapat menjadi solusi material yang lebih mudah diakses dan ekonomis di wilayah seperti Indonesia.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan :

1. Nilai kuat lentur rata-rata untuk balok BLTA adalah 4,93 MPa, sementara untuk balok BLK hanya 3,20 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan tulangan batang kayu arenpada balok BLTA meningkatkan kapasitas lentur sebesar 1,73 MPa. Jika dihitung dalam persentase, peningkatan kapasitas lentur tersebut adalah sekitar 54,06% dibandingkan dengan balok BLK tanpa tulangan. Peningkatan yang signifikan ini menegaskan efektivitas penggunaan tulangan batang pohon aren dalam meningkatkan kekuatan lentur balok.
2. Balok tanpa tulangan (BLK) mengalami keretakan yang lebih besar dan terpusat di tengah bentang, menunjukkan kegagalan struktural yang signifikan akibat ketidakmampuan balok tersebut menahan beban lentur. Sementara itu, balok dengan tulangan batang pohon aren (BLTA) menunjukkan keretakan yang lebih terkendali dan tersebar, yang mengindikasikan bahwa tulangan batang pohon aren berhasil meningkatkan kapasitas lentur balok, mengurangi konsentrasi tegangan, dan memperlambat keruntuhan.

DAFTAR PUSTAKA

Ampangallo, B. A. (2022). “Studi Perilaku Balok Beton dengan Tulangan Bambu Laminasi Limbah Plastik”. Journal on Education, Vol. 4, 1639-1649.

Green Indonesia. (n.d.). “Aren Komoditi yang Menjanjikan”. Green Indonesia. https://greenindonesia.co

Hidayat, R., & Setiawan, B. (2021). “Evaluasi Kinerja Struktural Balok Beton Bertulang pada Bangunan Bertingkat”. Jurnal Rekayasa Struktur, Vol. 5, 120-135.

Indriani, M., & Setiawan, A. (2021). “Kekuatan Tekan dan Tarik Pohon arensebagai Material Alternatif dalam Konstruksi”. Jurnal Teknologi Kayu, Vol. 10, 23-30.

Nuralinah, D. (2016). “Eksperimen dan Analisis Beban Lentur pada Balok Beton Bertulangan Bambu Rajutan”. Rekayasa Sipil, Vol. 10, 197-208.

Olugbenga, T., et al. (2022). “Structural Integrity and Environmental Impact of Sustainable Building Materials”. Journal of Cleaner Production, Vol. 362, 132377.

Putra, D. (2020). “Pengaruh Kualitas Material Terhadap Kinerja Balok Beton Bertulang di Indonesia”. Jurnal Teknik Sipil Indonesia, Vol. 10, 45-59.

Sri, W., et al. (2022). “Analisis Sifat Mekanis Pohon aren(Arenga pinnata) dan Potensinya dalam Konstruksi”. Jurnal Material Alami, Vol. 8, 45-52.

Suryani, I., Budi, A. S., & Sunarmasto. (2016). “Kuat Lentur Balok Beton Tulangan Bambu Petung Vertikal”. e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL, Desember, 1251.

Sutrisno, A., Wijaya, R., & Yuliani, S. (2020). "Pengaruh Serat Batang Pohon Aren Sebagai Penguat Pada Beton." *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 10(2), 45-52.

Wahyu, D., & Priyadi, A. (2023). "Analisis Kekuatan Mekanis Batang Pohon Aren Sebagai Tulangan Pada Struktur Beton Ringan." *Jurnal Inovasi Konstruksi*, 12(1), 25-33.

Wijaya, T. (2021). “Penggunaan Bambu sebagai Pengganti Tulangan Baja pada Balok Beton”. Jurnal Konstruksi dan Material, Vol. 9, 102-110.

Yusuf, A., & Nanda, D. (2021). "Eksplorasi Batang Pohon Aren Sebagai Material Tulangan Pada Beton." *Jurnal Material dan Konstruksi Tropis*, 8(3), 101-110.

Penentuan Parameter Tanah Untuk Perencanaan Struktur Penahan Galian

Budi, G. S.[1], dan Neoleinad, W. [2]

[1]Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Jl. Siwalankerto No. 121-131, Siwalankerto, Kec. Wonocolo, Surabaya, Jawa Timur 60236
***e-mail**: : gogot@petra.ac.id*
[2]Mahasiswa program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Kristen Petra, Jl. Siwalankerto No. 121-131, Siwalankerto, Kec. Wonocolo, Surabaya, Jawa Timur 60236
e-mail: B11210009@petra.ac.id

ABSTRAK

Pekerjaan penggalian tanah sangat umum dilaksanakan untuk struktur di bawah tanah (*sub-structures*) seperti lantai parkir, tangki air bersih (*ground water tank*), atau tangki pengolah limbah air kotor (*sewage water tank*), dll. dengan kedalaman galian yang bervariasi. Untuk menjaga kestabilan galian yang relatif dalam selama pekerjaan, diperlukan struktur penahan galian seperti *sheet pile*, *soldier pile*, *secant pile*, *diaphragm wall*, *contiguous bored pile*, dan lain-lain. Struktur penahan galian pada umumnya direncanakan dengan menggunakan bantuan program aplikasi komputer yang memerlukan parameter tanah sebagai *input data*. Seringkali beberapa parameter tanah yg diperlukan sebagai *Input data* tidak tersedia dalam Laporan hasil penyelidikan tanah, sehingga *input data* harus ditentukan berdasarkan korelasi-korelasi dengan mempertimbankan nilai tipikal yang ada. Pemilihan data yang kurang tepat sebagai *input data* akan menghasilkan desain yang kurang tepat dan dapat mempengaruhi kestabilan galian. Makalah ini membahas dan membandingkan pemilihan parameter tanah yang digunakan untuk merencanakan struktur penahan galian sedalam 3m di lapisan lempung dengan konsistensi sangat lunak/lunak. Hasil perencanaan selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran deformasi/pergerakan struktur penahan tanah yang diperoleh dari hasil *monitoring* menggunakan inclinometer. Prediksi deformasi kepala (*top*) *secant pile* berdasarkan perencanaan adalah 73mm, yang menunjukkan kesesuaian dibandingkan dengan hasil monitoring yang terjadi di lapangan selama proses penggalian, yaitu 59mm. Perbedaan yang sangat signifikan terlihat pada pergerakan/defleksi pada ujung (*tip*) *secant pile*, dimana pada hasil perencanaan ujung *secant pile* diprediksi bergeser sebesar 43 mm, sedangkan berdasarkan hasil monitoring ujung tiang relatif tidak mengalami pergerekan. Disamping itu, dalam berdasarkan perencanaan menunjukkan bahwa *secant pile* akan mengalami deformasi *bending* dibandingkan dengan data hasil pengukuran yang relatif lurus.

Kata kunci (keywords): penahan tanah, lempung lunak, galian, plaxis, inclinometer

1. PENDAHULUAN

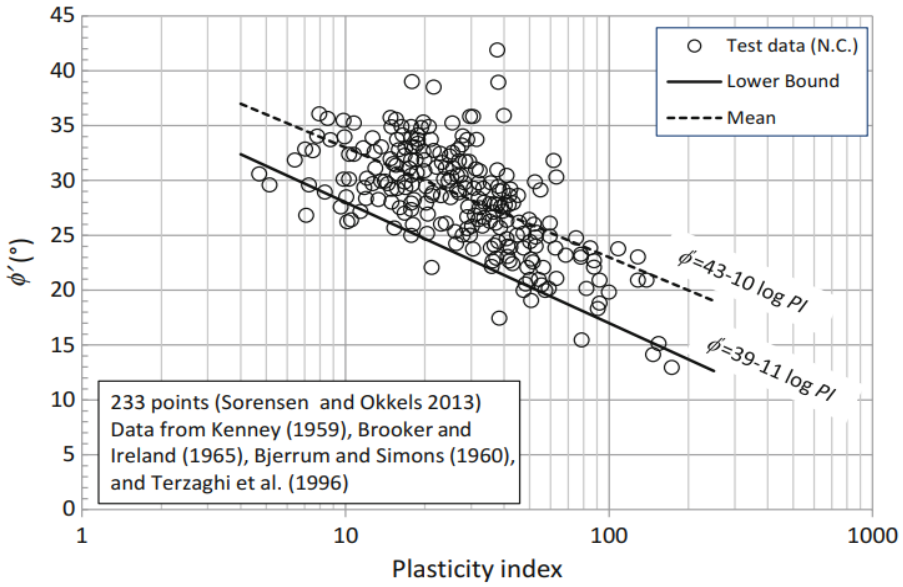
Pekerjaan penggalian tanah sangat umum dilaksanakan untuk struktur di bawah tanah (*sub-structures*) seperti lantai parkir, tanki air bersih (*ground water tank*), atau tanki pengolah limbah air kotor (*sewage water tank*), dll. Kedalaman galian bervariasi tergantung keperluan. Di Kota Surabaya, galian terdalam untuk struktur *basement* sampai tahun 2014 adalah 16.5m dari permukaan tanah *existing*, untuk mengakomodasi 5 lantai *basement*.

Secara umum, dalam pekerjaan galian yang relatif dalam diperlukan struktur penahan galian seperti *sheetpile*, *sodier pile*, *secant pile*, *diaphragm wall*, *contiguous bored pile*, dan lain-lain, untuk mempertahankan kestabilan tanah dan bangunan di sekitar (sekeliling) galian.

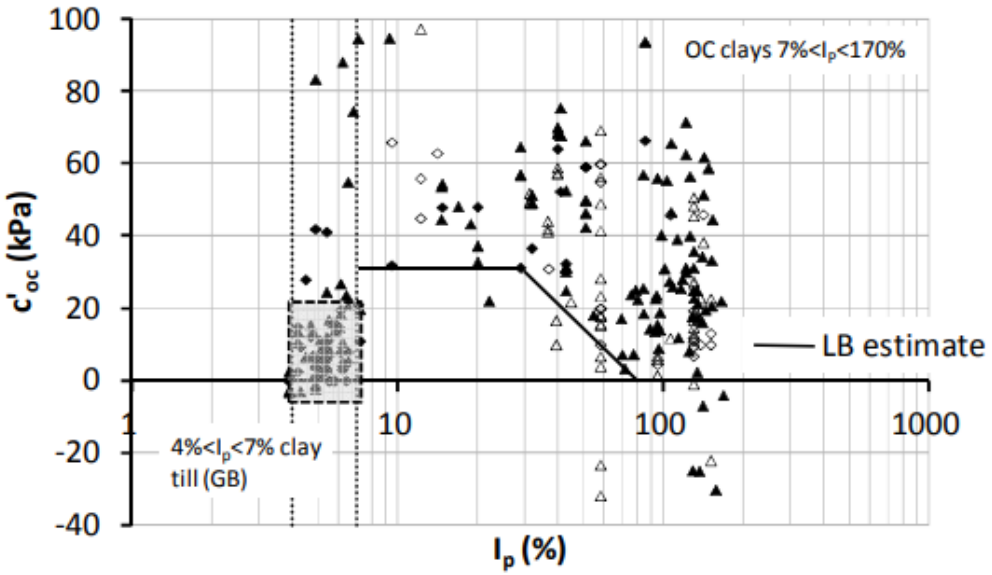
Data atau informasi beban bangunan di sekeliling galian (*surcharge load*), jenis dan parameter lapisan tanah (data tanah), kedalaman muka air tanah (m.a.t.), merupakan tiga (3) faktor utama yang harus diperhatikan dalam perencanaan, karena ke tiga faktor tersebut berpengaruh pada kekuatan dan deformasi struktur penahan galian. Selain itu, parameter lain yang diperlukan untuk perencanaan, khusunya yang menggunakan bantuan aplikasi komputer seperti Plaxis, adalah berat volume atau densiti tanah, modulus elastisitas (*Elastic modulus*) dan angka Poison (*Poisson's ratio*) tanah. Parameter kekuatan geser tanah yang diperlukan untuk perencanaan struktur penahan tanah seperti kohesi (c), sudut geser-dalam (ϕ), modulus elastisitas (E), dapat diperoleh dari pengujian tanah di laboratorium, dari korelasi dari hasil pengujian di lapangan (*Cone penetration Test*-CPT, *Standard Penetration Test*-Nspt, *Pressure meter test*, *Dilatometer test*, *Vane shear test*, dll), atau dari referensi untuk jenis tanah yang relatif sama.

Menurut Sorensen and Okkhels (2013), sudut geser-dalam tanah efektif (*effective friction angle*, ϕ') dapat diperoleh berdasarkan Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*, Ip) seperti dipresentasikan pada Gambar 1. Sedangkan Gambar 2 menujukkan korelasi antara kohesi efektif (*effective cohesion, c'*) dengan Indeks Plastisitas (*Plasticity Index*, Ip) untuk lempung dalam kondisi terkonsolidasi (*over consolidated*, OC). Sorensen dan Okkhels (2013) juga menyatakan bahwa besarnya kohesi efektif tanah terkonsolidasi (c'_{oc}) dapat diprediksi sebagai berikut:

- $c'_{oc} = 30$ (kPa) untuk $7\% < PI < 30\%$ (1)
- $c'_{oc} = 48 - 0.6(PI)$ (kPa) untuk $30\% < PI < 80\%$ (2)
- $c'_{oc} = 0$ (kPa) untuk $PI > 80\%$ (3)



Gambar 1. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dengan Sudut geser-dalam efektif (ϕ')



Gambar 2. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dengan kohesi-efektif tanah terkonsolidasi (Over Consolidated, OC)

Look, B. G (2007) mengusulkan bahwa besarnya kohesi efektif (c') tanah non-organik dengan konsistensi lunak berkisar antara 10 kPa –20 kPa, dan besarnya sudut geser-dalam efektif berkisar antara 15° – 25°.

Jay Ameratunga dan Nagaratnam Sivakugan (2016) merangkum sebaran kohesi-efektif (c') dan sudut geser-dalam efektif (C) tanah, yang didasarkan pada data *Australian Standard 4678-2002* tentang *Earth retaining structure*,

dipresentasikan pada Tabel 1.

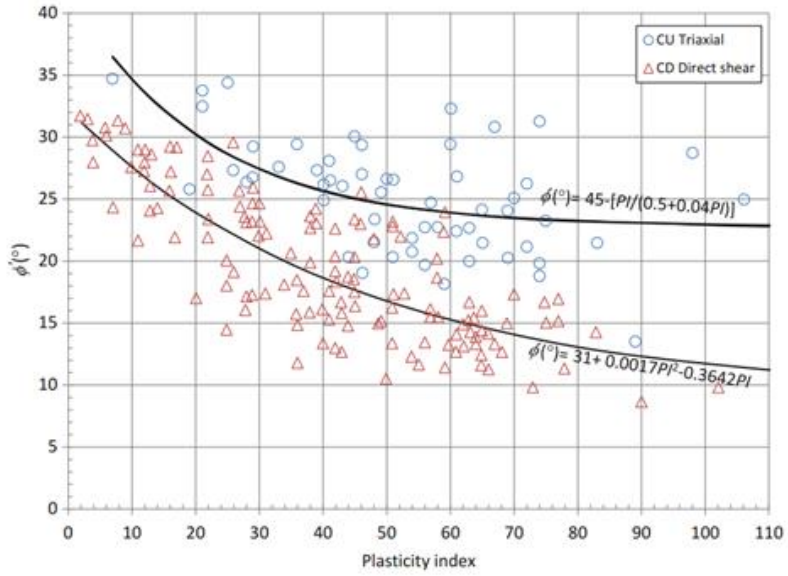
Tabel 1. Sebaran kohesi efektif (*Effective Cohesion, c'*) dan Sudut geser-dalam (*effective internal friction angle*, ϕ').

Kelompok Tanah	Tipikal tanah	Parameter Tanah	
		c' (kPa)	ϕ' (°)
Buruk	Tanah lempung lunak dan teguh dengan plastisitas sedang ke tinggi, Lempung berlanau, isian lempung bervariasi lepas, Lanau berpasir lepas	0 – 5	17 – 25
Sedang	Lempung berpasir kaku, Lempung berkerikil, Pasir berlempung padat, Lanau berpasir, isian lempung padat	0 – 10	26 – 32
Bagus	Pasir berkerikil, Pasir yang dipadatkan, Isian kerikil dan batu pasir pecah, Pasir padat bergradasi baik	0 – 5	32 – 37
Sangat Bagus	Batuan lapuk yang lemah, Isian lapis dasar jalan terkontrol, Beton daur ulang	0 – 25	36 – 43

Castellanos and Brandon (2013) memformulasikan besarnya sudut geser-dalam efektif tanah (ϕ') berdasarkan pengujian *Triaxial Consolidated Undrained*, CU seperti ditunjukkan pada perumusan (4) dan berdasarkan pengujian *Direct shear* pada pesamaan (5) sebagai berikut (Gambar 3):

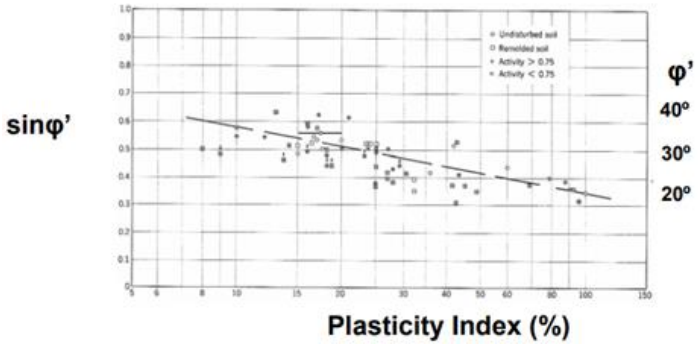
$$\emptyset' = 45 - \left[\frac{Ip}{(0.5+0.04Ip)}\right] \quad (4)$$

$$\emptyset' = 31 + 0.0017(Ip^2) - 0.3642(Ip) \quad (5)$$



Gambar 3. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dan Sudut geser-dalam efektif (ϕ') berdasarkan pengujian *Triaxial* dan *Direct shear*

Lambe and Whitman (1979) menyatakan bahwa besarnya sudut geser-dalam efektif (ϕ') atau sin (ϕ') dapat diperoleh berdasarkan korelasi dengan Indeks Plastisitas (Ip) seperti ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara Indeks Plastisitas (Ip) dan sin ϕ'

Modulus elastisitas tanah (E), menurut Schmertmann (1970) dapat ditentukan berdasarkan nilai *Standard Penetration Test* (Nspt) dan hambatan ujung (qc) dari uji *Cone Penetration Test* (CPT) sebagai berikut:
Korelasi pada tanah pasir

$$Es\ (KN/m2) = 766*Nspt \quad (6)$$

$$Es = 2\ qc \quad (7)$$

Pada tanah lempung, nilai modulus elastisitas tanah dalam keadaan *undrained* (Eu) pada tanah *normally consolidated* dan *over consolidated* dapat dikorelasikan dengan kohesi (Cu) sebagai berikut:

Tanah lempung normally consolidated (NC)

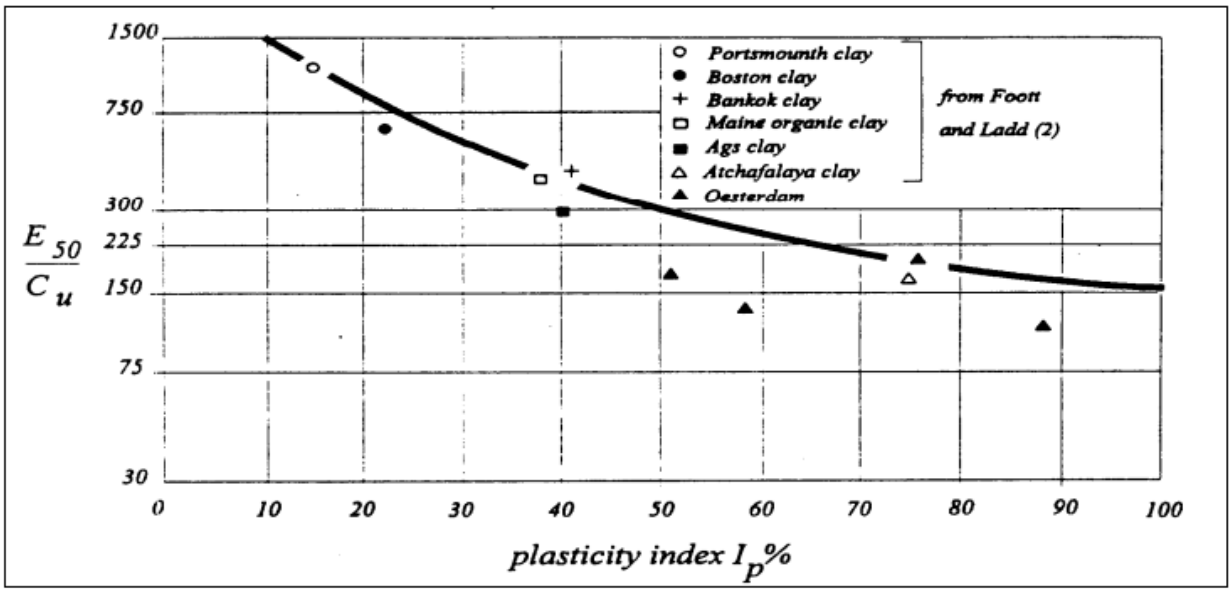
$$Eu = 250\ Cu - 500\ Cu \quad (8)$$

Tanah lempung over consolidated (OC)

$$Eu = 750\ Cu - 1000\ Cu \quad (9)$$

Termaat, Vermeer dan Vergeer (1985) menyatakan bahwa Modulus elastisitas (Eu_{50}) tanah *normally consolidated* (NC) dapat diprediksi berdasarkan parameter kuat geser tanah dalam kondisi *undrained* (Cu), yang besarnya bervariasi antara 1500 Cu – 150 Cu atau dapat dinyatakan dengan perumusan:

$$Eu_{50} \approx \frac{15000\text{Cu}}{Ip(\%)} \quad (10)$$

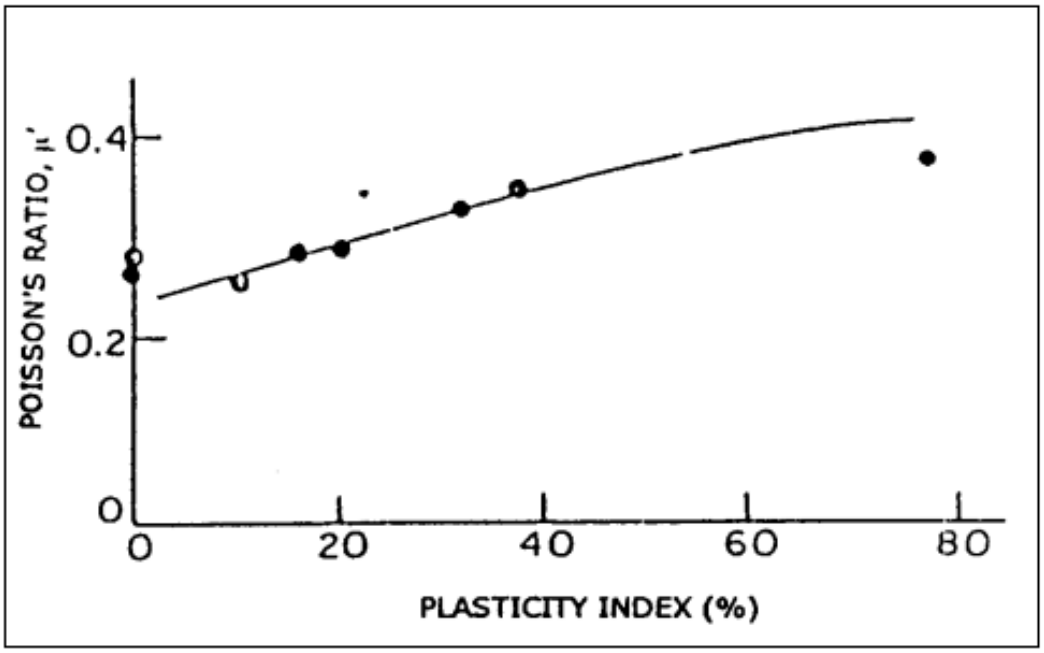


Gambar 5. Hubungan antara Modulus elastisitas E_{50}, kohesi (Cu), dan Indeks Plastisitas (Ip)
Menurut Duncan dan Buchignani (1976), hubungan antara Eu dan cu tergantung dari nilai indeks plastisitas tanah,

seperti ditunjukkan pada Gambar 5; Untuk nilai *Over Consolidated Ratio* (OCR) lebih kecil dari dua (OCR <2) berlaku:

- Eu/cu = 600 untuk nilai Ip = 30
- Eu/cu = 300 untuk nilai Ip = 50%

Menurut Wroth (1975), angka Poisson (Poisson's *ratio*) untuk tanah *normally consolidated* atau sedikit terkonsolidasi (*ligthly consolidated*) dapat diprediksi berdasarkan nilai Indeks plastisitas tanah (Ip) seperti dipresentasikan pada Gambar 6.



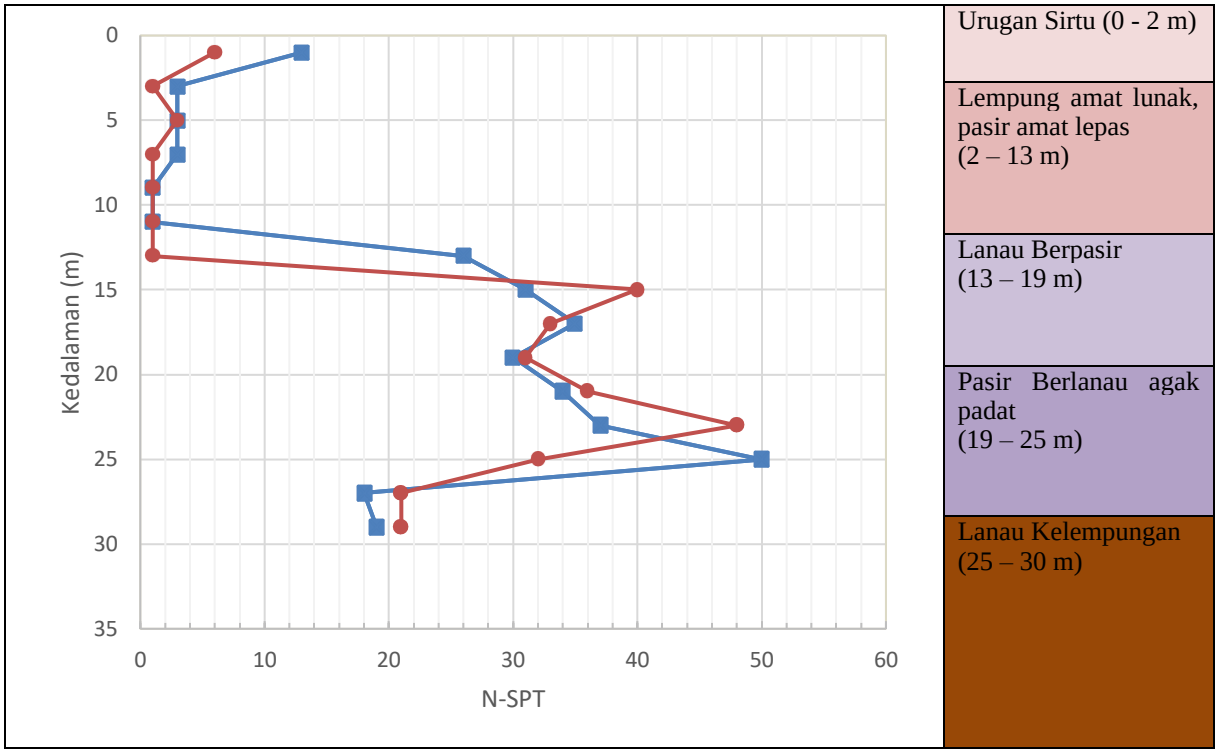
Gambar 6. Hubungan antara angka Poisson dan Indeks Plastisitas

***Monitoring* deformasi struktur penahan galian**

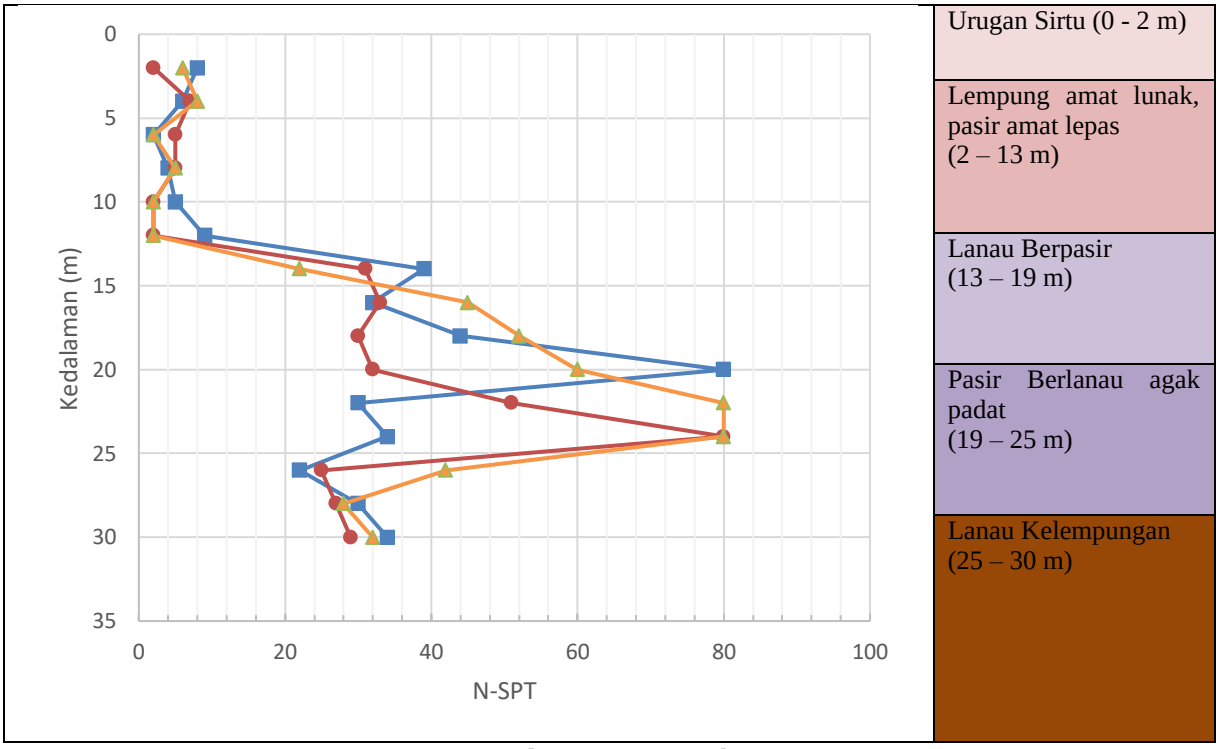
Kegiatan *monitoring* pergerakan/deformasi struktur penahan tanah yang banyak digunakan adalah *inclinometer* yang dapat dipasang (di *install*) di dalam (*embedded*) atau di luar struktur penahan galian. Hasil monitoring instrumen *inclinometer* berupa informasi pergerakan/deformasi struktur penahan tanah ke arah galian dan searah dinding galian. Dalam makalah ini disajikan penggunaan *Iclinometer* yang ditanam di dalam *secant pile* yang direncanakan untuk menahan galian pada lapisan tanah lempung sangta lunak/lunak dengan kealaman galian 3m.

Data tanah

Penggalian *basement* yang dilaksanakan berlokasi di area yang didominasi oleh lapisan tanah lempung sangat lunak/lunak. Penyelidikan tanah yang pertama (Data tanah I) dilaksanakan sebelum proses perencanaan pertama (Perencanaan I). Dalam Perencanaan I disebutkan bahwa struktur penahan galian sedalam 3m adalah *secant pile* berdiameter 80cm, jarak as-ke-as 90cm, dan panjang *secant pile* 9m. Prediksi pergerakan/defleksi *secant pile* pada elevasi permukaan tanah yang dianalisa menggunakan bantuan aplikasi Plaxis dan Geo5 masing-masing adalah 8.56mm dan 8.9mm.
Hasil analisa tersebut diperoleh dengan menggunakan parameter tanah berdasarkan hasil penyelidikan tanah pertama (Data tanah I). Dibandingkan dengan referensi yang dipublikasikan oleh Departemen Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR, 2019), parameter tanah yang dipergunakan dalam perencanaan I (Tabel 3) sangat optimis, sehingga untuk mem-verifikasi perencanaan struktur penahan galian dilakukan pengujian tanah kedua (Data tanah II). Komparasi Data tanah I dan Data Tanah II dirangkum dalam Tabel 2.
Hasil penyelidikan tanah II (Data tanah II) menunjukkan bahwa lapisan tanah di lokasi galian mirip (relatif sama) dibandingkan dengan hasil penyelidikan tanah I (Data tanah I), seperti ditunjukkan masing-masing pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Pengujian tanah II



Gambar 8. Data tanah I

Penentuan parameter tanah untuk analisa menggunakan aplikasi komputer Plaxis

Berdasarkan referensi dan beberapa korelasi parameter kekuatan geser tanah efektif (c' dan ϕ') seperti telah diuraikan di atas, struktur penahan galian direncanakan (Perencanaan II) dengan menggunakan parameter kekuatan geser tanah yang jauh lebih kecil, yaitu:

- Kohesi (efektif) c' = 3-5 KN/m^2

- Sudut geser dalam ϕ’ = 19^o
- Modulus elastisitas E = 2000 KN/m^2

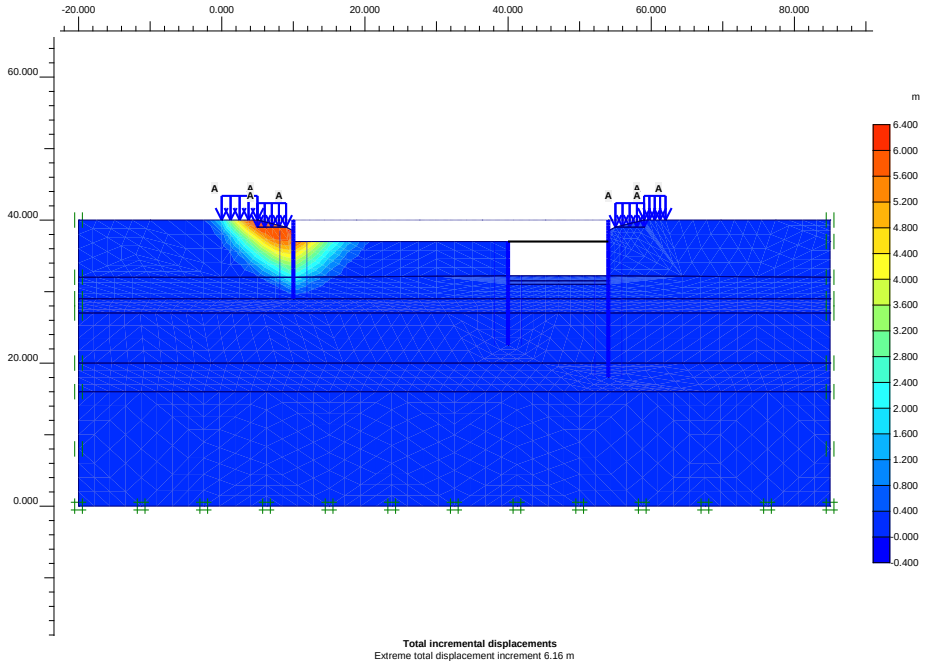
Sedangkan dimensi *secant pile* yang diusulkan berdiameter 50cm, jarak as-ke-as 70cm, dan panjang 12m. Model sistem penahan galian dipresentasikan pada Gambar 9.
Hasil analisa menggunakan aplikasi komputer Plaxis menunjukkan bahwa *secant pile* di elevasi permukaan tanah (*top*) dan ujung tiang (*pile tip*)mengalami pergerakan/defleksi masing-masing sebesar 73mm dan 43mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 10

Tabel 2. Perbandingan hasil penyelidikan tanah

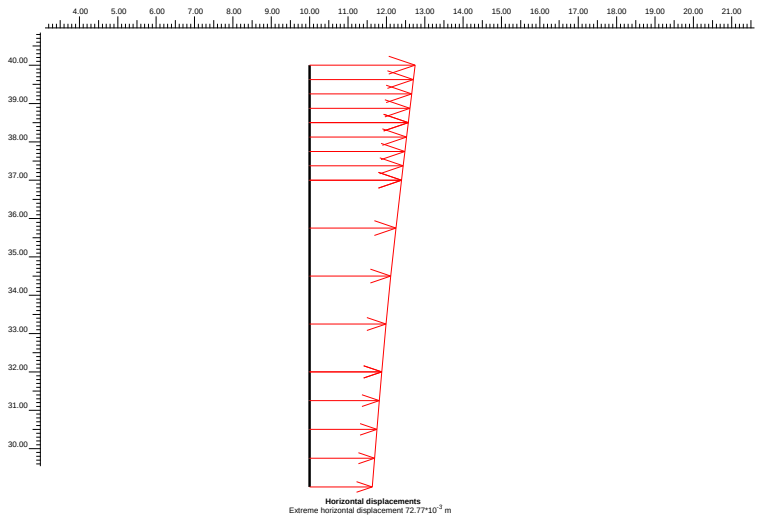
Kedalaman (m)	Penyelidikan tanah I (Data tanah I)							Penyelidikan tanah II (Data tanah II)				
	Bor 1		Bor 2		Bor 3		PI	Bor 1		Bor 2		PI
	c	ϕ^o	c	ϕ^o	c	ϕ^o		c/c’	ϕ^o/ϕ’^{o}	c/c’	ϕ^o/ϕ’^{o}	
2	-	-	-	-	-	-	Antara 30% - 35%	0.11/0.04	- / 21	0.09/0.03	- /19	Antara 20% - 36%
3	0.35	12	0.37	8	0.36	10		-	-	-	-	
4	-	-	-	-	-	-		0.06/ -	25/ -	0.10/ -	24/ -	
6	0.36	11	0.36	9	0.30	16		-	-	-	-	
8	-	-	-	-	-	-		0.08/0.05	- / 19	0.07/0.04	- /19	
9	0.38	9	0.34	11	0.37	9		-	-	-	-	
12	0.37	10	0.38	7	0.38	8		0.10	- / -	0.10	3/ -	
15	0.28	16	0.31	14	0.35	11		-	-	-	-	
18	0.30	15	0.29	16	0.33	13		-	-	-	-	

Tabel 3. Data yang digunkan untuk aplikasi Plaxis

Kedalaman, m	Perencanaan I		Perencanaan II	
	Kohesi, c’ (KN/m^2)	Sudut geser dalam, ϕ^o	Kohesi, c’ (KN/m^2)	Sudut geser dalam, ϕ^o
0.0 – 8.0	36.5	8.5	4	21
8.0 – 11.0	34.0	11.0	4	21
11.0 – 13.0	38.0	7.0	4	21
13.0 – 20.0	30.0	15.0		

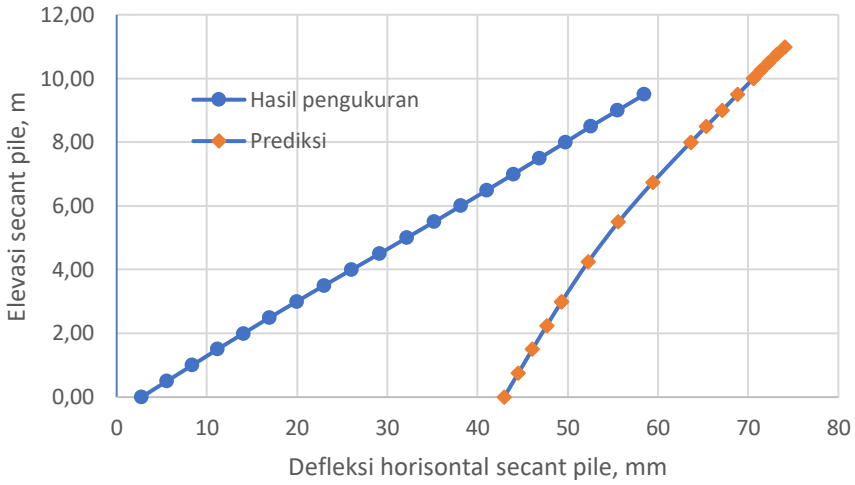


Gambar 9. Model system struktur penahan galian



Gambar 10. Deformasi/defleksi lateral struktur penahan galian (*top* = 73 mm; *tip* = 43 mm)

Prediksi deformasi *secant pile* pada akhir penggalian sedalam 3m (Perencanaan II) dan Hasil pengukuran pergerakan struktur penahan galian yang terpasang dipresentasikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Deformasi secant pile pada galian 3m

Prediksi deformasi *secant pile* berdasarkan perencanaan II menunjukkan kesesuaian dibandingkan dengan hasil monitoring yang terjadi di lapangan selama proses penggalian, dimana prediksi deformasi kepala tiang pada perencanaan adalah 73 mm sedangkan yang terjadi di lapangan 58 mm. Perbedaan yang sangat signifikan terlihat pada pergerakan/defleksi pada ujung *secant pile* (*tip*) dimana pada Perencanaan II ujung *secant pile* diprediksi bergeser sebesar 43 mm, sedangkan berdasarkan hasil monitoring ujung tiang relatif tidak mengalami pergerekan. Disamping itu, dalam Perencanaan II menunjukkan bahwa *secant pile* akan mengalami deformasi *bending* dibandingkan dengan data Hasil pengukuran yang lurus. Hal tersebut menunjukkan bahwa kekakuan *secant pile* jauh lebih besar dibandingkan dengan kekakuan tanah sehingga *secant pile* terlihat tetap lurus (tidak mengalami deformasi *bending*) dari ujung bawah (*tip*) sampai atas (*top*). Dengan kata lain, terlihat bahwa *secant pile* miring seperti akan roboh.
Perbedaan antara Prediksi dan Hasil pengukuran deformasi *secant pile* kemungkinan besar disebabkan oleh pemilihan Modulus elastisitas tanah yang kurang tepat.

Kesimpulan

- Penentuan parameter tanah untuk perencanaan struktur penahan galian sangat penting karena akan mempengaruhi kestabilan galian (*Garbage-in garbage-out*)
- Dalam penentuan parameter tanah sebaiknya memperhatikan beberapa referensi perumusan korelasi, agar diperoleh sebaran nilai tipikal tanah ”secara umum”
- Memasang instrumentasi untuk memonitor pergerakan/deformasi struktur penahan galian

DAFTAR PUSTAKA

Ameratunga, J. and Sivakugan, N. (2016), “Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering”, Springer India 2016

Castellanos, B., A,. Brandon, T., L. (2013) A comparison between the shear strength measured with direct shear and triaxial devices on undisturbed and remolded soils, Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Paris, 1, pp 317–320

Duncan, J. M. and Buchignani, A. L. (1976) An engineering manual for settlement studies, Geotechnical Engineering Report, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, USA, 94 p.

Look, G. B. (2007), “Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables”, Taylor & Francis.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1979), Soil Mechanics, John Willey, New York

Sorensen, K. K. and Okkhels, N. (2013), Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013

Schmertmann, J. H. (1970) Static cone to compute static settlement over sand. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96(SM3):1011–1043

Termaat, R. J., Vermeer, P. A. dan Vergeer, G. J. H. (1985), Comparison of prediction and performance of earth structures, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (San Francisco)

Wroth, C. P. (1975) In situ measurement of initial stresses and deformation characteristics. Proceedings conference on in situ measurement of soil properties, vol 1, pp 181–230

Pengaruh Lokasi dan Variasi Ketebalan Dinding Geser Kantilever pada Bangunan Bertingkat Simetris

Grisella Audria Gunawan[1], Ade Lisantono[2,*], Yoyong Arfiadi[3], Junaedi Utomo[4]
[1]*Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta*
[2,3,4]*Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta*
**** e-mail**: ade.lisantono@uajy.ac.id*

ABSTRAK

Struktur bangunan beton bertulang bertingkat dapat mengalami momen guling sebagai akibat dari adanya gaya aksial dan lateral. Selain itu, struktur juga menghasilkan gaya geser yang besar seiring dengan peningkatan struktur sehingga rentan terhadap keruntuhan. Keruntuhan struktur tersebut dapat dicegah dengan menggunakan elemen struktur yang dapat memberikan kekakuan dan kekuatan yang cukup, salah satunya yaitu dinding geser. Dinding geser merupakan elemen vertikal yang menahan beban lateral, seperti beban gempa dan beban angin. Dari permasalahan tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh lokasi dan variasi tebal dinding geser pada bangunan beton bertulang bertingkat. Analisis dilakukan pada bangunan simetris 7 lantai dengan menggunakan analisis Respon Spektrum. Struktur dianalisis dengan bantuan software *SeismoStruct*. Struktur berada di kota Yogyakarta dengan kondisi tanah sedang. Model struktur akan dibagi menjadi empat tipe sesuai dengan lokasi dan variasi ketebalan dinding gesernya. Dinding geser terletak di sudut terluar dan bagian tengah setiap sisi terluar bangunan. Nilai perpindahan kolom dan gaya elemen, baik kolom maupun balok dari empat model akan dibandingkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketebalan dinding geser tidak berpengaruh secara signifikan pada perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen struktur. Sedangkan lokasi dinding geser berpengaruh secara signifikan terhadap perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen strukturnya. Model dengan dinding geser di sudut terluar struktur dan memiliki variasi ketebalan dinding geser merupakan model struktur yang memiliki kekakuan paling baik dibandingkan keempat model lainnya.

Kata kunci: dinding geser kantilever, variasi lokasi, ketebalan, bangunan bertingkat, simetris

1. PENDAHULUAN

Bangunan beton bertulang bertingkat menerima gaya aksial dan lateral yang sesuai dengan ketinggian dan desain strukturnya. Gaya lateral merupakan gaya yang bekerja secara horizontal pada struktur, biasanya berasal dari angin atau gempa. Gaya tersebut menimbulkan momen guling yang menyebabkan keruntuhan pada bangunan. Maka, perlu adanya dinding geser yang sesuai untuk dapat menahan gaya dan momen tersebut secara efektif. Dengan adanya dinding geser, gaya lateral dapat ditransfer ke elemen struktur di bawahnya, yaitu pelat lantai, dinding geser di bawahnya, atau fondasi. Kekakuan lateral struktur juga dapat bertambah yang memperkuat lantai, atap, dan elemen struktur lainnya untuk tetap di posisinya atau tidak bergoyang secara berlebihan.

Dinding geser memberikan pengaruh yang signifikan pada struktur (Bongilwar dkk., 2018). Struktur dengan dinding geser dapat memperkecil periode osilasi struktur sehingga menunjukkan bahwa struktur dengan dinding geser mempunyai kekakuan yang yang lebih tinggi daripada struktur tanpa dinding geser. Dengan adanya dinding geser, kekakuan struktur meningkat dan kerusakan akibat gaya lateral dapat dihindari. Gaya horizontal akan ditanggung oleh dinding geser jika dimensinya cukup besar. Jika dibandingkan dengan struktur dengan dinding geser, gaya aksial dan momen di kolom akan mencapai maksimum pada struktur tanpa dinding geser (Rahangdale & Satone, 2013). Lokasi dinding geser yang sesuai berpengaruh pada gaya pada elemen dan besarnya perpindahan struktur. Variasi letak dinding geser memberikan efek pada besarnya gaya geser dan momen lentur kolom di setiap tingkatnya (Kaur dkk., 2019). Semakin jauh dinding geser dari pusat gravitasi struktur, besarnya gaya batang akan meningkat.

Berdasarkan latar belakang tersebut, peneliti akan menganalisis pengaruh lokasi dan variasi ketebalan dinding geser kantilever pada bangunan simetris 7 lantai. Analisis akan dilakukan menggunakan software *SeismoStruct Academic Version*. Hasil dari penelitian ini akan ditunjukkan melalui nilai perpindahan kolom dan gaya elemen strukturnya.

2. LANDASAN TEORI

Bangunan Simetris

Berdasarkan SNI 1726, 2019 Pasal 7.3.2 tentang klasifikasi struktur beraturan dan tidak beraturan, bangunan tidak beraturan diklasifikasikan berdasarkan konfigurasi horizontal dan vertikal. Bangunan simetris yaitu bangunan yang tidak mengalami ketidakberaturan horizontal. Struktur dengan ketidakberaturan horizontal dibagi menjadi beberapa tipe sebagai berikut.

a. Ketidakberaturan Torsi
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika simpangan antar tingkat maksimum (torsi yang dihitung termasuk torsi tidak terduga) di ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,2 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur.
b. Ketidakberaturan Torsi Berlebih
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika simpangan antar tingkat maksimum (torsi yang dihitung termasuk torsi tidak terduga) di ujung struktur melintang terhadap sumbu lebih dari 1,4 kali simpangan antar lantai tingkat rata-rata di kedua ujung struktur.
c. Ketidakberaturan Sudut Dalam
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika kedua dimensi proyeksi denah struktur dari lokasi sudut dalam lebih besar dari 15% dimensi denah struktur dalam arah yang ditentukan.
d. Ketidakberaturan Diskontinuitas Diafragma
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika terdapat diafragma dengan diskontinuitas atau variasi kekakuan mendadak, termasuk daerah bukaan lebih besar dari 50% daerah diafragma bruto yang melingkupinya, atau perubahan kekakuan diafragma efektif lebih dari 50% dari suatu tingkat ke tingkat selanjutnya.
e. Ketidakberaturan Pergeseran Melintang Terhadap Bidang
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika terdapat diskontinuitas dalam lintasan tahanan gaya lateral, seperti pergeseran tegak lurus terhadap bidang elemen vertikal penahan gaya lateral.
f. Ketidakberaturan Sistem Nonparalel
   Suatu struktur termasuk dalam tipe ini jika elemen vertikal penahan gaya lateral tidak simetris terhadap sumbu-sumbu ortogonal utama sistem penahan gaya seismik.

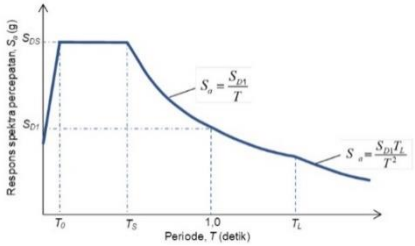
Dinding Geser Kantilever

Sistem struktur tahan gempa dapat berupa sistem rangka pemikul momen yang menggunakan balok dan kolom sebagai struktur utama untuk menahan beban lateral. Selain itu, dinding geser kantilever (*cantilever shear wall*) dapat menahan gaya lateral tersebut akibat gempa atau angin. Dinding geser merupakan dinding rangka yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur gedung terhadap beban lateral (Setia dkk., 2021). Saat terjadi gempa, dinding geser pada gedung bertingkat berperan penting dalam menopang lantai dan memastikannya tidak runtuh (Hasan & Astira, 2013). Hal ini disebabkan oleh kekakuan dinding geser yang lebih besar daripada elemen rangka biasa sehingga dapat menahan beban lateral yang lebih besar dan juga meminimalisir simpangan antar lantai (Nawy, 2009).

Dinding geser adalah pelat beton bertulang yang dipasang secara vertikal pada sisi gedung yang berfungsi menambah kekakuan struktur dan menyerap gaya geser yang meningkat seiring dengan peningkatan ketinggian struktur (Karna dkk., 2018). Dinding geser dapat menahan kombinasi beban lateral, momen, dan beban aksial (Park & Paulay, 1974). Ketebalan dinding geser akan berpengaruh pada beban aksial yang diberikan ke elemen di bawahnya, sehingga berpengaruh pada kekuatan geser dari dinding geser. Kekuatan geser dari dinding geser dihitung dengan rumus $\frac{V_u}{b.l}$, maka semakin besar luas penampang dinding geser, semakin kecil kekuatan gesernya.

Analisis Respon Spektrum

Analisis respon spektrum adalah metode analisis dinamik yang mengukur setiap mode getaran untuk menunjukkan respons seismik maksimum dari struktur. Respon spektrum gempa adalah grafik hubungan antara periode getar (T) dengan respon percepatan gempa (Sa).



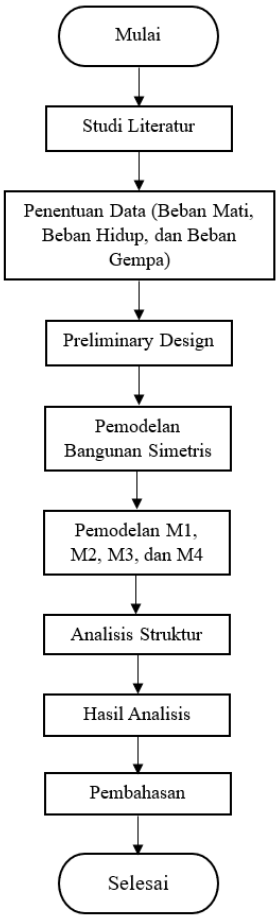
Gambar 1. Respon Spektrum

Perpindahan (*Displacement*)

Perpindahan terjadi ketika struktur dikenai beban aksial dan lateral seperti beban gempa dan angin. Perpindahan bergantung pada ketinggian dan kelangsingan struktur (Sandeep G S & Patil, 2017). *Displacement* akan meningkat seiring bertambahnya ketinggian bangunan karena struktur lebih fleksibel terhadap beban.

3. METODE PENELITIAN

Secara garis besar, metodologi penelitian dalam penelitian ini ditunjukkan melalui bagan alir seperti Gambar 2. Struktur dimodelkan sesuai dengan SNI 2847, 2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan SNI 1726, 2019 tentang Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Analisis struktur dilakukan pada *SeismoStruct* dengan metode analisis respon spektrum. Detail struktur ditunjukkan pada Tabel 1. Ketebalan dinding geser untuk model tanpa variasi ketebalan yaitu 300 mm. Model dengan variasi ketebalan memiliki ketebalan dinding geser untuk lantai 1 sampai dengan 3 sebesar 300 mm, 250 mm untuk lantai 4 s.d. 5, dan 200 mm untuk lantai 6 s.d. 7.

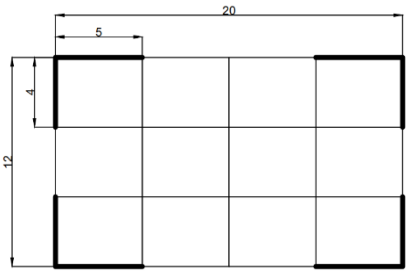
Terdapat empat model bangunan dengan lokasi dan ketebalan dinding geser yang divariasikan seperti pada Gambar 3 sampai dengan Gambar 6. Berikut penjelasan mengenai model yang dianalisis:

a. M1: Bangunan Simetris dengan dinding geser di sudut terluar tanpa variasi ketebalan
b. M2: Bangunan Simetris dengan dinding geser di sudut terluar dengan variasi ketebalan
c. M3: Bangunan Simetris dengan dinding geser di bagian tengah setiap sisi terluar tanpa variasi ketebalan
d. M4: Bangunan Simetris dengan dinding geser di bagian tengah setiap sisi terluar dengan variasi ketebalan

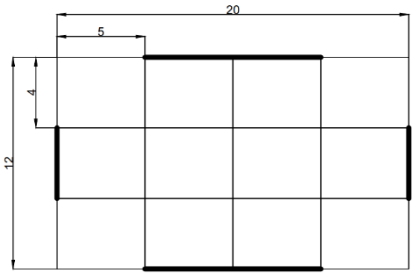
Tabel 1. Detail Struktur

Kota	Yogyakarta
Luas Struktur per lantai	240 m^2
Tinggi antar lantai	3 m
Jumlah lantai	7

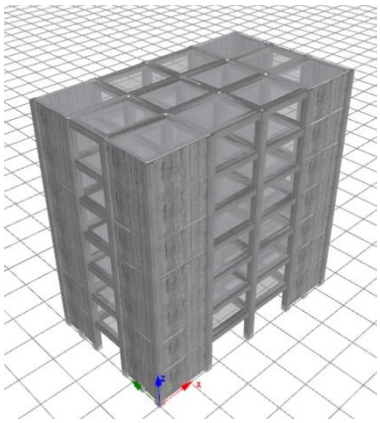
Material	Beton f'c 30 MPa Tulangan fy 420 MPa dan 280 MPa
Dimensi Balok	350 x 500 mm
Dimensi Kolom	600 x 600 mm
Tebal Pelat Lantai	150 mm
Beban Mati	2,28 kN/m^2
Beban Hidup	4 kN/m^2
Kategori risiko	II
Faktor Keutamaan Gempa (I_e)	1
R	8
Ω_0	3
C_d	5,5
Kelas Situs	Tanah sedang (SD)
KDS	D



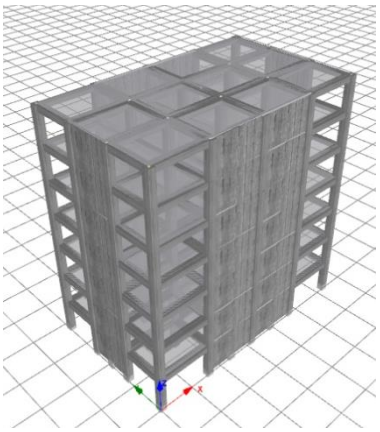
Gambar 6. Tampak Atas M1 dan M2



Gambar 5. Tampak Atas M3 dan M4



Gambar 4. M1 dan M2 dalam Bentuk 3 Dimensi



Gambar 3. M3 dan M4 dalam Bentuk 3 Dimensi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

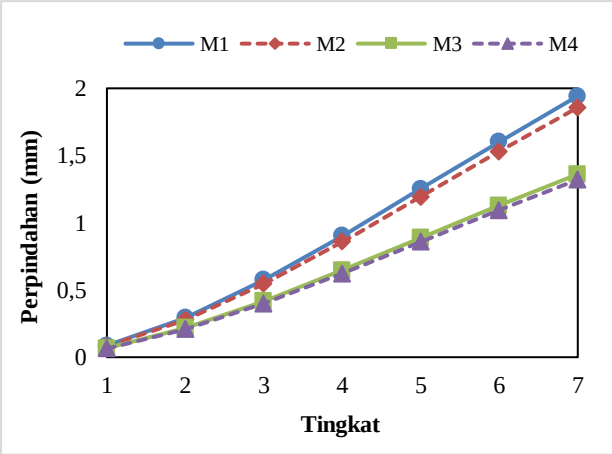
Perpindahan Elemen Kolom

Nilai perpindahan akan bertambah seiring dengan bertambahnya ketinggian struktur. Tingkat struktur teratas mengalami ayunan (deformasi) yang paling besar akibat gaya lateral karena kekakuan struktur yang lebih rendah daripada tingkat-tingkat sebelumnya. Hal ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada Tabel 2 yang menunjukkan perpindahan kolom yang terletak pada sudut terluar struktur, baik dari arah X maupun arah Y.

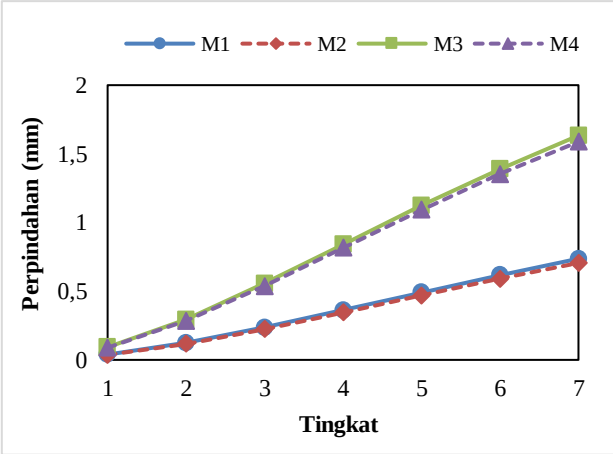
Tabel 2. Perpindahan Kolom di Sudut Terluar Struktur

Tingkat	Nilai Perpindahan (mm)							
	Arah-X				Arah-Y			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
1	0,0875	0,0829	0,0672	0,0645	0,0388	0,0369	0,0920	0,0891
2	0,2941	0,2787	0,2174	0,2086	0,1241	0,1179	0,2947	0,2852
3	0,5763	0,5456	0,4175	0,4003	0,2362	0,2242	0,5560	0,5378
4	0,9038	0,8584	0,6468	0,6229	0,3620	0,3450	0,8409	0,8158
5	1,2519	1,1924	0,8884	0,8583	0,4915	0,4695	1,1241	1,0922
6	1,6018	1,5297	1,1290	1,0945	0,6176	0,5913	1,3899	1,3522
7	1,9431	1,8573	1,3606	1,3206	0,7367	0,7054	1,6333	1,5877

Dari keempat model, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) memiliki nilai perpindahan yang sedikit lebih kecil daripada M1 dan M3. Struktur dengan dinding geser di sudut (M1 dan M2) mengalami penurunan perpindahan sekitar 4%, sedangkan dinding geser yang terletak di sisi tengah terluar struktur (M3 dan M4) mengalami penurunan sekitar 3%. Berdasarkan Gambar 7 dan 8, Tipe M2 merupakan model yang paling efektif karena nilai perpindahan pada arah Y turun sebesar 55,6%, jika dibandingkan dengan tipe M4. Sama halnya dengan penelitian ini, menurut Ahamad & Pratap (2020) serta Rao & Narasaiah (2022) bahwa lokasi dinding geser pada sudut bangunan merupakan lokasi paling optimum dalam menahan gaya lateral.



Gambar 8. Perpindahan Arah X pada Kolom di sudut Terluar



Gambar 7. Perpindahan Arah Y pada Kolom di Sudut Terluar

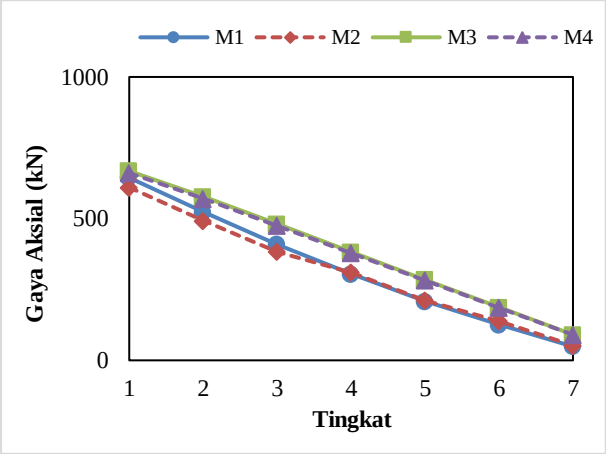
Gaya Aksial Kolom

Gaya aksial kolom dari keempat model struktur ditunjukkan pada Tabel 3. Tipe kolom K1 adalah kolom yang terletak di dekat dinding geser, sedangkan K10 adalah kolom yang terletak jauh dari dinding geser. Berdasarkan Gambar 9 dan 10, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) tidak memberikan pengaruh yang signifikan jika dibandingkan dengan struktur tanpa variasi ketebalan dinding geser (M1 dan M3). Lokasi dinding geser di sudut terluar struktur (M2) dapat mengurangi gaya aksial kolom K1 sebesar 21,55%. Namun, gaya aksial kolom K10 meningkat sebesar 6,87%.

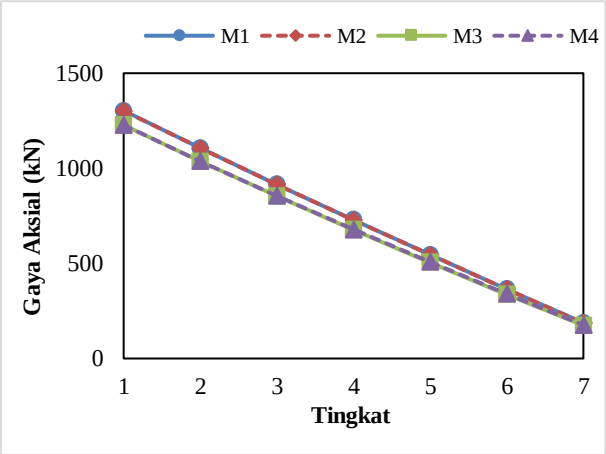
Tabel 3. Gaya Aksial Kolom

Tingkat	Kolom	Gaya Aksial (kN)				Rasio (%)		
		M1	M2	M3	M4	M1 & M2	M3 & M4	M2 & M4
1	K1	644,312	610,061	668,078	661,124	5,61	1,05	-7,72
	K10	1303,263	1302,233	1227,067	1227,494	0,08	-0,03	6,09
2	K1	523,560	493,009	576,937	570,684	6,20	1,10	-13,61
	K10	1107,062	1106,080	1036,699	1037,405	0,09	-0,07	6,62
3	K1	409,489	383,087	480,623	475,605	6,89	1,06	-19,45

	K10	916,277	915,388	853,932	855,240	0,10	-0,15	7,03
4	K1	304,649	310,628	382,456	378,845	-1,92	0,95	-18,01
	K10	729,504	728,734	677,279	679,225	0,11	-0,29	7,29
5	K1	207,747	210,993	284,098	281,801	-1,54	0,82	-25,13
	K10	546,119	545,519	505,735	508,136	0,11	-0,47	7,36
6	K1	125,702	138,832	187,040	185,741	-9,46	0,70	-25,25
	K10	364,913	364,500	337,634	340,086	0,11	-0,72	7,18
7	K1	48,658	52,607	90,747	90,201	-7,50	0,61	-41,68
	K10	187,428	187,236	174,409	175,803	0,10	-0,79	6,50
Rata-Rata					**K1**	**-0,25**	**0,90**	**-21,55**
					K10	**0,10**	**-0,36**	**6,87**



Gambar 10. Gaya Aksial Kolom K1



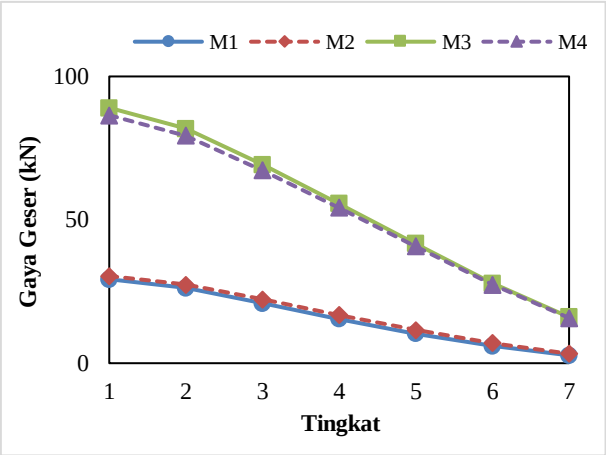
Gambar 9. Gaya Aksial Kolom K10

Gaya Geser Kolom dan Balok

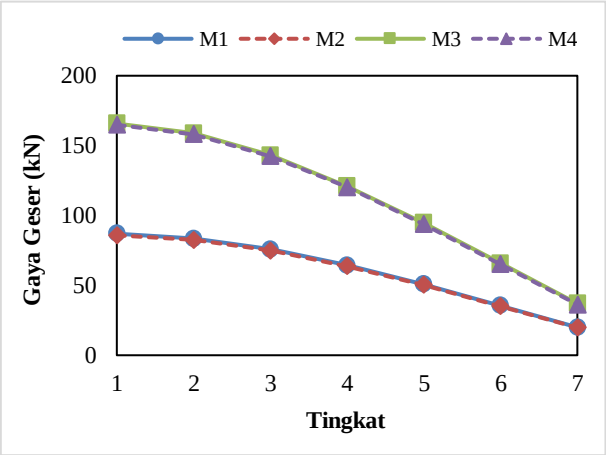
Gaya geser elemen struktur akan berpengaruh pada kekakuan dan kekuatan struktur tersebut. Besarnya gaya geser kolom untuk setiap model struktur ditunjukkan pada Tabel 4. Pada kolom K1, struktur dengan dinding geser di sudut terluar (M2) memiliki gaya geser rata-rata 70,09% lebih kecil daripada struktur dengan dinding geser di sisi tengah (M4). Sama halnya dengan kolom K10, tipe M2 memiliki gaya geser rata-rata 46,90% lebih kecil daripada tipe M4 sehingga tipe M2 lebih kaku. Berdasarkan Gambar 11 dan 12, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) hanya memberikan pengaruh yang kecil jika dibandingkan dengan struktur tanpa variasi ketebalan (M1 dan M3).

Tabel 4. Gaya Geser Kolom

Tingkat	Kolom	Gaya Geser (kN)				Rasio (%)		
		M1	M2	M3	M4	M1 & M2	M3 & M4	M2 & M4
1	K1	29,288	30,408	89,077	86,493	-3,68	2,90	-64,84
	K10	86,987	85,796	165,765	164,886	1,39	0,53	-47,97
2	K1	26,229	27,454	81,823	79,425	-4,46	2,93	-65,43
	K10	83,555	82,461	158,852	158,057	1,33	0,50	-47,83
3	K1	20,884	22,258	69,246	67,235	-6,18	2,90	-66,89
	K10	75,699	74,779	143,129	142,378	1,23	0,52	-47,48
4	K1	15,373	16,846	55,655	54,254	-8,75	2,52	-68,95
	K10	64,379	63,707	120,946	120,189	1,05	0,63	-46,99
5	K1	10,328	11,640	41,648	40,713	-11,28	2,24	-71,41
	K10	50,711	50,203	94,626	93,786	1,01	0,89	-46,47
6	K1	6,046	7,093	27,858	27,364	-14,76	1,77	-74,08
	K10	35,458	35,135	65,779	65,013	0,92	1,17	-45,96
7	K1	2,746	3,315	16,079	15,793	-17,19	1,78	-79,01
	K10	19,978	19,759	36,986	36,321	1,11	1,80	-45,60
Rata-Rata					**K1**	**-9,47**	**2,44**	**-70,09**
					K10	**1,15**	**0,86**	**-46,90**



Gambar 11. Gaya Geser Kolom K1



Gambar 12. Gaya Geser Kolom K10

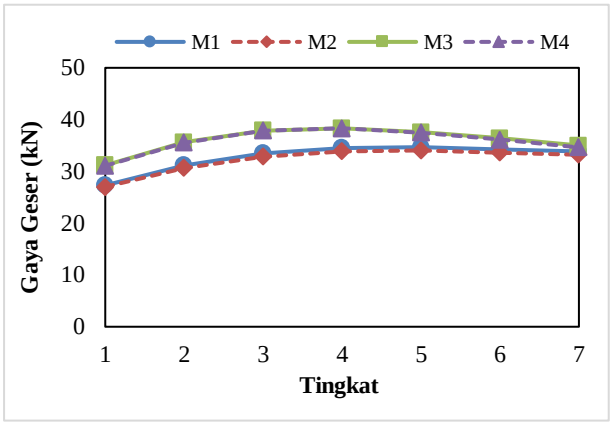
Tabel 5 menunjukkan gaya geser balok yang terletak di dekat dinding geser (B2) dan balok yang terletak jauh dari dinding geser (B8). Pada balok B2 dan B8, struktur dengan dinding geser di sudut terluar (M2) memiliki gaya geser rata-rata 10% lebih kecil daripada struktur dengan dinding geser di sisi tengah (M4). Sama halnya dengan penelitian yang dilakukan oleh Harne (2014) bahwa gaya geser balok pada struktur dengan dinding geser di sisi tengah mengahasilkan gaya geser yang cukup besar jika dibandingkan dengan struktur dengan dinding geser di sudut terluar. Berdasarkan Gambar 13 dan 14, struktur dengan variasi ketebalan dinding geser (M2 dan M4) hanya memberikan pengaruh yang kecil jika dibandingkan dengan struktur tanpa variasi ketebalan (M1 dan M3).

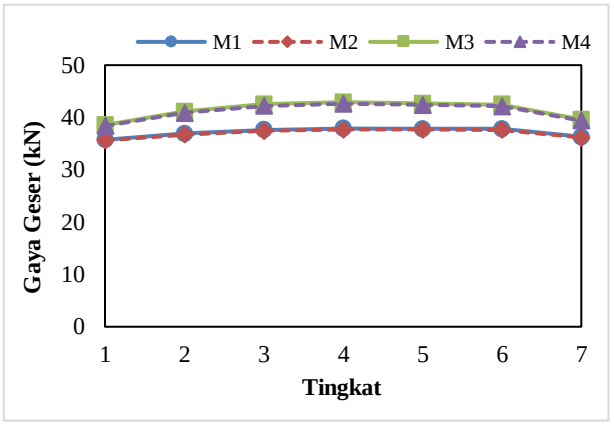
Tabel 5. Gaya Geser Balok

Tingkat	Balok	Gaya Geser (kN)				Rasio (%)		
		M1	M2	M3	M4	M1 & M2	M3 & M4	M2 & M4
1	B2	27,315	27,015	31,168	31,087	1,11	0,26	-13,10
	B8	35,725	35,615	38,554	38,374	0,31	0,47	-7,19
2	B2	31,196	30,690	35,626	35,572	1,65	0,15	-13,73
	B8	36,920	36,743	41,153	40,858	0,48	0,72	-10,07
3	B2	33,480	32,853	37,905	37,907	1,91	-0,01	-13,33
	B8	37,592	37,405	42,505	42,190	0,50	0,74	-11,34
4	B2	34,532	33,895	38,319	38,335	1,88	-0,04	-11,58
	B8	37,876	37,704	42,931	42,633	0,45	0,70	-11,56
5	B2	34,681	34,047	37,576	37,506	1,86	0,19	-9,22
	B8	37,835	37,681	42,683	42,390	0,41	0,69	-11,11
6	B2	34,293	33,652	36,419	36,164	1,90	0,70	-6,94
	B8	37,807	37,646	42,449	42,116	0,43	0,79	-10,61
7	B2	33,870	33,214	34,996	34,656	1,98	0,98	-4,16
	B8	36,264	36,146	39,612	39,382	0,33	0,59	-8,22
Rata-Rata					**B2**	**1,76**	**0,32**	**-10,30**
					B8	**0,41**	**0,67**	**-10,01**

Gambar 13. Gaya Geser Balok B2

Gambar 14. Gaya Geser Balok B8





5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

Struktur dengan variasi ketebalan dinding geser mengakibatkan penurunan perpindahan kolom sebesar 3% sampai dengan 4% dan model struktur tersebut hanya memberikan sedikit perbedaan (±1%) pada gaya aksial kolom dan gaya geser kolom dan balok. Dengan demikian ketebalan dinding geser tidak berpengaruh secara signifikan pada nilai perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen strukturnya, baik balok maupun kolom. Sedangkan lokasi dinding geser berpengaruh secara signifikan pada nilai perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen strukturnya, baik balok maupun kolom. Hal ini terlihat dari hasil studi bahwa pada model M2, nilai perpindahan kolom arah Y turun sebesar 55,6%, gaya aksial kolom turun sebesar 21,55%, gaya geser kolom turun sebesar 46,90%, dan gaya geser balok turun sebesar 10% jika dibandingkan dengan model M4 (struktur dengan dinding geser di bagian tengah setiap sisi terluar dan memiliki variasi ketebalan). Dengan demikian, dapat disimpulkan pula bahwa model M2 yang merupakan struktur dengan dinding geser di sudut terluar dan memiliki variasi ketebalan dinding geser menjadi model yang paling baik dari keempat model karena nilai perpindahan kolom dan gaya-gaya elemen struktur yang paling kecil.

DAFTAR PUSTAKA

Ahamad, S. A., & Pratap, K. V. (2020). Dynamic analysis of G+20 multi storied building by using shear walls in various locations for different seismic zones by using Etabs. *Materials Today: Proceedings*, *43*, 1043–1048. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.014

Bongilwar, R., Harne, V. R., & Chopade, A. (2018). Significance of Shear Wall in Multi-Storey Structure with Seismic Analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *330*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012131

Harne, V. R. (2014). Comparative Study of Strength of RC Shear Wall at Different Location on Multi-storied Residential Building. Dalam *International Journal of Civil Engineering Research* (Vol. 5, Nomor 4). http://www.ripublication.com/ijcer.htm

Hasan, A., & Astira, I. F. (2013). Studi Kasus : Proyek Apartemen The Royale Springhill Residences. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, *1*(1).

Karna, I. P. B. B., Giri, I. B. D., & Putra, D. (2018). Perbandingan Perilaku Struktur Bangunan Tanpa dan Dengan Dinding Geser Beton Bertulang. *Jurnal Ilmiah Elektronik Infrastruktur Teknik Sipil*.

Kaur, D., Singh, B., & Kumar, A. (2019). Optimization of the Location of Shear Wall in a Multistory Building. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, *9*(2), 3981–3983. https://doi.org/10.35940/ijitee.B7298.129219

Nawy, E. G. (2009). *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach* (6 ed.). Prentince Hall.

Park, R., & Paulay, T. (1974). *Reinforced Concrete Structure*. Wiley Interscience Publication.

Rahangdale, H., & Satone, S. R. (2013). Design And Analysis Of Multistoreied Building With Effect Of Shear Wall. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, *3*, 223–232. www.ijera.com

Rao, T. B., & Narasaiah, M. V. (2022). Study of P-Delta Effect in High-Risr Buildings With and Without Shear Wall. *Journal of Biogeneric Science and Research*, *7*(1). www.biogenericpublishers.com

Sandeep G S, & Patil, G. (2017). Comparative Study Of Lateral Displacement and Storey Drift Of Flat Slab and Conventional Slab Structures in Different Seismic Zones. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, *8*(7), 567–580.

Setia, L., Wibowo, B., & Zebua, D. (2021). Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil Analisis Pengaruh Lokasi Dinding Geser Terhadap Pergeseran Lateral Bangunan Bertingkat Beton Bertulang 5 Lantai. *Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil*, *4*.

SNI 1726. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Badan Standarisasi Nasional.
SNI 2847. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional.

SEISMIK RETROFIT BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING DENGAN PERKUATAN DINDING GESER

Junaedi Utomo[1*], Ade Lisantono[2] dan Hermawan[3]

[1] Departeman Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta*
e-mail: junaedi.utomo@uajy.ac.id
[2] Departeman Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta
e-mail: ade.lisantono@uajy.ac.id
[3] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Soegijapranata,, Jl. Pawiyatan Luhur Sel. IV No.1, Semarang
e-mail: hermawan.mrk@gmail.com

ABSTRAK

Tujuan evaluasi seismik adalah untuk evaluasi berbagai defisiensi yang membuat bangunan tidak dapat mencapai sasaran kinerja yang dipilih. Retrofit dilakukan untuk menghilangkan atau mengurangi defisiensi pada bangunan eksisting dengan meningkatkan kinerja struktur keseluruhan dengan menambahkan elemen baru ke dalam sistem struktur. Bangunan beton bertulang eksisting yang diretrofit adalah bangunan bertingkat sedang dengan ketidak teraturan vertikal dan dibangun pada tanah dengan kemiringan satu arah. Hasil analisis non-linier pada bangunan eksisting menunjukkan adanya beberapa defisiensi, terutama defisiensi geser. Seismik retrofit dengan EuroCode 8 – Part 3 dilakukan dengan dinding geser beton bertulang yang dipasang pada bagian luar dan bagian interior dari bangunan. Dinding geser menpuyai efek yang menguntungkan terhadap kinerja seismik dari bangunan eksisting. Setelah dilakukan perkuatan dengan dinding geser, analisis non-linier pada bangguan eksisting diulang sampai semua defisiensi yang ditemukan sebelumnya hilang. Hasil analisis non-linier menunjukkan bangunan eksistitng, yang telah diperkuat dengan dinding geser, dapat mencapai semua sasaran kinerja yang ada dalam EuroCode 8 – Part 3.

Kata kunci: Analisis nonlinier, Defisiensi Geser, Dinding Geser, EuroCode 8 – Part 3, Seismik Retrofit

1. PENDAHULUAN

Ketidak teraturan dalam suatu bangunan sering terjadi karena konfigurasi dan geometri bangunan mengikuti rancangan arsitektural dan fungsi bangunan. Ketidak teraturan juga sering ada dalam bangunan eksisting yang akan diretrofit. Beberapa dari ketidak teraturan ini telah ada aturannya dalam berbagai standar seperti ASCE 7-16. Dengan mengacu pada standar-standar ini, pelaku *retrofitting* pada bangunan beton bertulang eksisting dapat menyusun strategi perkuatan mengacu pada ASCE 7-16 dan menggunakan *acceptance criteria* dan *modeling parameters* dari EuroCode 8–Part 3, ASCE 41-17 atau yang lain.

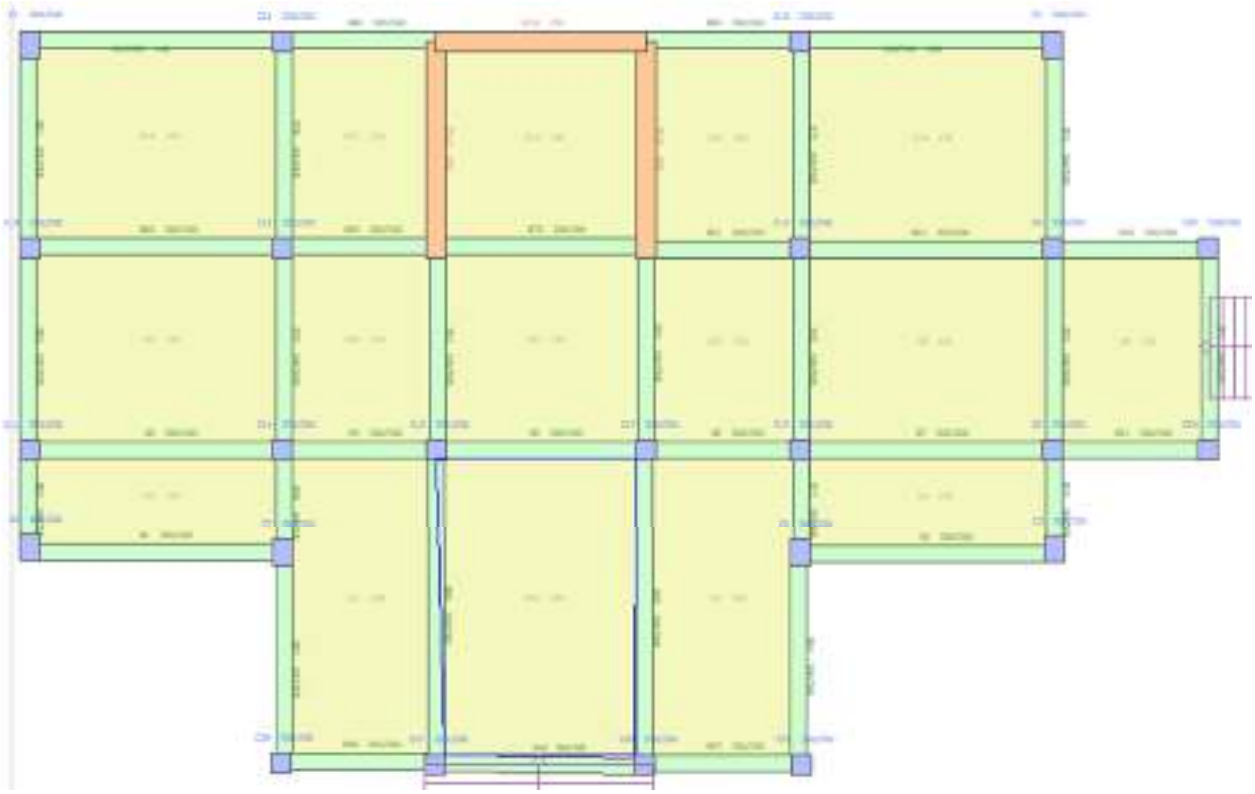
Bangunan beton bertulang eksisting yang diretrofit adalah bangunan bertingkat sedang dengan ketidak teraturan vertikal dan dibangun pada tanah dengan kemiringan satu arah yang membuat tinggi kolom pada lantai dasar berbeda. Bangunan ini bukan bangunan sesungguhnya, bangunan ini sengaja dirancang untuk mengalami berbagai defisiensi selanjutnya seismik retrofit dilakukan untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan sesuai dengan sasaran kinerja yang dipilih. *Retrofitting* dilakukan memakai perangkat lunak SeimoBuild (2020), yaitu perangkat lunak yang khusus dikembangkan untuk retrofit bangunan beton bertulang. Saat ini SeismoBuild mengadopsi enam *Codes* yaitu: *Euro codes* (EuroCode 8-Part 3), *American codes* (ASCE 41-17), *Italian National Seismic Codes* (NTC 08 dan NTC 18), *Greek Seismic Interventions Code* (KANEPE) dan *Turkish Seismic Evaluation Building Code* (TBDY).

Seismik Retrofit pada makalah ini dilakukan memakai EuroCode 8 – Part 3 (CEN 2005). Agar dapat memperoleh perbandingan antara EuroCode 8 dan ASCE 41-17, ketentuan-ketentuan sejenis pada kedua *Codes* juga dibahas. ASCE 41-17 telah mengalami proses evolusi panjang dari ASCE 41–06, ASCE 41-13 dan ASCE 41-17.

2. PERKUATAN TERHADAP BANGUNAN EKSISTING

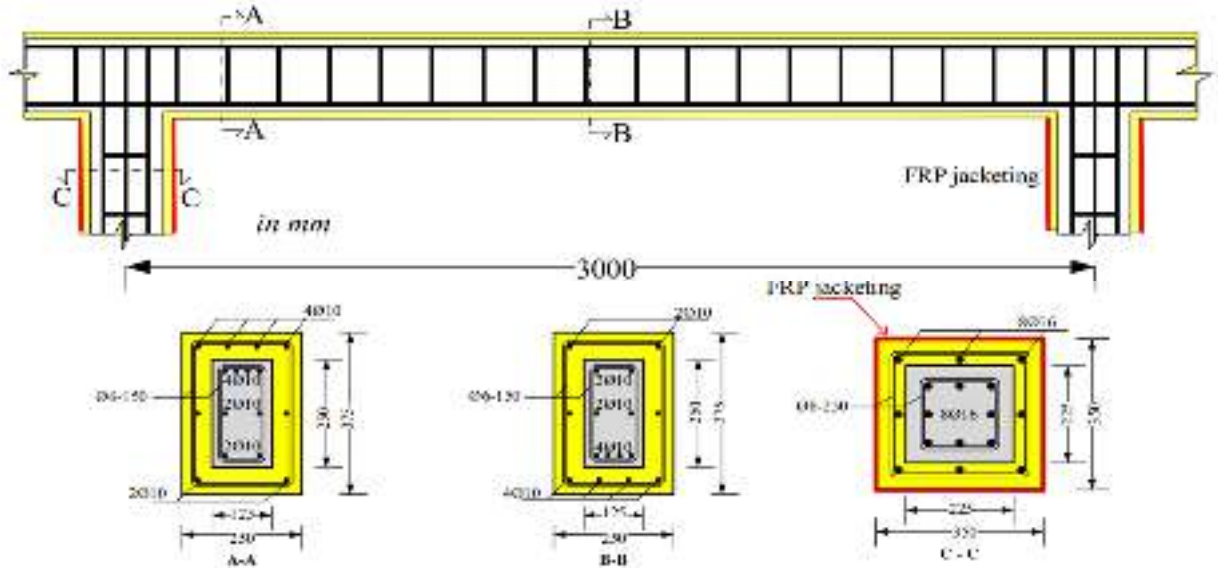
Ada dua kelompok teknik perkuatan yang sering dipakai terhadap bangunan eksisting. Kelompok pertama teknik perkuatan diterapkan pada level global, yang memperlakukan struktur keseluruhan sebagai satu entitas, dengan tujuan mengurangi besar/pengaruh gaya-gaya dalam yang bekerja pada tiap komponen. Perkuatan global yang sering dilakukan adalah menambahkan dinding geser ke dalam sistem struktur bangunan eksisting. Dinding geser mempunyai efek yang menguntungkan terhadap kinerja seismik dari bangunan eksisting. Tambahan dinding geser akan meningkatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitas pada struktur keseluruhan. Adanya elemen yang besar dan kaku

seperti dinding geser akan mengurangi pengaruh beban yang bekerja pada tiap komponen. Adanya pengurangan *demand* pada bangunan eksisting ini sangat menguntungkan untuk pekerjaan seismik retrofit karena dengan tulangan-tulangan yang sudah terpasang komponen-komponen sudah mampu menahan beban-beban yang bekerja atau hanya memerlukan perkuatan ringan saja. Perlu kiranya disadari bahwa jumlah tulangan yang terpasang pada bangunan eksisting umumnya kurang dibanding dengan jumlah tulangan yang ditentukan berdasar peraturan bangunan tahan gempa masa kini. **Gambar 1** menunjukkan contoh dinding geser yang ditambahkan pada bagian luar dan bagian interior bangunan eksisting. Lokasi dinding geser perlu dipertimbangan agar retrofitting dapat dikerjakan dan menimbulkan gangguan minimal baik pada bangunan atau pada penghuni bangunan.



Gambar 1. Penambahan dan pemilihan lokasi dinding geser pada bangunan eksisting

Kelompok kedua teknik perkuatan diterapkan pada level komponen dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan atau daktilitas dari komponen tertentu**. Gambar 2** merupakan contoh perkuatan pada komponen (balok dan kolom) yang dilakukan dengan *reinforced concrete jackets* dan pembungkusan dengan *fiber reinforced polymer* (FRP).



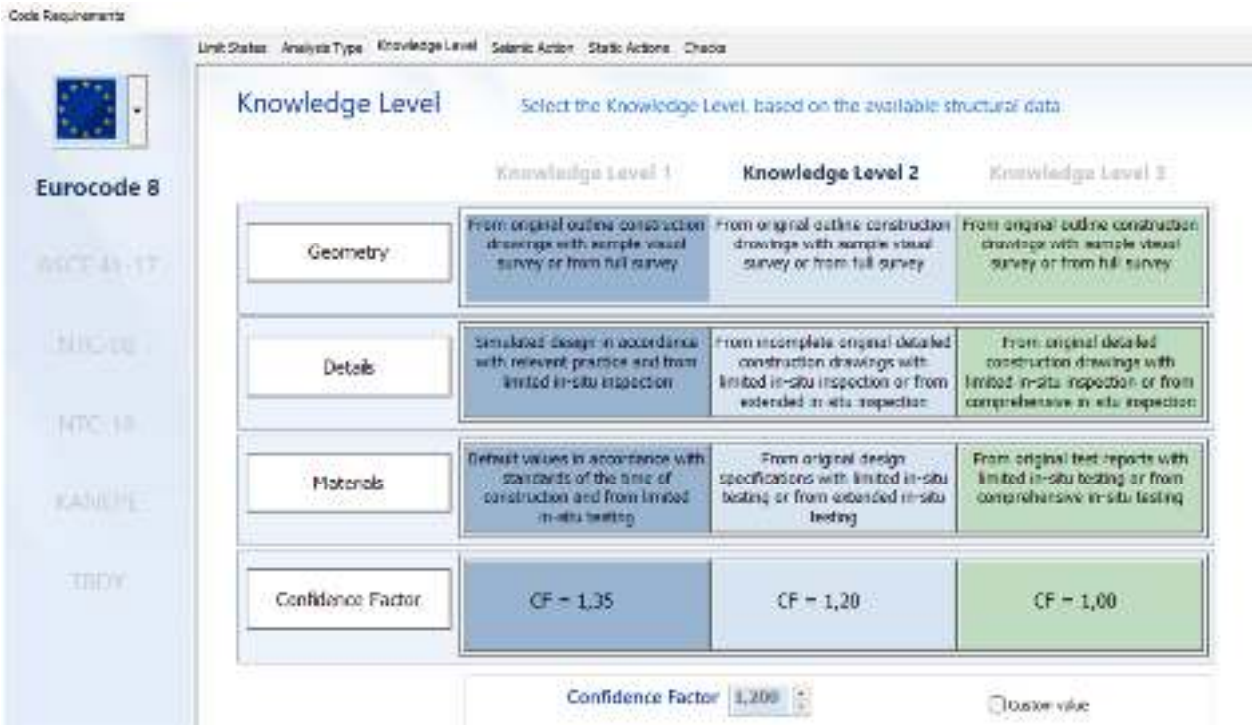
Gambar 2. Solusi retrofit komponen bangunan beton bertulang eksisting

Kedua teknik perkuatan ini sering digabung saat melakukan perkuatan pada bangunan eksisting. Umumnya teknik perkuatan pertama diaplikasikan terlebih dahulu, dan teknik perkuatan kedua dilakukan (bila diperlukan) untuk memperkuat komponen-komponen individu dalam bangunan eksisting yang perlu ditingkatkan kinerja seismiknya.

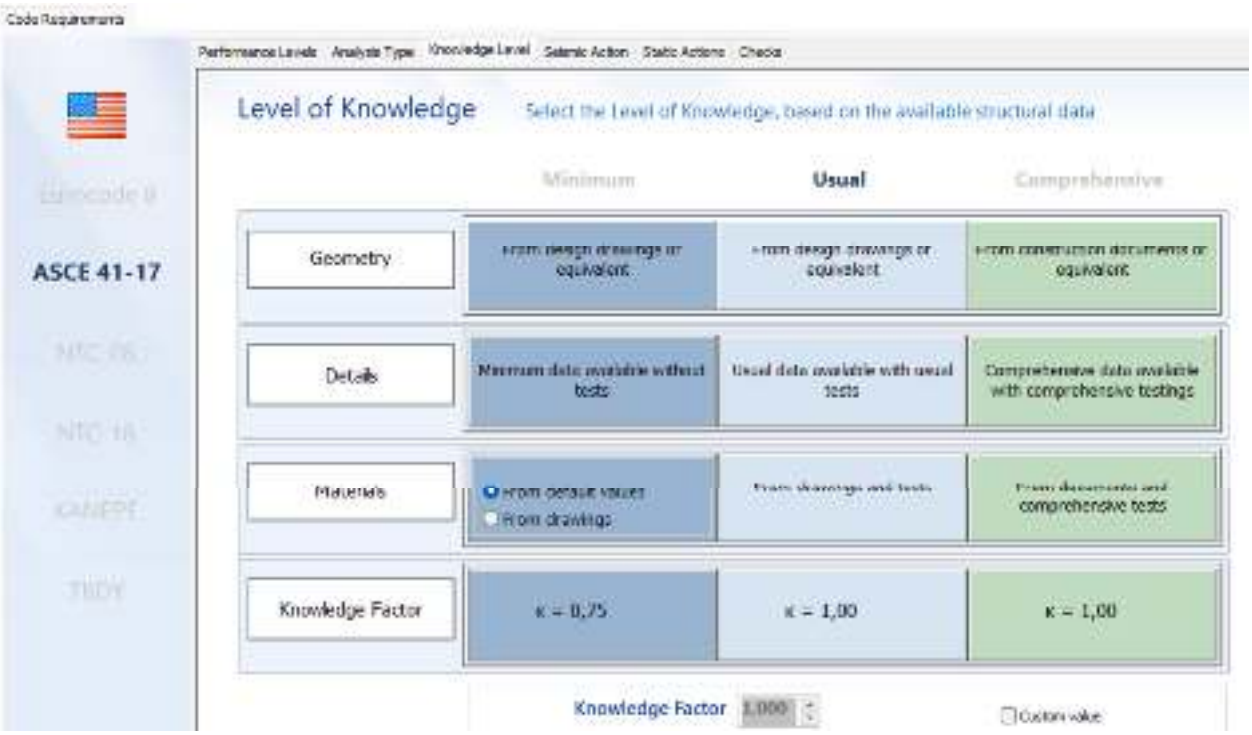
3. EVALUASI SEISMIK DAN LEVEL PENGETAHUAN

Proses evaluasi seismik memakai analisis nonlinier dapat menghasilkan solusi retrofit yang lebih ekonomis (Antoniou (2023)). Ada dua prosedur analisis nonlinier yaitu Prosedur Statik Nonlinier (NSP) dan Prosedur Dinamik Nonlinier (NDP). Saat ini NSP telah menjadi standar untuk retrofit dan dapat dipakai untuk struktur yang mempunyai ketidak teraturan (Antoniou (2023) dan SeismoBuild (2020)). Prosedur Statik Nonlinier (NSP) telah diaplikasikan dalam perangkat lunak SeismoBuild (2020) dan akan dipakai dalam makalah ini.

Level Pengetahuan (*Knowledge level*) mempengaruhi hasil asesmen bangunan eksisting yang mengandung banyak ketidakpastian (*epistemic uncertainties*). Level Pengetahuan dibentuk melalui pengumpulan data yang diambil dari : (1) geometri sistem struktur, baik komponen struktural maupun komponen nonstruktural; (2) *detailing*, yaitu detil dan jumlah tulangan terpasang; dan (3) material penyusun komponen. Meskipun gambar konstruksi dan gambar jadi (*as-built drawings*) telah diperoleh, tetap harus dilakukan survei lapangan dan uji material untuk memeriksa apakah ada penyimpangan yang dapat berpengaruh terhadap respon seismik struktur. *Seismic safety assessment standard* pada EuroCode 8 dan ASCE 41-17 menggunakan pendekatan berbasis komponen memakai kriteria penerimaan batas (*limit-state acceptance criteria*) dari kapasitas parameter-parameter untuk melakukan verifikasi terhadap keamanan dari pola kegagalan daktail dan kegagalan getas. EuroCode 8 memakai *confidence factors* (**CF**) untuk faktorisasi nilai rata-rata kuat material (**Gambar 3**). ASCE 41-17 memakai *knowledge factor* (**κ**) seperti ditunjukkan oleh **Gambar 4**. ASCE41-17 membagi Level Pengetahuan menjadi tiga yaitu: *minimum*, *usual* dan *comprehensive* yang selanjutnya dipakai dengan memilih satu diantara tiga *knowledge factor* yaitu: 0.75-0.9, 1.0 dan 1.0. *Knowledge factor* dari ASCE41-17 beroperasi pada sisi kapasitas komponen sehingga nilainya lebih kecil atau maksimum sama dengan satu. Level Pengetahuan dipakai untuk memilih jenis analisis yang digunakan, dan *knowledge factor* dipakai sebagai tambahan faktor keamanan untuk memperhitungkan kurangnya *knowledge* tentang bangunan eksisting. ASCE7-41 tidak memperbolehkan pemakaian prosedur analisis nonlinier bila Level Pengetahuan bangunan eksisting adalah minimum.



Gambar 3. *Confident factor* dari EuroCode 8 – Part 3 (SeismoBuild (2020))



Gambar 4. *Knowledge levels* dari ASCE 41-17 (SeismoBuild (2020))

4. LEVEL KINERJA, SASARAN KINERJA DAN LEVEL BAHAYA SEISMIK

EuroCode 8–Part 3 dan ASCE 41-17 adalah standar asesmen keamanan seismik yang memakai pendekatan asesmen berbasis kinerja dengan memasukan berbagai ketidak pastian melalui *confident factor* (**CF**) atau *knowledge level* (**κ**). **Gambar 5** menunjukkan perbandingan sasaran kinerja (yang merupakan kombinasi level bahaya seismik dan level kinerja) sesuai dengan ASCE 41-17 dan EuroCode 8- Part 3 untuk bangunan umum.

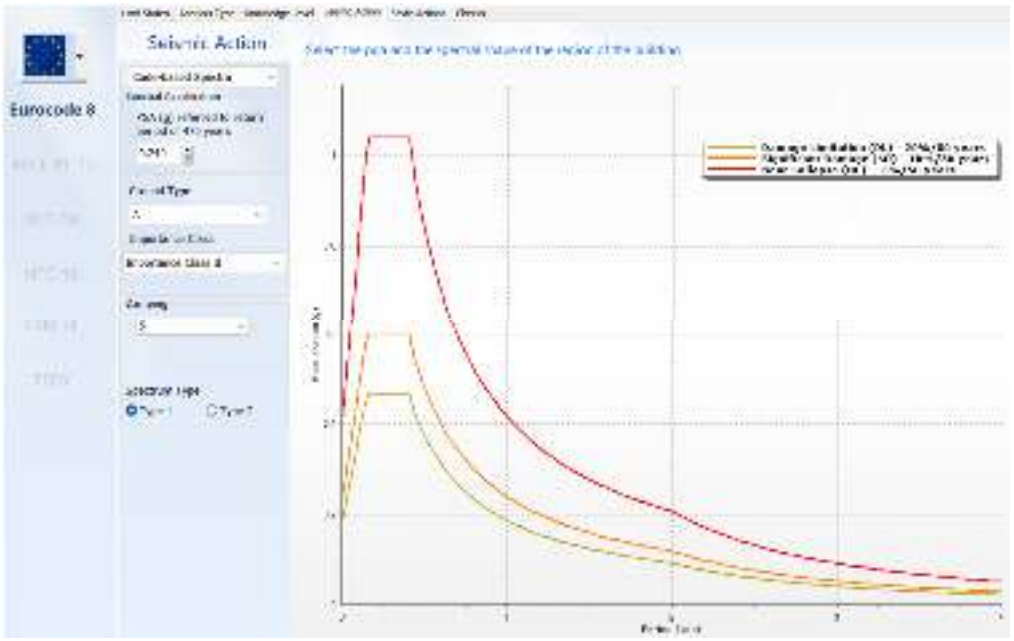
	Performance Level					Limit state			
ASCE 41-17	**OP**	**IO**	**LS**	**CP**	**EC8/3**	**-**	**DL**	**SD**	**NC**
50% in 50 years	*a*	*b*	*c*	*d*	50% in 50 years	-	-	-	-
20% in 50 years	*e*	*f*	*g*	*h*	20% in 50 years	-	x	-	-
10% in 50 years	*i*	*j*	*k*	*l*	10% in 50 years	-	-	x	-
2% in 50 years	*m*	*n*	*o*	*p*	2% in 50 years	-	-	-	x

Gambar 5. Perbandingan kombinasi level kinerja dan koresponding level bahaya seismik (Nuno et al. (2024))

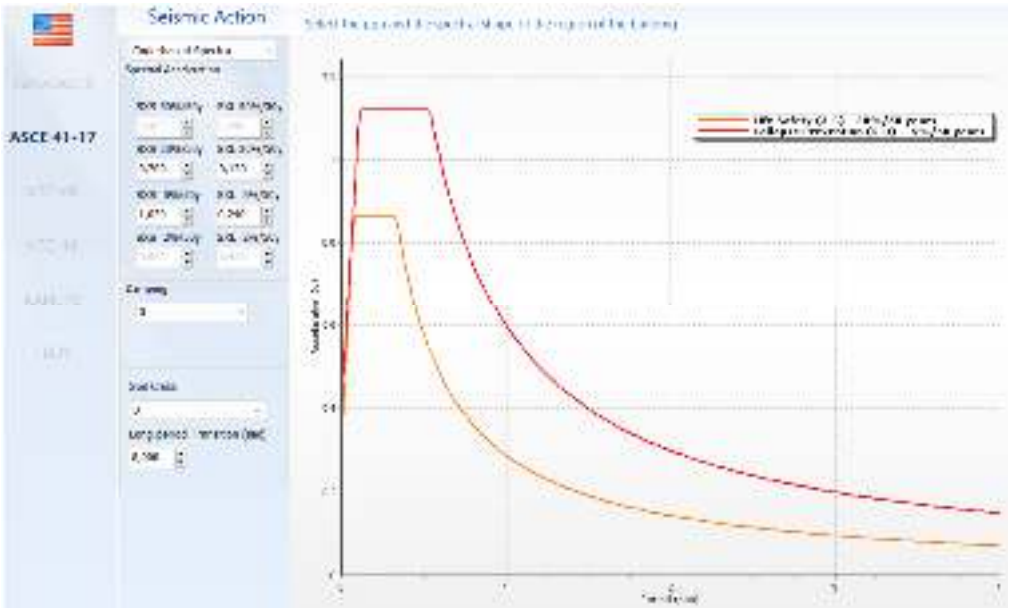
Dari **Gambar 5** tampak EuroCode 8 menyajikan satu set sasaran kinerja yang merupakan pasangan level kinerja dan level bahaya seismik (kombinasi tunggal), sedang ASCE 41-17 menyajikan banyak kombinasi pasangan level kinerja dan level bahaya seismik.

5. RESPON SPEKTRA AKSELERASI

Bahaya seismik akibat gerakan tanah didefinisikan melalui Respon Spektra Akselerasi atau riwayat akselerasi gerakan tanah akibat gempa yang ditentukan secara probabilistik atau deterministik. Respon spektra akselerasi untuk EuroCode 8-Part 3 untuk *Peak Ground Acceleration* (PGA) dengan perioda ulang 475 tahun, tipe tanah A, *importance class* II dan redaman 5 % ditunjukkan oleh **Gambar 5**. Respon spektra akselerasi untuk ASCE 41-17, yang dihitung mengikuti contoh hitungan FEMA P2006 (2018), untuk wilayah Yogyakarta dengan kelas situs D, dan redaman 5 % untuk level bahaya seismik BSE-1E (20%/50 tahan) dan BSE-2E (5%/50 tahun) ditunjukkan oleh **Gambar 6**. Hitungan parameter-parameter untuk respon spektra akselerasi ini telah dipresentasikan oleh penulis dalam KoNTekS ke 17.



Gambar 5. Respon Spektra Akselerasi dari EuroCode 8 (SeismoBuild (2020))



Gambar 6. Respon Spektra Akselerasi dari ASCE 41-17 (SeismoBuild (2020))

6. SEISMIK RETROFIT BANGUNAN BETON BERTULANG EKSISTING

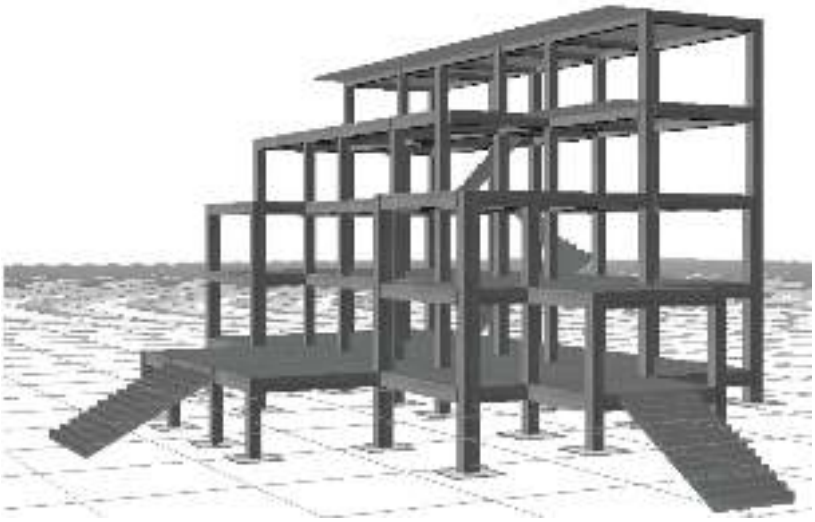
Seismik retrofit dilakukan terhadap bangunan beton eksisting yang sengaja dirancang mengikuti praktek perancangan masa lalu, saat kemajuan pengetahuan perancangan tahan gempa belum secanggih sekarang. Bangunan beton eksisting ini sengaja dirancang untuk mengalami defisiensi geser. Konfigurasi bangunan beton eksisting dalam dilihat pada **Gambar 7**. Tampak dari **Gambar 7** bahwa bangunan eksisting mengalami ketidak teraturan vertikal. Adanya kolom pendek, karena bangunan dibangun di atas tanah dengan kemiringan satu arah, yang membuat kolom pendek mengalami gaya geser besar perlu mendapat perhatian karena jumlah tulangan geser kolom pada bangunan beton masa lalu umumnya lebih sedikit dibanding dengan hasil dari perancangan bangunan tahan gempa masa kini.

Asesmen dan retrofit bangunan eksisting dengan ketidak teraturan lebih dari satu dilakukan langsung dengan prosedur statik nonlinier (NSP), menggunakan 16 kombinasi pembebanan, menggunakan respon spektra akselerasi pada **Gambar 5**, dan memakai EuroCode 8-Part 3. Tulangan-tulangan hasil perancangan bangunan eksisting untuk pelat, balok dan kolom telah dimasukkan ke dalam model yang dibuat dalam perangkat lunak SeismoBuild (2020). Hasil

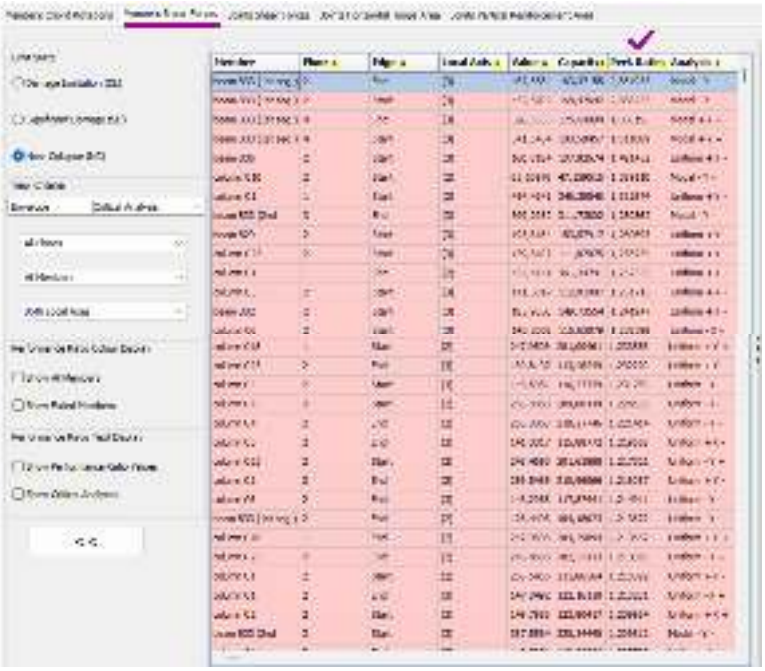
perancangan ini dapat dianggap mewakili level pengetahuan yang *comprehensive* dari bangunan eksisting sehingga prosedur NSP boleh dipakai. *Properties* material yang dipakai dalam seismik retrofit dapat dilihat pada **Tabel 1**. Ada tiga kondisi batas yang ditinjau yaitu: *Damage Limitation* (DL) – 20%/50 tahun, *Significant Damage* (SD)) – 10%/50 tahun dan *Near Collapse* (NC)) – 2%/50 tahun. Hasil dari analisis nonlinier pada kondisi batas *near collapse* (NC) menunjukkan ada banyak defiensi akibat gaya geser seperti ditunjukkan oleh **Gambar 8**.

Tabel 1. *Properties* material yang dipakai dalam retrofit**.**

Nama	Tipe Elemen	*Fc*, nilai yang diharapkan (MPa)	*Fc*, nilai batas bawah (MPa)	*Fs*, nilai yang diharapkan (MPa)	*Fs*, nilai batas bawah (MPa)
***Default* eksisting**	Eksisting	20.0 (*Mean*)	16.0 (*Mean-σ*)	275.0 (*Mean*)	220.0 (*Mean-σ*)
***Default* baru**	Baru	33.0 (*Mean*)	25.0 (*Mean-σ*)	555.6 (*Mean*)	500.0 (*Mean-σ*)



Gambar 7. Geometri dan konfigurasi bangunan beton bertulang eksisting yang mempunyai ketidak teraturan



Gambar 8. Hasil analisis nonlinier NSP bangunan eksisting pada kondisi batas *Near Collapse* (NC)

Strategi seismik retrofit yang dipakai adalah menambahkan dinding geser pada lokasi dan konfigurasi yang ditunjukkan oleh **Gambar 1** dan **Gambar 9a**. Tambahan dinding geser akan meningkatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitas pada struktur keseluruhan. Adanya elemen yang besar dan kaku seperti dinding geser akan mengurangi pengaruh beban yang bekerja pada tiap komponen. Adanya pengurangan *demand* pada bangunan eksisting ini sangat menguntungkan untuk pekerjaan seismik retrofit karena dengan tulangan-tulangan yang sudah terpasang komponen-komponen sudah mampu menahan beban-beban yang bekerja atau hanya memerlukan perkuatan ringan saja. Hasil dari analisis nonlinier banguan eksisting yang telah diperkuat dengan dinding geser pada kondisi batas *Near Collapse* (NC) ditunjukkan oleh **Gambar 9b**. Bila *Performance Ratio* dari suatu kompoen ≤ 1,0 maka komponen tersebut sudah tidak mengalami defisiensi. Semua defiensi akibat geser pada komponen bangunan eksisting telah hampir hilang, seismik retrofit bisa dianggap selesai. Seismik retrofit dapat ditingkatkan dengan memberikan perkuatan dengan *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) pada komponen *wall* W23, *beam* B33, *beam* B38, *beam* B79 dan *beam* B82 meskipun perkuatan tambahan ini tidak akan memberikan dampak signifikan terhadap bangunan eksisting. Perkuatan dengan dinding geser dipandang sudah mencukupi untuk seismik retrofit.



(a) (b)

Gambar 9. Hasil analisis non-linier NSP bangunan beton bertulang ekssisting: (a) Dengan perkuatan dinding geser dan (b) Geser pada kondisi batas *Near-Collapse* (NC)

Ada delapan kurva kapasitas yang diperoleh dari analisis *pushover* (prosedur NSP) sesuai jumlah kombinasi beban yang dipakai, Kurva kapasitas untuk kombinasi beban Modal + X + eccY sebelum dan sesudah retrofit ditunjukan oleh **Gambar 10a** dan **Gambar 10b** Dari **Gambar 10a** dan **Gambar 10b** tampak bahwa gaya geser lateral (*base shear*) pada bangunan eksisting meningkat dari 3550 kN sebelum retrofit menjadi 7220 kN setelah retrofit. *Target displacement* sebelum retrofit (bulatan kecil pada **Gambar 10a**) menurun setelah retrofit (bulatan kecil pada **Gambar 10b**). SeismoBuild (2020) memberikan nilai-nilai *Target Displacement* sebagai berikut:

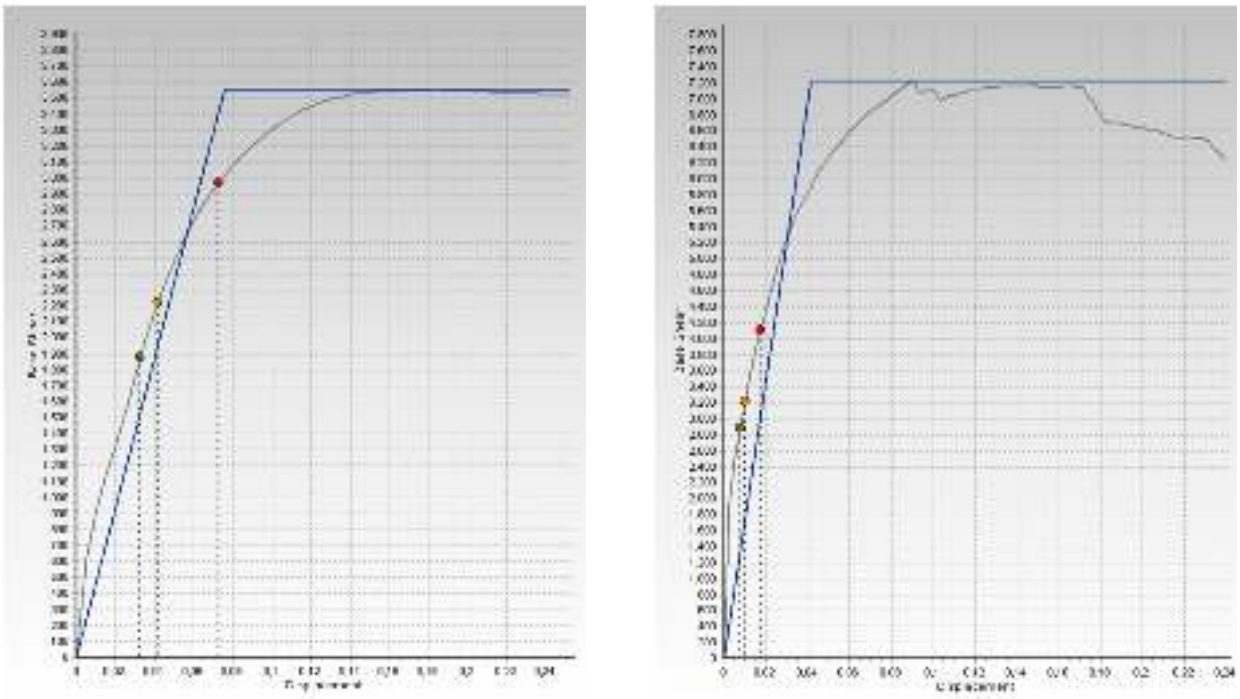
Target displacement sebelum retrofit:

- Level kinerja *Damage Limitation* = 0.0326 m
- Leval kinerja *Significant Damage* = 0.0419 m
- Level kinerja *Near Collapse* = 0.0726 m

Target displacement setelah retrofit:

- Level kinerja *Damage Limitation* = 0.00778 m
- Leval kinerja *Significant Damage* = 0.00998 m
- Level kinerja *Near Collapse* = 0.017306 m

Kurva-kurva kapasitas dari kombinasi beban 15 yang lain dapat dievaluasi dengan cara yang sama. Bila informasi tentang bangunan eksisting tersedia, dipahami dengan baik dan dilakukan pengumpulan data yang akurat dari banguan eksisting maka retrofit menggunakan analisis non-linier akan menghasilkan solusi yang ekonomis. Bila retrofit bangunan eksisting yang dulunya dirancang memakai peraturan perancangan tahan gempa yang sudah modern (misal peraturan perancangan tahan gempa dari tahun 1990 ke atas), hasil analisis non-linier dapat menghasilkan solusi bahwa bangunan eksisting tersebut tidak perlu diretrofit, suatu solusi yang melegakan pemilik bangunan eksisting.



(a) (b)

Gambar 10. Kurva kapasitas untuk kombinasi beban Modal + X + eccY: (a) Sebelum retrofit dan (b) Sesudah retrofit

7. KESIMPULAN

Bangunan beton bertulang eksisting yang mempunyai ketidak teraturan lebih dari satu dapat ditingkatkan kekakuan dan kapasitasnya untuk menahan beban gempa sesuai dengan level kinerja dan level bahaya seismik mengikuti ketentuan dalam EuroCode 8-Part 3. Ada banyak pilihan perkuatan yang dapat dipakai seperti *concrete jacketing* atau FRP namun dinding geser merupahan pilihan perkuatan yang efektif karena bekerja pada level global dan dapat mempengaruhi respon struktur secara signifikan. Perkuatan dinding geser meningkatkan gaya geser lateral pada bangunan eksisting dan menurunkan *Target Displacement* pada masing-masing level kinerja. Dinding geser sangat efektif untuk menurunkan *demand* pada komponen-komponen dari bangunan beton bertulang eksisting.

DAFTAR PUSTAKA

[ASCE] American Society of Civil Engineers (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41–17)*. Reston, Virginia: ASCE.

[ASCE] American Society of Civil Engineers (2016). *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7–16)*. Reston, Virginia: ASCE.

CEN (2005) Eurocode 8: *Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings*. European Committee of Standardization, Brussels.

Antoniou, Stelios. (2023). *Seismic Retrofit for Reinforced Concrete Buildings*, John Wiley &Sons Inc.

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2018). *Example Application Guide for ASCE/SEI 41-13 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings – with Additional Commentary for ASCE/SEI 41-17*. FEMA P2006, Washington, DC: Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency.

Nuno, P., Despoina, S. dan Xavier, R. (2024). *Closed-Form Expressions for Partial Safety Factors Used in the Seismic Assessmen of Existing RC Buildings*. Bulletin of Earthquake Engineering (2024) 22:997–1032.

SeismoBuild (2020). *A Computer Program for the Linear and Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Buildings*. Tersedia di URL: www.seismosoft.com.

Studi Numerik Kinerja Bangunan Rumah Tinggal Sederhana Terhadap Bahaya Gempa Bumi

Edy Purwanto[1)], SA Kristiawan[1)], Achmad Basuki[1)], Ahda Dinansya Trisnawan Putra[1)], Arda Arditama[1)]

[1)]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Surakarta
***e-mail**: edypurwanto68@staff.uns.ac.id*

ABSTRAK

Pembangunan perumahan di wilayah Indonesia harus mempertimbangkan potensi terjadinya gempa bumi, karena wilayah Indoensia terletak di wilayah *ring of fire* yang sangat rawan terjadinya gempa bumi. Beberapa kejadian gempa menunjukkan efek kerusakan yang sangat besar terutama pada hunian masyarakat dan bangunan infrastruktur lainnya. Penelitian ini akan mengkaji kinerja seismik dengan menguji secara numerik model bangunan rumah sederhana dengan *software seismostruct*. Model benda uji yang dianalisis merepresentasikan tipe hunian di masyarakat. Mutu dan detail pengerjaan dari model benda uji berdasarkan pada data penelitian di lapangan. Model benda uji tersebut selanjutnya dilakukan uji numerik dengan software Seismostruct. Model diberi beban akibat beban mati, beban hidup dan beban gempa. Berdasarkan hasil dan analisis model benda uji maka didapatkan hasil bahwa kinerja seisimik dari model benda uji mempunyai persentase kerusakan yang cukup tinggi , yaitu berdasar pada kondisi beban gempa DBE, persentase keruakan pada kondisi *slight* dan *medium* mencapai nilai 100%, sementara pada level *extensive* mencapai nilai 99,98% dan pada level *complete* mencapai nilai 99,55%. Sementara berdasarkan gempa MCE maka persentase kerusakan pada level *slight, medium* dan *extensive* mencapai nilai 100% sementara pada level *complete* mencapai nilai 99,97%. Berdasarkan pada nilai persentase tersebut maka kinerja seismik model benda uji mempunyai kinerja yang sangat rendah dan sangat berbahaya terhadap keselamatan penghuni dan bangunannya karena akan berpotensi mengalami kegagalan total.

Kata kunci: rawan gempa, hunian, *seismostruct*, kerusakan, kinerja seismik.

1. PENDAHULUAN

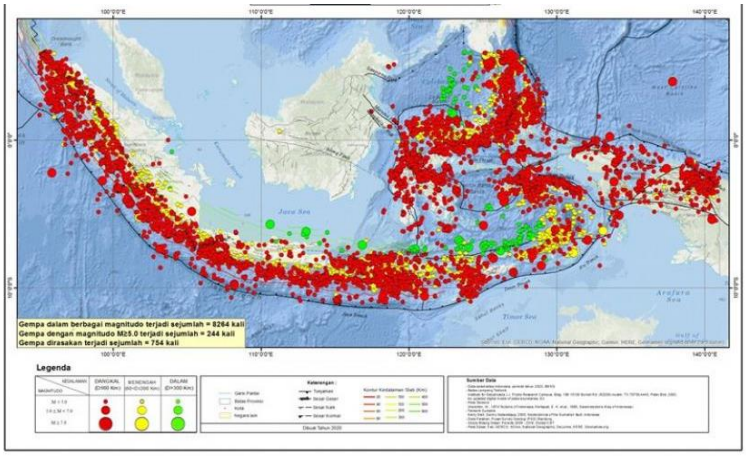
Indonesia terletak di wilayah yang mempunyai kerawanan tinggi terhadap bahaya gempa bumi. Bangunan, khususnya rumah tinggal yang mendukung kehidupan masyarakat sangat rentan terhadap bahaya gempa bumi, hal ini terbukti dengan banyaknya bangunan hunian masyarakat yang hancur akibat adanya bencana gempa bumi. Sebagai salah satu kebutuhan pokok manusia maka perumahan memegang peranan yang sangat penting untuk mewujudkan kesejahteraan dan kenyamanan dalam masyarakat. Ketersediaan tempat tinggal yang kuat dalam mengantisipasi beban gempa sangat penting bagi setiap manusia tetapi di sisi lain terdapat banyak hambatan untuk bisa memenuhi kebutuhan tersebut, terutama adalah ketidakmampuan secara finansial dari setiap orang. Untuk membantu masyarakat kurang mampu dalam memenuhi kebutuhan akan papan atau tempat tinggal maka pemerintah dapat bekerja sama dengan pihak lain memberikan subsidi perumahan bagi masyarakat yang mempunyai keterbatasan ekonomi. Langkah ini bisa menekan masyarakat yang tidak memilikki tempat tinggal sendiri untuk segera memilikkinya. Rumah-rumah sederhana termasuk rumah subsidi di satu sisi sangat penting keberadaannya karena sangat dibutuhkan masyarakat golongan ekonomi lemah, tetapi sebagai tempat tinggal mesti juga mempertimbangkan aspek teknis terkait dengan kenyamanan, kekuatan dan masa layan atau umur bangunan. Sehingga untuk jangka menengah dan jangka panjang mesti dipikirkan suatu bangunan yang murah tetapi juga memenuhi persyaratan bangunan yang baik sesuai standar yang berlaku di Indonesia [1]–[3], khususnya terhadap bahaya gempa bumi, yaitu boleh rusak tetapi tidak boleh roboh sehingga ketika ada peristiwa alam gempa bumi bangunan tersebut tidak menimbulkan korban jiwa bagi penggunanya.

Peristiwa gempa bumi yang pernah terjadi dan menimbulkan korban cukup besar baik harta maupun jiwa antara lain adalah gempa bumi Yogyakarta, Sabtu, 26 Mei 2006 [4] , gempa bumi Lombok, 5 Agustus 2018 [5], gempa Palu, 28 September 2018 [6], gempa bumi Cianjur, 21 Nopember 2022 [7]. Besarnya potensi gempa di wilayah Indonesia karena wilayah Indonesia terletak di antara tiga lempeng tektonik dunia, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Indo Australia dan lempeng Pasifik. Lempeng-lempeng dan juga sesar yang ada di Indonesia ini sangat aktif karena terbukti seringnya terjadi peristiwa gempa bumi di Indonesia dengan korban harta dan nyawa yang cukup besar.

Penelitian ini akan melakukan pengujian numerik dengan meninjau kinerja seismik dari rumah tinggal sederhana, di mana rumah yang diteliti merupakan representasi rumah hunian yang banyak digunakan oleh masyarakat di Indonesia, model bangunan dalam pengujian ini diasumsikan berada wilayah Surakarta.

Kinerja seismik merupakan langkah mitigasi gempa bumi yang sangat penting karena akan menjadi rujukan dalam menangani kemungkinan terjelek akibat peristiwa gempa bumi. Standar untuk menentukan persentase kerusakan dari model benda uji menggunakan acuan dari Hazus [8]. Kriteria kerusakan dari Hazus dibedakan menjadi empat kategori, yaitu *slight* (DS1), *medium/moderate* (DS2), *extensive* (DS3) dan *complete* (DS4). Bangunan perumahan rata-rata dibangun hanya berdasarkan adat istiadat atau dengan kebiasaan yang tidak berdasarkan pada standar peraturan yang baik sehingga masuk kategori bangunan non teknis, sehingga kinerjanya ketika mengalami beban gempa akan mengalami kehancuran yang sangat besar [9], [10]. Melihat potensi gempa yang sangat besar yang terjadi di wilayah Indonesia seperti pada Gambar 1, maka mitigasi bencana gempa bumi menjadi pertimbangan dalam

peneliti ngetahui potensi konkrit yang akan menghasilkan kajian yang sangat berharga untuk meningkatkan kinerja seismik bangunan hunian di masyarakat, misalnya dengan memperbaiki detail tulangan maupun memperkuat bagian suatu elemen bangunan dengan bahan yang sudah banyak digunakan pada beberapa bangunan dan infrastruktur, misalnya dengan carbon[11], [12], textile reinforced mortar (TRM) [13] maupun pelat baja[14][9]

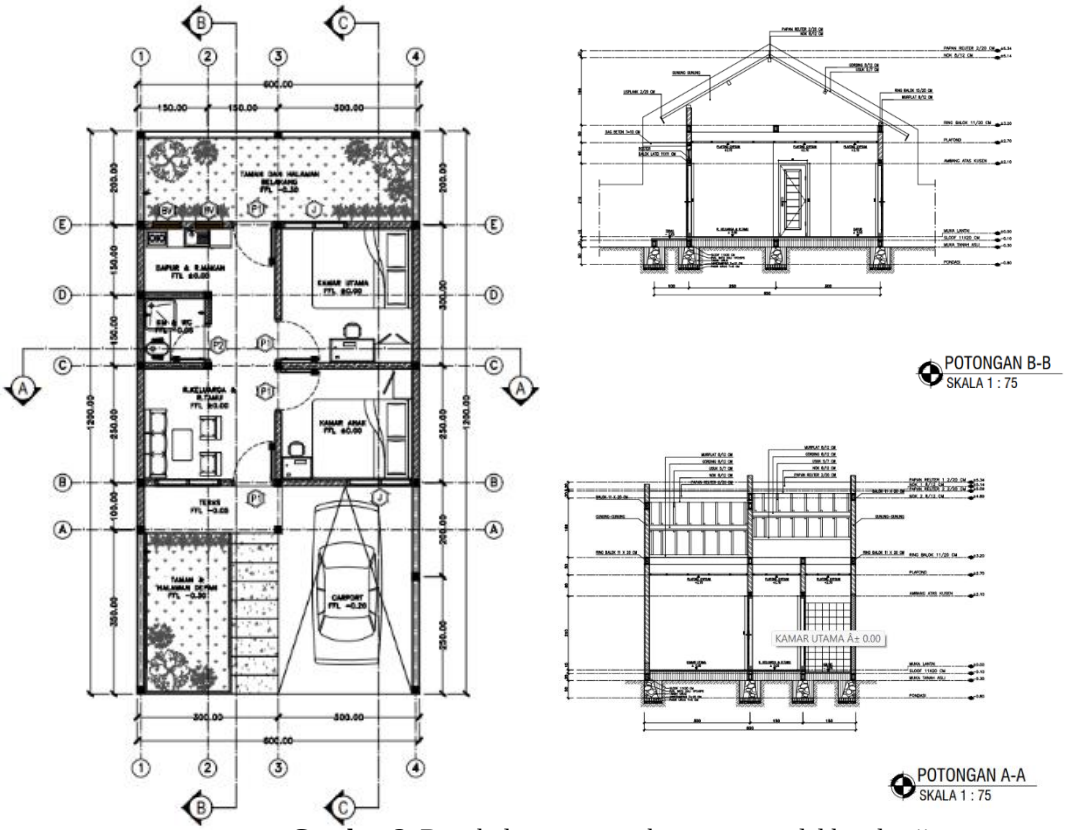


Gambar 1. Peta seismisitas Indonesia

2. METODOLOGI

2.1 Denah model

Model yang dipakai pada penelitian ini berupa rumah tinggal tipe 36 seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah dan potongan bangunan model benda uji

2.2 Materil

Spesifikasi bahan yang diguanakan pada model benda uji disajikan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi bahan

Mutu beton (f'c)	10, MPa
Mutu baja tulangan utama (fy)	479,99 MPa
Mutu baja tulangan sengkang (fy)	426,74 MPa
Mutu bata merah	2 MPa
Mutu mortar	2 MPa

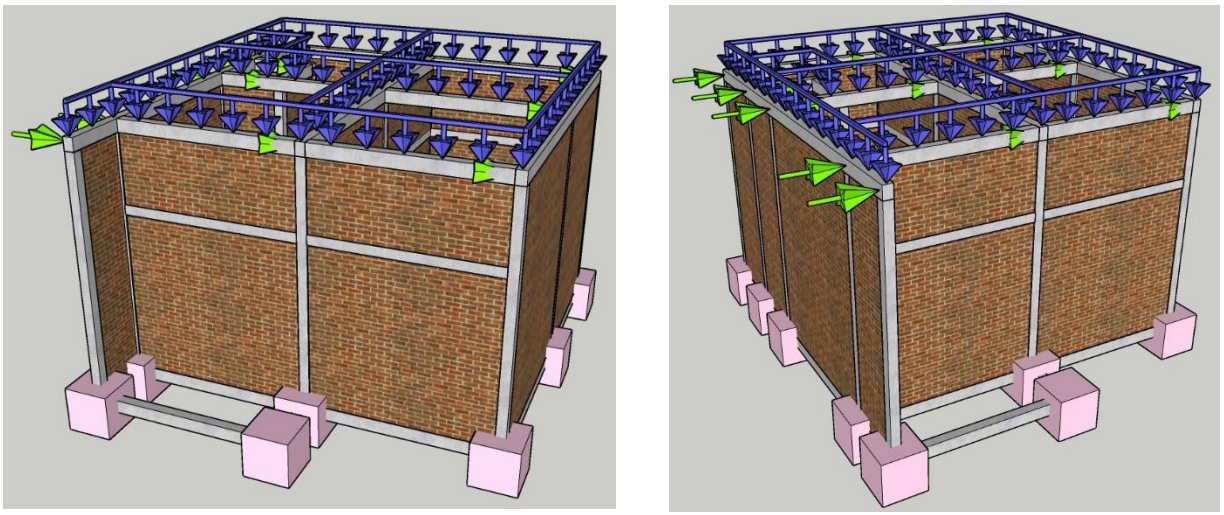
2.3 Dimensi dan penulangan

Tabel 2. Dimensi dan penulangan model benda uji

Elemen	Dimensi	Tulangan Utama	Tulangan Geser
Balok sloof dan balok ring	150 mm x 200 mm	Atas 2D10, Bawah 2D10	D6 – 200
Kolom	150 mm x 150 mm	4D10	D6 – 200
Balok Latei	150 mm x 200 mm	Atas 2D10, Bawah 2D10	D6 – 200

2.4 Pembebanan

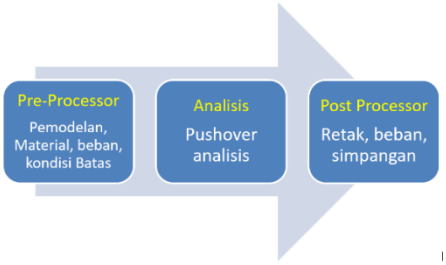
Beban yang dikerjakan meliputi beban mati berat sendiri, beban mati tambahan (atap, dinding) dan beban gempa. Ilustrasi pembebanan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Pemebebanan pada model benda uji dengan software seismostruct pada arah sumbu X dan sumbu Y

2.5 Pengujian Seismostruct

Model benda uji yang telah ditetapkan selanjutnya dilakukan analisis numerik dengan *software Seismostruct*. Langkah dalam analisis numerik adalah sebagai berikut :

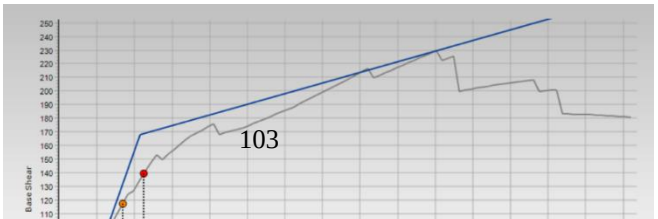


Gambar 4. Denah dan potongan bangunan model benda uji

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hubungan beban dan simpangan

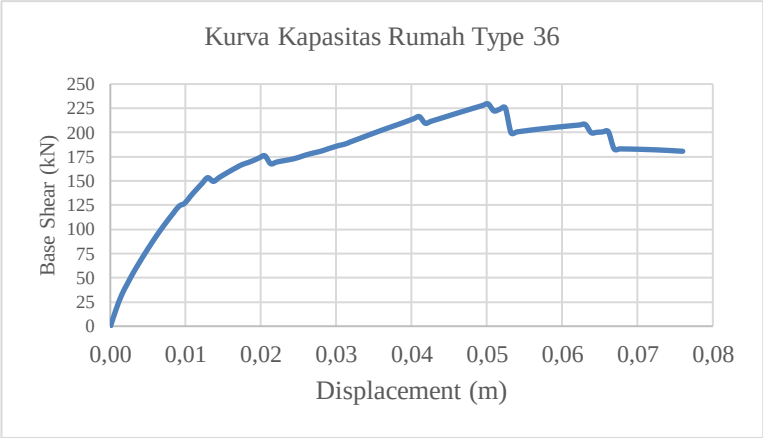
Berdasarkan output analisis *Seismostruct* maka didapatkan grafik pushover seperti pada gambar 5.



Gambar 5. Grafik *pushover* analisis model benda uji dari *Seismostruct*

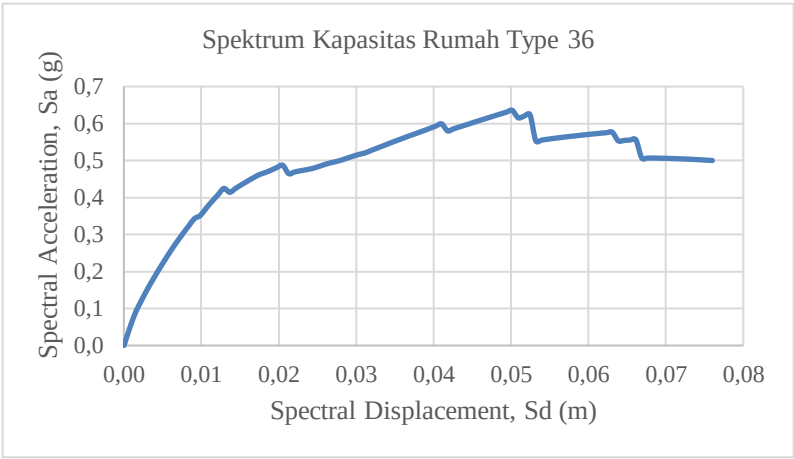
3.2 Kurva kapasitas dan spektrum kapasitas

Berdasarkan nilai beban dan simpangan pada pushover analsisi maka ditampilkan garfik kapasitas seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik kurva kapasitas model benda uji

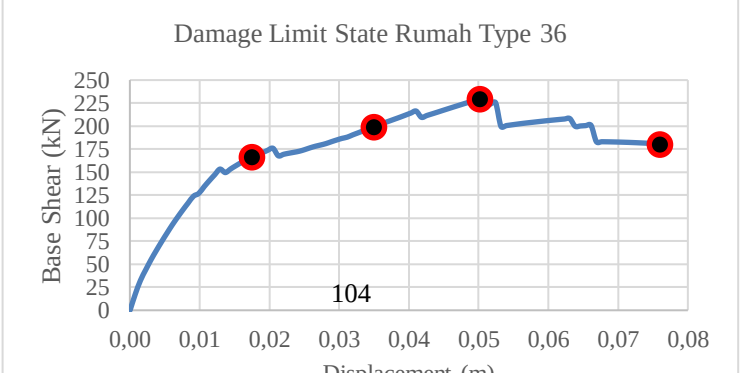
Selanjutnya untuk mendapatkan nilai-nilai damage state dari model benda uji maka grafik kurva kapasitas dikonversi menjadi kurva kapasitas dalam format ADRS (*acceleration and displacement respon spectrum*).



Gambar 7. Spektrum kapasitas model benda uji

3.3 Batas kerusakan

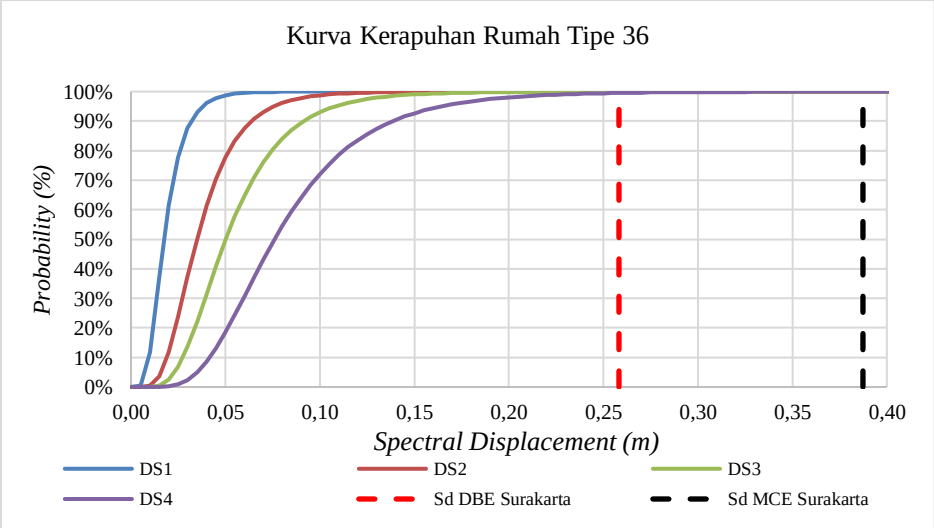
Penentuan batas kerusakan mengacu pada ketentuan Hazus,



Gambar 8. Penentuan batas-batas kerusakan

3.4 Analisis kerapuhan

Untuk mengetahui kinerja dari model rumah sederhana maka dilakukan analisis kerapuhan. Analisis pada disain rumah sederhana ini diasumsikan berlokasi di wilayah Surakarta sehingga mengikuti parameter gempa yang berlaku untuk wilayah Surakarta. Asumsi yang digunakan pada tanah sedang sehingga untuk tinjauan pada kondisi kelas situs tanah bisa menghasilkan nilai yang berbeda-beda.



Gambar 9. Kurva Kerapuhan Rumah Sederhana

Tabel 3. Evaluasi *Diskrit Damage* Berdasarkan DBE dan MCE

Limit State	Sd DBE = 0,2582 m		Sd MCE = 0,3974 m	
	Probability	*Discrete Damage*	*Probability*	*Discrete Damage*
Undamage	0.00%		0.00%	
Slight	100.00%	0.00%	100.00%	0.00%
Medium	100.00%	0.02%	100.00%	0.00%
Extensive	99.98%	0.43%	100.00%	0.02%
Complete	99.55%	99.55%	99.97%	99.97%
Jumlah		100.00%		100.00%

Berdasarkan pada analisis probabilitas kerapuhan dengan kondisi DBE (gempa dengan periode ulang 500 tahun) dan kondisi MCE (gempa dengan periode ulang 2500 tahun) menunjukkan bahwa jika bangunan yang direncakan terkena gempa mengalami kerusakan hampir 100% baik pada kondisi ringan (*slight*) maupun pada kondisi paling berat (*complete*).

4. KESIMPULAN

Berdasarakan pada hasil dan analisis dari model benda uji dengan uji numerik dengan software Seismostruct maka dapat disimpulkan bahwa model benda uji yang mewakili kondisi hunian rumah tinggal sebagai berikut persentase kerusakan berdasarkan gempa DBE pada kondisi *slight* dan *medium* sebesar 100 %, untuk level *extensive* sebesar 99,98% sementara pada level *complete* sebesar 99,55 %, persentase kerusakan berdasarkan gempa MCE pada kondisi *slight, medium* dan *extensive* sebesar 100 %, level *complete* sebesar 99,97 %, persentase kerusakan yang besar pada semua level kerusakan menunjukkan bahwa kinerja seismik model benda uji yang merepresentasikan hunian di masyarakat mempunyai kinerja seismik yang sangat jelek, kinerja seismik model benda uji menjadi bahan rujukan dalam mitigasi bencana gempa bumi khususnya pada rumah tempat di masyarakat.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] truktur
lain 1727:2020," *Badan Standardisasi Nas.* 1727:2020, no. 8, pp. 1–336, 2020.

[2] Badan Standardisasi Nasional (b), "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung," *Sni 17262019*, no. 8, p. 254, 2019.

[3] Badan Standarisasi Nasional, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung SNI 2847-2013*. Jakarta, Indonesia, 2013.

[4] Id.wikipedia.org, "Gempa bumi Yogyakarta 2006 - Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_Yogyakarta_2006.

[5] Wikipedia bahasa Indonesia, "Gempa bumi Lombok Juli 2018 - Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_Lombok_Agustus_2018.

[6] "Gempa bumi dan tsunami Sulawesi 2018 - Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_dan_tsunami_Sulawesi_2018.

[7] Id.wikipedia.org, "Gempa Bumi Cianjur 2022- Wikipedia bahasa Indonesia, ensiklopedia bebas." [Online]. Available: https://id.wikipedia.org/wiki/Gempa_bumi_Yogyakarta_2006.

[8] FEMA, *HAZUS-MH MR4 Multi-Hazar d Loss Estimation Methodology – Earthquake Model:Technical Manual. Department of Homeland Security*. Washington DC: FEMA, 2003.

[9] E. Purwanto, P. A. Adri, S. A. Kristiawan, S. Sangadji, and S. H. Alfisa, "Strengthening of Non-engineered Building Beam-Column Joint to Increase Seismic Performance with Variation of Steel Plate Width BT - Proceedings of the 5th International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering," S. A. Kristiawan, B. S. Gan, M. Shahin, and A. Sharma, Eds. Surakarta, Indonesia: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 215–224.

[10] S. A. Kristiawan, I. R. Hapsari, E. Purwanto, and M. Marwahyudi, "Evaluation of damage limit state for rc frame based on fe modeling," *Buildings*, vol. 12, no. 1, pp. 1–22, 2022, doi: 10.3390/buildings12010021.

[11] Y. Deng *et al.*, "Experimental and analytical investigation on flexural behaviour of RC beams strengthened with NSM CFRP prestressed concrete prisms," *Compos. Struct.*, vol. 257, p. 113385, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113385.

[12] M. H. Mahmoud, H. M. Afefy, N. M. Kassem, and T. M. Fawzy, "Strengthening of defected beam-column joints using CFRP," *J. Adv. Res.*, vol. 5, no. 1, 2014, doi: 10.1016/j.jare.2012.11.007.

[13] E. Tzoura, E. Tzoura, and T. C. Triantafillou, "Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets Innovative seismic isolation of infill walls View project Shear strengthening of reinforced concrete T-beams under cyclic loading with TRM or FRP jackets," doi: 10.1617/s11527-014-0470-9.

[14] Y. Rahmi, A. Saputra, and S. Siswosukarto, "Numerical Modelling of Interior RC Beam-Column Joints for Non-Engineered Buildings Strengthened Using Steel Plates," vol. 138, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201713802007.

DAFTAR ISI BIDANG GEOTEKNIK

ANALISIS PERKIRAAN ANCAMAN TANAH LONGSOR DI DESA PETANG DENGAN PENDEKATAN BAYESIAN I Nyoman Arya Saputra[1] , I Nengah Sinarta[1,2] dan Putu Ika Wahyuni[1,2].....1

PENANGANAN LONSORAN BADAN JALAN PADA RUAS ENAROTALI – WAGHETE (STA 8 + 845) Mamik Wantoro, ST., MT[1].....13

PEMANFAATAN KAPUR HIDUP YANG DI AKTIVASI DENGAN RESIN DAMAR DAN OKSIDA BESI UNTUK MENSTABLISASI TANAH LUNAK Parea R. Rangan[1], M. Tumpu[2] dan Mansyur[3].....23

PENGARUH PENAMBAHAN FIBER TERHADAP PARAMETER DAYA DUKUNG TANAH LEMPUNG I Nyoman Aribudiman[1*], Anissa Maria Hidayati[2*].....31

PENGARUH JENIS ENERGI PEMADATAN TANAH DI LABORATORIUM TERHADAP KARAKTERISTIK TANAH LEMPUNG DARI DESA PENE DAN DESA KONBAKI KABUPATEN TTS Ronny S. Poyk[1], Tri M. W. Sir[2], Jusuf J. S. Pah[3].....38

PERILAKU SIFAT FISIK-MEKANIK DAN MIKROSTRUKTUR TANAH LEMPUNG EKSPANSIF YANG DISTABILISASI MENGGUNAKAN KAPUR Angelina Fitriani Doke Bei.....39

INTERAKSI SIMULTAN BEBAN AXIAL-LATERAL PADA PONDASI TIANG TUNGGAL Sumiyati Gunawan[1*], Vienti Hadsari[1], Oktoditya Ekaputra[1] dan Christin Sri Hastuti[1].....55

PENGARUH PENAMBAHAN KAPUR, FLY ASH DAN BOTTOM ASH PADA SUBGRADE LEMPUNG BOBONARO Elsy E. Hangge[1*], Remigildus Cornelis[2], Lilys N. Peni[3].....63

PENGARUH ALIRAN AIR PADA KESTABILAN LERENG Aazokhi Waruwu[1*], Jack Widjajakusuma[2], Josua Sigalingging[3].....71

KARAKTERISTIK KUAT TEKAN BEBAS CAMPURAN ABU SEKAM PADI DAN RENOLITH SEBAGAI BAHAN STABILISASI TANAH LEMPUNG Made Dodiek Wirya Ardana[1], Anissa Maria Hidayati[1], dan Khairuman Nawawi[2].....78

STABILISASI TANAH RAMAH LINGKUNGAN MENGGUNAKAN EGG SHELL POWDER [1]G.Utomo, [1]Indyra S.A.S., A.M. Indriani, [1]N. Hidayat, [1]M. T. Rahman, [1]M. Ikhsan, [1]K.Fitri, [11]J. C. F., [1]M. A. Akmal, [1]M. R. Langda', [1]A.Kunaivi, [1]C. H. Ivani.....84

PENYELIDIKAN TANAH YANG EFEKTIF UNTUK KAJIAN PONDASI BANGUNAN GEDUNG SEDERHANA DALAM KONTEKS PERIZINAN SLF/PBG I Made Kusuma Wiranata[1*], I Nengah Sinarta[2],.....91

ANALISIS PERKIRAAN ANCAMAN TANAH LONGSOR DI DESA PETANG DENGAN PENDEKATAN BAYESIAN

I Nyoman Arya Saputra[1] , I Nengah Sinarta[1,2] dan Putu Ika Wahyuni[1,2]

[1]Magister Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan , Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24 Denpasar
Email : Aryasaputra969@gmail.com
[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24 Denpasar
Email: inengahsinarta@warmadewa.ac.id
Email: ikawahyuni9971@gmail.com

ABSTRAK

Desa Petang Terletak Pada Ketinggian 800 mdpl dengan luas wilayah 115 km² dan jumlah penduduk 28928 jiwa, wilayah ini merupakan daerah dataran tinggi yang memiliki medan berbukit, dengan curah hujan mencapai 2.135 mm dan kemiringan lereng paling curam sekitar 64°. BPBD Kabupaten Badung mencatat dari tahun 2016 sampai tahun 2020 terjadi sebanyak 29 kejadian tanah longsor di Desa Petang, yang sekaligus menempatkan Desa Petang sebagai daerah yang paling rawan tanah longsor di Kabupaten Badung, Pendekatan – pendekatan yang telah dilakukan sebagai bentuk Langkah mitigasi bencana tanah longsor, seperti pembuatan peta bencana, analisis Curah Hujan pemicu tanah longsor, pada penelitian ini dilakukan dengan metode statistik Bayesian, yang memanfaatkan pencatatan data kejadian tanah longsor di masa lampau untuk dianalisis menjadi prediksi kejadian dimasa yang akan datang, dengan berpedoman pada 7 Parameter Sensitivitas Tanah Longsor dalam Peraturan Mentri Pekerjaan Umum No. 22/PRT/M/2007 didapatkan sudut kemiringan lereng yang ditinjau di desa petang bervariasi mulai dari 9˚ sampai 64 ˚ kemudian untuk jenis Tanah, merupakan batuan gunung api kelompok buyan-beratan dan batur : jenis tanah latosol, kerapatan struktur sangat lebar, curah hujan rata- rata tahunan 127,24 mm, tata air lereng berada pada tingkat sedang – tinggi dengan debit air sumur >5-10 Liter /Detik, dan kegempaan berada pada 0,3-0,4 g. Penelitian dengan metode pendekatan Bayesian menghasilkan nilai probabilitas ancaman longsor sebesar 65,96%, jadi daerah tersebut memiliki tingkat ancaman tinggi, dengan tingkat akurasi 89%.
Kata Kunci : Ancaman Longsor, Bayesian ,Mitigasi Bencana, Sensitivitas

1. PENDAHULUAN

Desa Petang merupakan salah satu desa di Kabupaen Badung yang terletak pada ketinggian 800 mdpl dengan luas wilayah 115 km² dan jumlah penduduk 28928 jiwa(Darmayasa et al., 2018), yang memiliki jarak sekitar 40 kilometer dari Kota Denpasar, wilayah ini merupakan daerah dataran tinggi dengan medan berbukit dan pegunungan, dengan suhu tahunan rata-rata 24,2°C dan curah hujan mencapai 2.135 mm. Wilayah ini memiliki daerah pegunungan dengan kemiringan lereng sekitar 64°.(Biomi et al., 2024) BPBD Kabupaten Badung mencatat dari tahun 2016 sampai tahun 2020 terjadi sebanyak 29 kejadian tanah longsor di Desa Petang, yang sekaligus menmpatkan Desa petang sebagai daerah yang paling rawan tanah longsor di Kabupaten Badung, secara umum tanah longsor terjadi akibat Beberapa hal yaitu curah hujan yang tinggi (Sinarta & Basoka, 2019),erosi aliran Sungai(Wiraga et al., 2020), kondisi geologi dan dan pengaruh aktivitas manusia (Naryanto et al., 2019)

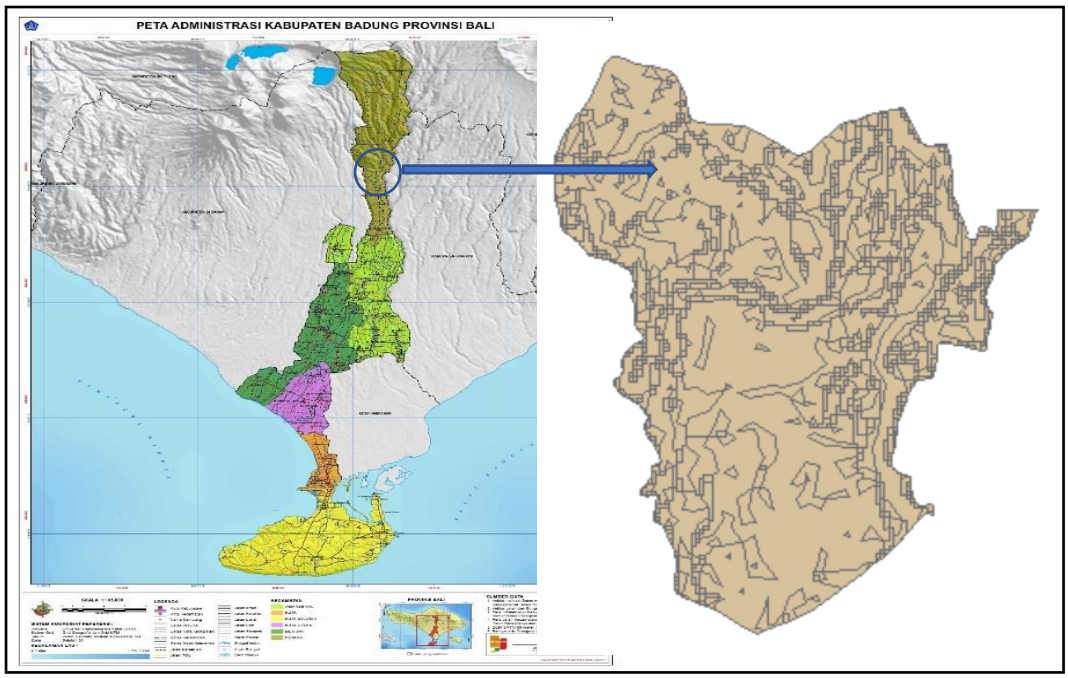
Hingga saat ini banyak sekali berkembang upaya- upaya penelitian dengan pendekatan pendekatan tertentu guna bisa mengetahui dan memitigasi terjadinya bencana tanah longsor agar nantinya tidak terdapat korban jiwa seperti dengan perhitungan statistik dari data curah hujan yang dapat memicu kejadian tanah longsor(Agustina, 2020) , model matematis dari analisis regresi logistik dan aplikasi Sistem Informasi Geografis (SIG) yang dilakukan berdasarkan variabel-variabel penyebab terjadinya tanah longsor yakni jenis tanah, struktur geologi, topografi, penggunaan lahan, curah hujan, jaringan jalan, dan jaringan drainase(Hutomo & Maryono, 2016), metode geolistrik untuk mengidentifikasi adanya nilai resistivitas yang kontras yang mengindikasikan adanya bidang gelincir namun memiliki keterbatasan dalam hal interpretasi dimana harus dikorelasikan dengan data bor (Feranie et al., 2015), metode research and development dengan menggunakan beberapa peralatan seperti sensor dan juga mikrokontroler(Husnul & Winardi B A, 2022)

Naive Bayes merupakan sebuah algoritma yang berbasis pada prinsip-prinsip teori Bayes, yaitu sebuah teorema dalam statistik yang menggambarkan probabilitas suatu kejadian berdasarkan pengetahuan sebelumnya tentang kondisi yang terkait dengan kejadian tersebut (Pramana et al., 2023). Algoritma ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi prediksi, seperti misalnya untuk memprediksi penjualan suatu produk berdasarkan pola penjualan historis. Dengan menggunakan data yang telah dikumpulkan sebelumnya, algoritma Naive Bayes mampu memprediksi kejadian di masa depan dengan memperhitungkan probabilitas yang berkaitan dengan faktor-faktor tertentu.

Di luar bidang prediksi penjualan, Naive Bayes juga dapat diterapkan dalam berbagai situasi lain, seperti analisis dan peramalan bencana. Dalam studi ini, penulis berencana untuk memanfaatkan metode Bayesian dalam analisis data historis mengenai kejadian tanah longsor di desa Petang. Dengan menggunakan data yang telah terjadi di masa lampau, penulis akan mencoba memprediksi kemungkinan terjadinya bencana tanah longsor di masa yang akan datang. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi pola-pola penting dalam data, seperti sudut kemiringan lereng, jenis Tanah, kerapatan struktur Curah Hujan tata air lereng kegempaan, dan vegetasi yang berkontribusi pada kejadian longsor. Dengan demikian, metode Naive Bayes dapat membantu memodelkan probabilitas terjadinya bencana alam di wilayah tertentu dan memberi wawasan yang lebih baik untuk persiapan dan mitigasi risiko bencana

2. METODE PENELITIAN

Lokasi daerah penelitian kali ini adalah desa Petang, kecamatan petang Kabupaten Badung Bali seperti terlihat pada Gambar 1



Gambar 1. Daerah Penelitian Desa Petang

Desa Petang, yang menjadi lokasi penelitian ini, terletak pada titik koordinat 115.2133 LS/LU dan -8.384175 BT/BB.. Di sebelah utara, desa ini berbatasan dengan Desa Sulangai, sebuah wilayah yang memiliki kesamaan karakteristik dengan Petang. Di sebelah selatan, berbatasan dengan Desa Pangsan, yang juga berada dalam kawasan Kecamatan Petang. Di sisi timur, Desa Petang dibatasi oleh aliran Sungai Ayung, sungai yang cukup besar dan memiliki peran penting bagi ekosistem pertanian. Di sebelah barat, terdapat Sungai Penet

Secara geografis, Desa Petang memiliki luas total sekitar 1.325 hektar. Lahan yang ada di desa ini digunakan untuk berbagai keperluan agraris. Sebanyak 44 hektar wilayahnya digunakan sebagai lahan persawahan. Lahan persawahan ini menjadi komponen penting bagi perekonomian desa, terutama dalam produksi padi yang menjadi salah satu kebutuhan pokok masyarakat Bali. Persawahan di Desa Petang umumnya bergantung pada sistem irigasi tradisional Bali, yaitu Subak, yang secara turun-temurun mengatur pembagian air dari sungai ke sawah-sawah di seluruh Bali.

Selain persawahan, terdapat sekitar 664 hektar lahan yang digunakan sebagai ladang. Ladang ini biasanya ditanami berbagai macam tanaman pangan dan hortikultura seperti jagung, ubi kayu, kacang-kacangan, serta berbagai jenis sayuran. Aktivitas pertanian ini menjadi salah satu penopang utama kehidupan masyarakat Desa Petang, selain dari sektor pariwisata dan jasa. lebih lanjut, sekitar 544 hektar dari wilayah Desa Petang adalah lahan perkebunan yang ditanami komoditas seperti kopi, cengkeh, serta buah-buahan tropis seperti manggis, rambutan, dan durian. Perkebunan ini memberikan nilai ekonomi yang cukup signifikan bagi masyarakat setempat, mengingat komoditas ini memiliki pasar yang luas baik secara lokal maupun ekspor.di

samping itu, sekitar 72 hektar dari lahan Desa Petang digunakan untuk keperluan lain, seperti lahan pemukiman, fasilitas umum, dan infrastruktur desa. Pembangunan infrastruktur seperti jalan, tempat ibadah, sekolah, dan balai desa tersebar di berbagai titik desa untuk mendukung aktivitas masyarakat. Sebagian dari lahan tersebut juga

digunakan sebagai hutan atau ruang hijau yang memberikan keseimbangan ekosistem dan berfungsi sebagai area konservasi.

Dengan letak geografis yang dekat dengan dua sungai besar, yaitu Sungai Ayung dan Sungai Penet, Desa Petang memiliki kondisi alam yang subur dan memiliki potensi bencana seperti tanah longsor, terutama di musim hujan. Aliran sungai yang kuat bisa menyebabkan erosi di beberapa titik, khususnya di lahan yang berbatasan langsung dengan sungai. Kondisi ini menjadi salah satu alasan mengapa Desa Petang menjadi subjek penelitian dalam analisis dan peramalan bencana, terutama untuk memitigasi bencana tanah longsor di masa depan. Data historis tentang kejadian tanah longsor di wilayah ini dapat menjadi dasar untuk model prediktif yang membantu mitigasi risiko bencana di masa mendatang.

Pedoman untuk pembobotan dalam penelitian ini adalah tabel sensitifitas Peraturan Mentri Pekerjaan Umum No. 22/PRT/M/2007 yang terdiri 7 parameter, Setelah melakukan pembobotan sesuai dengan tabel yang ada, langkah berikutnya adalah pengolahan data menggunakan algoritma Naive Bayes dengan bantuan software Jupyter Notebook dari Python. Setelah probabilitas dihitung, proses validasi dilakukan secara sampling. Validasi ini melibatkan pengecekan Safety Factor pada lereng-lereng di Desa Petang dengan menginput data propertis tanah, seperti sudut geser, kohesi, berat jenis, dan data bor log ke dalam software Geoslope/W. Tiga sampel data digunakan untuk proses ini, di mana satu sampel mewakili kejadian tanah longsor, sementara dua sampel lainnya mewakili kejadian tanpa longsor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari 29 titik tinjau lereng yang mendominasi adalah lereng yang memiliki sudut kemiringan lebih dari 40˚ dengan nilai bobot 5 sejumlah 20 titik data, sedangkan lereng yang memiliki sudut kemiringan 35˚ - 40˚ dengan nilai bobot 4 terdapat hanya 1 titik, dan ada 2 titik yang memiliki sudut kemiringan lereng 30˚-35˚ dengan nilai bobot 3, selanjutnya ada 3 titik dengan sudut kemiringan lereng 20˚-30˚ yang memiliki bobot 2, dan yang terakhir lereng yang memiliki sudut kemiringan 15˚ – 20˚ dengan bobot 1 sebanyak 3 titik. Dilihat dari peta jenis tanah di Provinsi Bali, Desa Petang berada di kawasan yang ditandai dengan warna biru muda. Kawasan ini mengindikasikan bahwa jenis batuan gunung api kelompok buyan-beratan dan batur : terutama tuf dan lahar, dengan jenis tanah latosol coklat kekuningan dengan nilai bobot 2. Berdasarkan peta seismotektonik provinsi Bali, Desa Petang terletak di area dengan struktur geologi yang sangat lebar. Menurut tabel yang tercantum dalam Peraturan Menteri PU, wilayah ini memiliki bobot 5, yang menunjukkan bahwa jarak antar kekar di kawasan tersebut sangat tinggi. Pengolahan Data Curah Hujan Kawasan Pada Penelitian Ini Menggunakan Metode Polygon Thiessen Yang Menghasilkan bobot 1 Karena Mendapatkan Hasil Curah Hujan Tahunan Kurang dari 2500 mm, Dengan Memanfaatkan Pencatatan 3 Stasiunn Dengan Tipe Pos Hujan di Sekitar Lokasi Dimana Stasiun Yang Digunakan Adalah Pos Hujan Mambal, Pos Hujan Tegalalang, dan Pos Hujan Pangotan. Desa Petang Memiliki Spesifikasi Tanah Latosol Dengan Warna Coklat Kekuningan Yang Merupakan Akuifer dengan produktivitas tinggi dan penyebaran luas, kedalaman muka air tanah beragam, debit sumur umumnya > 5 liter/detik. Yang Dalam Dalam Tabel PU potensi air bawah tanah Mendapatkan Bobot 4. Pada Standar Nasional Indonesia no 1726 Tentang Kegempaan Pulau Bali Memiliki dua Zona dengan Nilai Kegempaan 0,3-0,4 g dan 0,4-0,5 g, Desa Petang Terletak Pada Zona yang Nilainya 0,3 – 0,4 g, atau pada tabel Pu mendapat bobot 3. Sedangkan untuk vegetasi dibagi menjadi 5 klas yaitu Tanah berbatu, semak, sabana dengan bobot 1,hutan dengan bobot 2, perkebunan atau ladang dengan bobot 3, sawah tadah hujan dengan bobot 4, dan sawah beririgasi dengan bobot 5, dalam penelitian ini satu titik tinjauan longsor dimodelkan dengan semua kelas vegetasi sebagai salah satu syarat dalam analisis Bayesian.

Berdasarkan atas analisis pendekatan Bayesian yang dikombinasikan dengan 7 Paarameter diperoleh pendekatan ancaman longsor dengan nilai 0,00 -25,00 % adalah Rendah, 25,01 – 50,00 %adalah Sedang, 50,01 – 75,00 % adalah Tinggi dan 75,01 – 100% adalah Sangat Tinggi. Selanjutnya dilakukan input tabel bobot kedalam jupyter notebook dan dilakukan analisis Bayesian didapatkan rentan hasil peluang terjadinya longsor setiap titik tinjau adalah berkisar antara 62,63% - 67.69 % dengan total persentase kemungkinan terjadinya longsor di desa petang sebesar 65,96%

Validasi dalam penelitian ini dilakukan dengan 2 langkah, yaitu dengan mengecek akurasi prdiksi langsung dari jupyter notebook yang menghasilkan tingkat akurasi sebesar 89% seperti terlihat pada gambar berikut ini

```
[17]: cm = confusion_matrix(y_test,y_pred)
      print(cm)

      [[10  1]
       [ 2 16]]

[18]: akurasi = classification_report(y_test,y_pred)
      print(akurasi)

                    precision    recall  f1-score   support

                 0       0.83      0.91      0.87        11
                 1       0.94      0.89      0.91        18

          accuracy                           0.90        29
         macro avg       0.89      0.90      0.89        29
      weighted avg       0.90      0.90      0.90        29

[19]: akurasi = accuracy_score(y_test,y_pred)
      print("tingkat Akurasi : %d persen"%(akurasi*100))

      tingkat Akurasi : 89 persen
```

Gambar 2. Hasil prediksi dari Jupyter Notebook

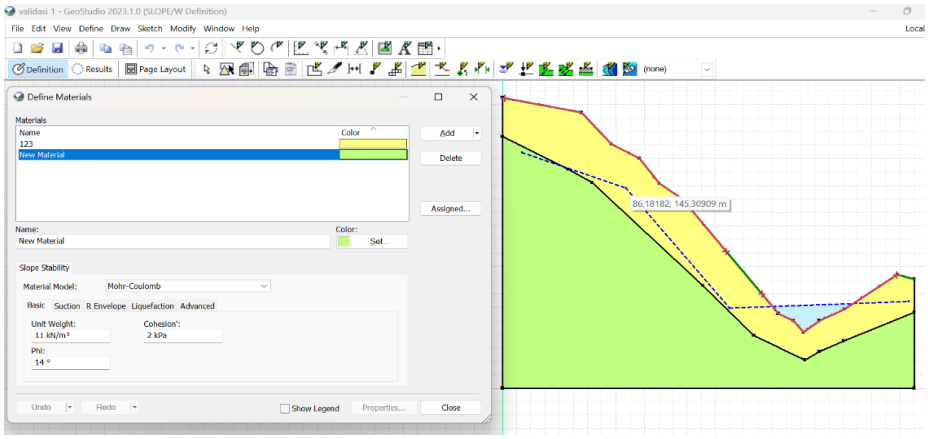
Sedangkan validasi dengan menggunakan Geoslope/W Ada 6 nilai indeks stabilitas yang digunakan sebagai acuan untuk menentukan kestabilan lereng (Sinarta et al., 2017) yaitu sebagai berikut

Tabel 2. Indeks stabilitas lereng

Kondisi SI	Kelas	Kondisi
> 1,5	1	Zona kemiringan stabil
1,5–1,25	2	Zona kemiringan agak stabil
1.24–1.0	3	Zona lereng kurang stabil Zona
0,9–0,5	4	ambang batas bawah longsor
0,4–0,1	5	Zona ambang atas longsor
0,0	6	Zona lereng longsor

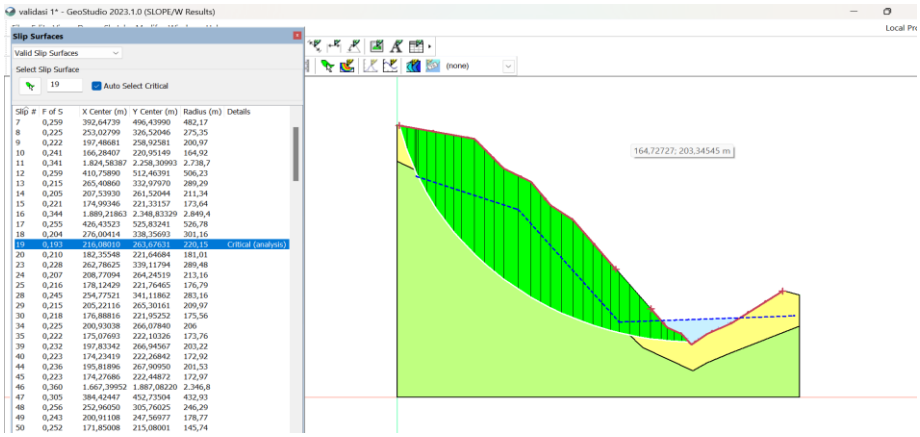
Tabel 3. Nilai stabilitas lereng

No	Nama	Safety Factor			
		Max	Score	Min	Score
1	Validasi 1	0,753	4	0,193	5
2	Validasi 2	0,737	4	0,583	4
3	Validasi 3	0.949	4	0,223	5



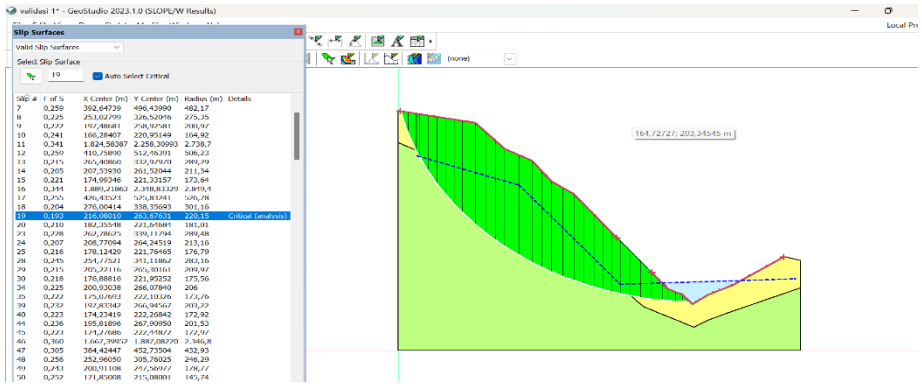
Gambar 3. Hasil Validasi 1

Pada titik tinjau yang pertama kesetabilan lereng paling stabil adalah di angka 0.753 dimana di dalam tabel 2 diatas beraada di nilai kelas 4 dengan kondisi kestabilan di ambang batas bawah longsor, sedangkan kondisi paling kritis berada di angka 0.193 yang mendapatkan nilai kelas 5 dengan nilai kestabilan lereng berada pada Zona ambang atas longsor ,



Gambar 4. Hasil Validasi 2

Pada titik tinjau yang Kedua kesetabilan lereng paling stabil adalah di angka 0.737 dimana di dalam tabel 2 diatas beraada di nilai kelas 4 dengan kondisi kestabilan di ambang batas bawah longsor sedangkan kondisi paling kritis berada di angka 0.583 yang mendapatkan nilai 4 dengan nilai kestabilan lereng di ambang batas bawah longsor



Gambar 5. Hasil Validasi 3

Pada titik tinjau yang Ketiga kesetabilan lereng paling stabil adalah di angka 0.949 dimana di dalam tabel diatas angka tersebut beraada di nilai kelas 4 dengan kondisi kestabilan di ambang batas bawah longsor sedangkan kondisi paling kritis berada di angka 0.223 yang mendapatkan nilai 5 dengan nilai kestabilan lereng berada pada Zona ambang atas longsor

.

4. KESIMPULAN

Dalam penilaian potensi kerawanan tanah longsor di Desa Petang menggunakan 7 indikator yaitu kemiringan lereng, Geologi Stuktur, Jenis Tanah, Curah Hujan, Potensi Air Tanah dan Vegetasi. Pendekatan Bayesian memperoleh katagori nilai 0,00 -25,00 % adalah Rendah, 25,01 – 50,00 %adalah Sedang, 50,01 – 75,00 % adalah Tinggi dan 75,01 – 100% adalah Sangat Tinggi, maka desa Petang tergolong daerah yang memiliki tingkat kerawanan tinggi terutama pada daerah lereng, dengan persentase 65,95 % yaitu dengan kategori sedang . Dari hasil validasi pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa prediksi yang dilakukan dengan metode Bayesian mempunyai akurasi sebesar 89%, dan analisis stabilitas lereng dengan menggunakan software Geoslope/W mempunyai nilai dibawah angka aman dibawah 1, menunjukkan lereng tidak stabil

DAFTAR PUSTAKA

Agustina, L. (2020). Analisis Ambang Batas Hujan untuk Pengembangan Sistem Peringatan Dini Tanah Longsor. *Jurnal Dialog Penanggulan Bencana*, *11*(1), 75–81.

Biomi, A. A., Haryawan, I. G. A., Prihastini, K. A., Negara, N. L. G. M., Kusuma, M. A. P. N., & Sulistyawati, N. P. E. (2024). Mitigasi Bencana Alam Tanah Longsor Pada Nungnung Waterfall Desa Pelaga Kecamatan Petang Kabupaten Badung. *I-Com: Indonesian Community Journal*, *4*(1), 551–560. https://doi.org/10.33379/icom.v4i1.4135

Darmayasa, I. K. A., Aryastana, P., & Rahadiani, A. A. S. D. (2018). Analisis Kebutuhan Air Bersih Masyarakat Kecamatan Petang. *Paduraksa*, *7*(1), 41–52.

Feranie, S., Tohari, A., & Latief, F. D. E. (2015). *Prediksi Jangkauan Pergerakan Tanah Longsor Menggunakan Model Gesekan Coulomb Sederhana Prediksi Jangkauan Pergerakan Tanah Longsor Menggunakan Model Gesekan Coulomb Sederhana*. *April 2021*.

Husnul, M., & Winardi B A, S. (2022). Sistem Pendeteksi Dini Tanah Longsor Menggunakan Sensor Vibration Berbasis Internet of Things. *Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi (JUKANTI)*, *5*, 101–110.

Hutomo, I. A., & Maryono, M. (2016). Model Prediksi Kawasan Rawan Bencana Tanah Longsor di Kecamatan Karangkobar. *Jurnal Pembangunan Wilayah & Kota*, *12*(3), 303. https://doi.org/10.14710/pwk.v12i3.12905

Naryanto, H. S., Soewandita, H., Ganesha, D., Prawiradisastra, F., & Kristijono, A. (2019). Analisis Penyebab Kejadian dan Evaluasi Bencana Tanah Longsor di Desa Banaran, Kecamatan Pulung, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur Tanggal 1 April 2017. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, *17*(2), 272. https://doi.org/10.14710/jil.17.2.272-282

Pramana, I., Sudiarsa, I. W., & ... (2023). Penerapan Algoritma Naive Bayes Untuk Prediksi Penjualan Produk Terlaris Pada CV Akusara Jaya Abadi. *JATISI (Jurnal Teknik …*, *10*(4), 518–534. https://jurnal.mdp.ac.id/index.php/jatisi/article/view/6498%0Ahttps://jurnal.mdp.ac.id/index.php/jatisi/article/download/6498/1694

Sinarta, I. N., & Basoka, I. W. A. (2019). Keruntuhan Dinding Penahan Tanah dan Mitigasi Lereng di Dusun Bantas, Desa Songan B, Kecamatan Kintamani. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, *3*(0), 23–32. https://doi.org/10.12962/j26151847.v3i0.5188

Sinarta, I. N., Rifa'i, A., Fathani, T. F., & Wilopo, W. (2017). Landslide Hazards Due To Rainfall Intensity in the Caldera of Mount Landslide Hazards Due To Rainfall Intensity in. *The 1st Warmadewa University International Conference on Architecture and Civil Engineering SUSTAINABILITY, DESIGN AND CULTURE 20th October 2017, Faculty of Engineering, Warmadewa University, Bali LANDSLIDE*, *1*, 160–167.

Wiraga, I. W., Arya, I. W., Dwipa, I. G. A. G. S. N., & Putri, A. A. (2020). *KELOD DESA BELUMBANG KERAMBITAN Jurusan Teknik Sipil , Politeknik Negeri Bali Bukit Jimbaran Badung , 80364 PENDAHULUAN Setra / kuburan Banjar Yehmalet Kelod , Desa Belumbang memiliki luas sekitar 30 are yang terletak pada aliran tukad / Sungai Yeh Ho . P*. *1*(1), 547–554.

EFEKTIFITAS AKAR RUMPUT GAJAH DAN RUMPUT VETIVER TERHADAP PERILAKU KERUNTUHAN TANAH

I Nengah Sinarta[1,2]*, Putu Aryastana[1,2], Kadek Windy Candrayana[2], I Ketut Agung Sudewa[3]
[1]Program Studi Magister Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar
[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar
[3]Program Studi Agroteknologi, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar
***e-mail**: inengahsinarta@warmadewa.ac.id*

ABSTRAK

Penerapan Bioengineering dengan penanaman rumput sebagai stabilitas lereng lebih efektif mengurasi erosi permukaan dibandingkan dengan pepohonan. Akar tanaman secara signifikan memengaruhi sifat tanah, terutama di tanah di luar area terbatas yang mengelilingi batang akar utama. Beberapa hasil bisa dapat dihasilkan jika sifat plastik tanah hanya digunakan dalam mengevaluasi stabilitas lereng tanpa mempertimbangkan efek akar tanaman. Pengujian efektifitas pengaruh akar terhadap pola keruntuhan tanah dilakukan di laboratorium dengan kombinasi rumput gajah dengan rumput vetiver. Penelitian ini, efek akar terhadap karakteristik elastis-plastik blok tanah vulkanik dengan akar diperiksa dengan model elastis-plastik dari kemiringan kurva yang berbeda dengan c dan φ diperoleh melalui uji triaksial tak terdrainase terkonsolidasi (CU) menggunakan tanah vulkanik yang dibentuk ulang. Tanah dengan akar vetiver dan rumput gajah didapat kohesi (c) sebesar 0,25 kg/cm2 dengan sudut geser (φ) sebesar 31,89º dan kohesi efektif (c') sebesar 0,65 kg/cm2 dengan sudut geser efektifnya (φ') sebesar 34,82º, dibandingkan tanah tanpa akar nilai dimana sudut gesek dalam naik sebesar 9,1% dan kohesi efektif naik sebesar 225%. Kekuatan geser tanah vulkanik sangat bergantung pada tegangan utama, yang dapat digunakan untuk menggambarkan kekuatan blok tanah elastoplastik. Kegagalan tanah vulkanik dengan akar rumput terjadi tegangan utama maksimum dapat dianggap sebagai tegangan batas berada di antara 420 kPa – 300 kPa.

Kata kunci: Tanah Vulkanik, Bio-engineering, elastis-plastis, Triaksial CU.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan aktivitas vulkanik tertinggi di dunia, dengan wilayah yang banyak didominasi oleh tanah vulkanik. Tanah vulkanik memiliki sifat unik, seperti kepadatan rendah, porositas tinggi, dan permeabilitas besar, yang memberikan keuntungan agrikultural namun juga menjadi tantangan dalam hal stabilitas lereng (Sinarta et al., 2021). Sifat tanah yang mudah jenuh oleh air dan rentan terhadap deformasi menjadi faktor utama dalam banyak kejadian longsor di daerah perbukitan dan pegunungan yang berpotensi vulkanik (Pelascini et al., 2022).

Curah hujan yang tinggi seringkali memicu longsor di daerah bertanah vulkanik, terutama ketika kejenuhan air meningkatkan tekanan pori dalam tanah, mengurangi kekuatan geser, dan memperbesar kemungkinan terjadinya longsor (I N Sinarta et al., 2021) (Sudani & Patil, 2023). Selain itu, gempa bumi yang sering terjadi di wilayah-wilayah vulkanik aktif juga menjadi faktor pemicu longsor yang signifikan, terutama di lereng-lereng yang sudah mendekati ambang stabilitas (Havenith et al., 2016) . Kombinasi dari gempa bumi dan kejenuhan air dalam tanah dapat menyebabkan penurunan stabilitas lereng secara drastis, yang dapat mengakibatkan longsor besar dengan dampak yang luas (Towhata, 2022).

Khusus di Kabupaten Bangli data Pusdalop BPBD Provinsi Bali tahun 2020, telah terjadi 27 kali bencana longsor atau sekitar 16,26% dari seluruh kejadian gerakan tanah di Pulau Bali (Pusdalop BPBD Provinsi Bali, 2020). Ancaman bencana tanah longsor ancaman tinggi sebesar 11% dan sangat tinggi 9%, dengan paparan sangat tinggi 4216 ha, dusun rawan paparan yaitu Desa Trunyan, Desa Abang Batudinding dan Desa Buahan dan terjadi pada musim hujan (Sinarta et al., 2021). Potensi longsor bahan rombakan (debris flow) sangat tinggi di Dusun Dukuh, Desa Abang Batudinding yang berpenduduk 221 KK adalah dusun terpencil yang berada di Kaldera Gunung Batur, terletak dilereng Gunung Abang dengan vegetasi rendah yang setiap musim hujan selalu mengalami longsor bahan rombakan (debris flow)(Sinarta et al., 2017) (I. Nengah Sinarta et al., 2023). Berdasarkan peta hasil dari penelitian dasar ristekbrin 2019-2020 dimana luas genangan sebesar 49.830m2,volume 98,639m3/dt, jangkauan lembah sungai mencapai 49,5m dan tebal sedimen 1-1,5m (Sinarta & Wahyuni, 2022).

Penelitian terdahulu sudah banyak yang menganalisis lereng dengan memodelkan rumput *vetiver* dengan pendekatan *Equivalent cohesion approach* dan *Root as pile approach* sebagai bentu penanganan longsor dengan konsep Bioengineering (Nengah Sinarta et al., 2023). Penelitian ini akan mencaoba pendekatan lainnya dalam menganalisis lereng dengan kombinasi akar rumput gajah dan rumput *vetiver*. Metode yang digunakan untuk penelitian ini yaitu dengan melakukan pengujian Triaxial CU (*Consolidated Undrained*) terhadap tanah vulkanik sampel terganggu (Li

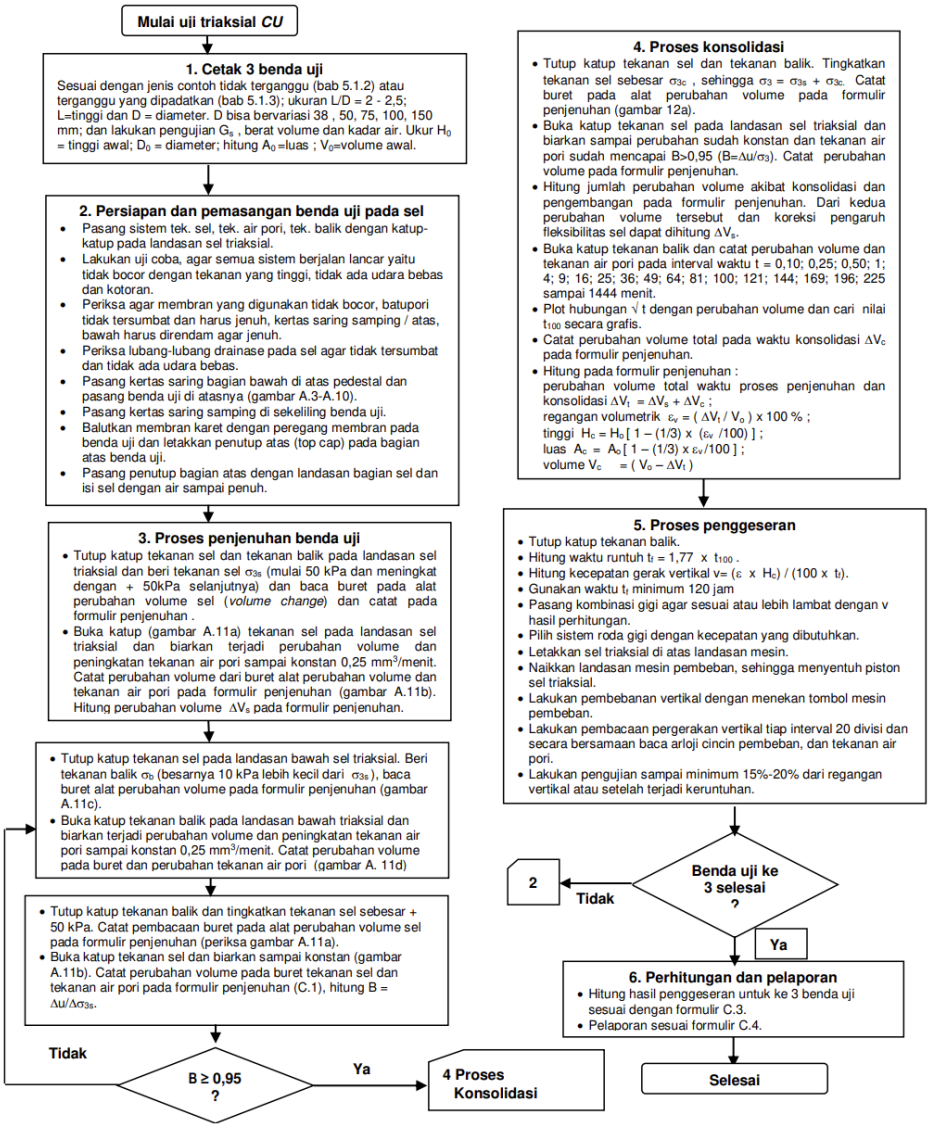
et al., 2017). Model pertama tanah Vulkanik akan di-*remoulded* untuk mendapatkan properties tanah tanpa akar, model kedua tanah Vulkanik akan di- *remoulded* dengan akar rumput vetiver dan rumput gajah dengan akar pada tanah sebanyak 1% dengan komposisi 67% akar rumput Vetiver dan 33% akar rumput gajah. Karakteristik visual akar rumput vetiver lebih besar dan panjang, sedangkan rumput gajah memiliki akar serabut(Hoque et al., 2022).

Penelitian ini akan menjadi penting dalam penyeledikan tanah vulkanik dengan tanaman rumput vetiver dan rumput gajah yang ada pada permukaan lereng. Hasil laboratoium akan menunjukan nilai kohesi (c') dan sudut geser (φ') yang menggambarkan kekuatan blok tanah elastoplastik dalam menahan gaya yang terjadi baik akibat berat sendiri, infiltrasi air hujan dan juga beban *seicmic* yang dapat terjadi (Qi et al., 2022) (Pronoto et al., 2021). Nilai ini dapat menjadi acuan properties tanah untuk simulasi numeris kestabilan lereng akibat perkuatan akar kombinasi vetiver dan rumput gajah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Uji Triaxial CU

Standar ini menetapkan cara uji triaksial untuk tanah dalam keadaan terkonsolidasi tidak terdrainase (CU) dan terkonsolidasi terdrainase (CD), untuk memperoleh kuat geser (φ '), kohesi (c') dan hubungan antara tegangan dan regangan benda uji tanah tidak terganggu atau benda uji tanah terganggu. Prosedur pengujian Triaxial CU dapat dilihat pada gambar 1. Yang didapat dari SNI 03-2455-2004 Cara Uji Triaksial untuk Tanah dalam Keadaan Terkonsolidasi Tidak Terdrainase (CU) dan Terkonsolidasi Terdrainase (CD) (Islam et al., 2013).



Gambar 1. Bagan alir cara uji triaksial *consolidated undrained* (CU)

Karakteristik Rumput Gajah dan Rumput Vetiver

Rumput gajah memiliki akar serabut, dimana akar tanaman hanya mencapai lapisan top soil tanah, sehingga dapat yang tumbuh pada buku-buku dari batang yang merayap di bagian permukaan tanah (Li et al., 2017). Hasil pengukuran untuk rumput gajah umur 1 bulan akar serabutnya menjangkau kedalaman tanah mencapai 20 cm, sedangkan rumput vetiver mampu masuk kedalam tanah mencapai 40-45 cm seperti terlihat pada gambar 1.



Gambar 2. Perbedaan akar Rumput Gajah dan Rumput vetiver

Gambar 2 menunjukkan bagian akar rumput gajah merayap secara horisontal sangat cepat yang membentuk jalinan di permukaan tanah sehingga menutup tanah, kondisi tersebut pada penelitian dilakukan jarak tanam rumput gajah adalah 40 cm x 40 cm. Rumput vertiver dengan jumlah daun yang minim cenderung bergerak kebawah sehingga sangat sulit di cabut.

3. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan Pengujian laboratorium Triaxial pada Laboratorium Mekanika Tanah, Fakultas Teknik dan Perencanaan Univeristas Warmadewa. Sampel tanah vulkanik menggunakan sampel tanah terganggu (*Disturb Sampel*/*DS*) yang diambil dari kaki bukit Gunung Abang. Pengujain dilakukan terhadap 2 model re-*moulded*, tanpa pengaruh akar vetiver dan rumput gajah dan dengan kombinasi akar rumput vetiver dan rumput gajah. Sampel tanah vulkanik dari Dusun Dukuh, Abang Batudinding yang telah diuji propertis tanahnya, selanjutnya dilakukan pengujian triaksial sesuai standar Triaxial CU dan CD dilakukan pengujian yang sesuai dengan aturan ASTM D 4767 dan ASTM D7181. Uji ini dilakukan 3 tahapan penting yaitu tahap jenuh (saturated), tahap konsolidasi dan tahap penggeseran dengan alat. Tahap penjenuhan ini dilakukan agar tanah tidak ada tambahan penotor dalam hal ini penjenuhan hingga 100% (tidak ada air yang mengalit di dalamnya), tahap konsolidasi dilakukan untuk memadatkan tanah yang telah selesai tahap penjenuhan dan setelah itu dilakukan uji penggeseran. Tanah yang akan diuji triaksial terlebih dahulu dipadatkan pada kondisi berat isi kering maksimum dan kemudian dibuat juga contoh tanah pada kondisi 98% lebih kering dan lebih basah dari berat isi kering maksimum. Contoh tanah kemudian dicetak menjadi contoh tanah untuk diuji pada alat uji triaksial MBT No seri SO-600. Cetakan benda uji digunakan cetakan diameter 3 cm dan tinggi 7.5 cm.



a. Pengujian Triaxial CU b. Sampel akar

Gambar 3. Alat dan Sampel

Sampel tanah diambil dari sampel terganggu atau *remoulded sampel (Hoque et al., 2022)*. Dari tanah vulkanik Gunung Abang. Sampel dibuat dengan 2 model, model pertama sampel di-*remoulded* tanpa pengaruh akar, dan yang kedua sampel di-remoulded dengan penggabungan dengan sampel akar Vetiver dan sampel akar Rumput Gajah.



a. Persiapan sampel akar



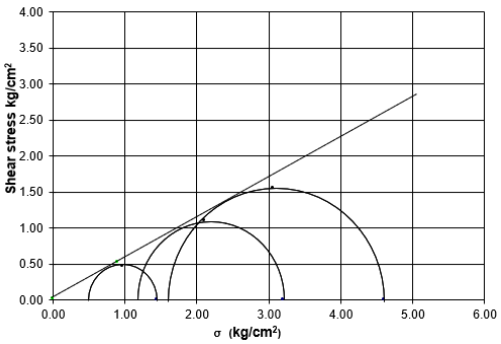
b. Penyimpanan sampel

Gambar 4. Proses pengujian

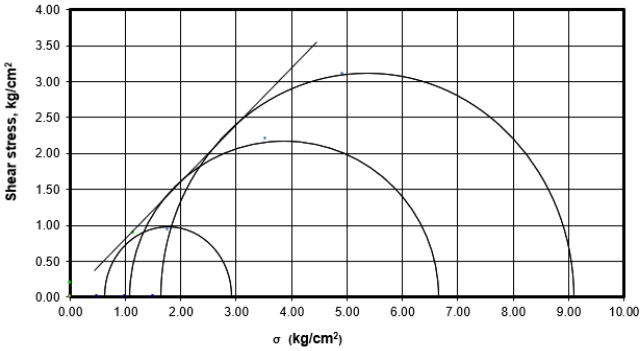
Komposisi sampel rumput ditambahkan sebanyak 1% dari berat sampel tanah, yang komposisi masing – masing akar veitver adalah 67% dan akar rumput gajah sebanyak 33%. Kemudian sampel disimpan disimpan pada Desikator.

4. HASIL

Hasil pengujian Triaxial menunjukan sampel terganggu tanah vulkanik dan penggabungan dengan akar veiver dan rumput gajah. Nilai-nilai tegangan-tegangan deviator dalam pengujian triaksial CU diperlihatkan pada Gambar 5 dan Gambar 6**.** Pada sampel tanah tanpa akar kohesi (c) yang didapat sebesar 0,10 kg/cm^2 dengan sudut geser (φ) sebesar 29,54º dan kohesi efektif (c') sebesar 0,20 kg/cm^2 dengan sudut geser efektifnya (φ') sebesar 31,44º.

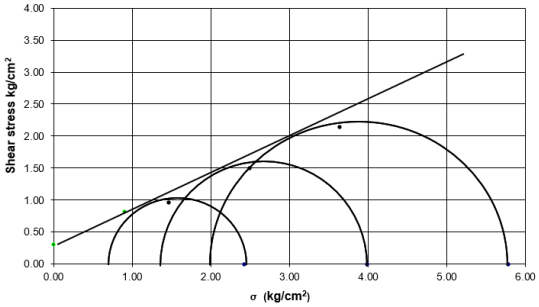


(a) Grafik Keruntuhan Mohr Total

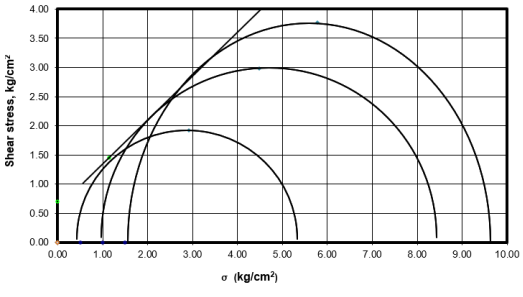


(b) Grafik Keruntuhan Mohr efektif

Gambar 5. Grafik keruntuhan Mohr hasil pengujian Triaxial CU pada tanah tanpa akar



(a) Grafik Keruntuhan Mohr Total



(b) Grafik Keruntuhan Mohr efektif

Gambar 6. Grafik keruntuhan Mohr hasil pengujian Triaxial CU pada tanah dengan akar

Hasil pengujian triaxial CU (Consolidated Undrained) menunjukan kohesi dan sudut geser dalam mengalami peningkatan nilai pada sampel dengan tambahan akar vetiver dan rumput gajah. Hasil awal ini menunjukan bahwa akar rumput vetiver dan rumput gajah cukup baik dalam menahan gaya geser yang diterima oleh tanah. Pada sampel tanah dengan akar vetiver dan rumput gajah didapat kohesi (c) sebesar 0,25 kg/cm^2 dengan sudut geser (φ) sebesar 31,89º dan kohesi efektif (c') sebesar 0,65 kg/cm^2 dengan sudut geser efektifnya (φ') sebesar 34,82º. Perbandingan dengan tanpa akar dapat di lihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perbandingan Pengujian Triaxial CU Tanah Vulkanik (*Bare Soil*)

Jenis Sampel	c (kg/m^2)	φ (º)	c' kg/m^2)	φ' (º)
Tanah Vulkanik *(Bare Soil)*	0,10	29,54	0,20	31,44
Tanah Vulkanik *(Rooted Soil)*	0,25	31,89	0,65	34,82

Hasil menunjukkan dengan akar rumput vetiver dan rumput gajah *(rooted soil)* mengalami peningkatan nilai kohesi dan sudut geser dari sampel tanah vulkanik*(bare soil)*. Nilai kenaikan akibat pengaruh tanah vulkanik yang relatif gembur di permukaan terikat oleh akar vegetasi. Hasil ini juga, dapat dibandingkan dengan penelitian terdahulu oleh (Badhon et al., 2021) yang menguji sampel tanah pasir dan clay (*bare soil*) dan kombinasi akar rumput veitiver (*rooted soil).*

Hasil pengujian triaxial CU menunjukkan kohesi dan sudut gesek dalam mengalami peningkatan nilai pada sampel dengan tambahan akar vetiver dan rumput gajah. Kekuatan gesek tanah vulkanik sangat bergantung pada tegangan utama, yang dapat digunakan untuk menggambarkan kekuatan blok tanah elastoplastik. Kegagalan tanah vulkanik dengan akar rumput terjadi tegangan utama maksimum dapat dianggap sebagai tegangan batas berada di sekitar 420 kPa. Kegagalan terjadi karena akar melemahkan gaya kohesif tetapi meningkatkan sudut gesek tanah karena kekuatan elastisnya, akar menurunkan kekuatan elastis-plastik blok tanah-akar dan semakin besar jumlah akar, semakin rentan tanah-akar mengalami deformasi plastik. Ketahanan deformasi tanah meningkat ketika akar berdiameter lebih besar ada di dalam tanah. Jadi, Perhitungan faktor keamanan lereng bervegetasi, tanpa mempertimbangkan efek akar lebih besar daripada faktor keamanan yang memperhitungkan efek akar.

Pengaruh sifat tanah yang terhadap perhitungan stabilitas lereng ditunjukkan sifat tanah γ, c, φ, c′ dan φ′ yang digunakan dalam perhitungan adalah nilai rata-rata, nilai ini berpengaruh terhadap faktor keamanan lereng. Penambahan vegetasi khususnya kombinasi rumput gajah dan rumput vetiver secara bertahap meningkat seiring dengan berfungsinya akar khususnya kondisi efektif. Rumput gajah dengan daun dan batang yang tumbuh cepat dan lebat, sehingga menutupi permukaan tanah secara efektif yang berfungsi untuk melindungi tanah dari tetesan air hujan yang langsung menghantam permukaan dan mengurangi laju aliran air di permukaan yang memberikan waktu lebih lama bagi air untuk meresap ke dalam tanah, sedangakan rumput vetiver sistem perakarannya yang dalam mampu meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah, mengurangi risiko air permukaan yang berlebihan yang dapat memicu erosi. Selain itu, infiltrasi yang lebih baik juga membantu meningkatkan cadangan air tanah, yang bermanfaat bagi tanaman lain di sekitarnya.

5. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukan efektifitas akar rumput vetiver dan rumput gajah cukup memuaskan. Dengan komposisi akar vetiver 67% dan rumput gajah 33% atau kurang lebih penanaman 2 : 1 menunjukan tahanan elastisitas yang cukup baik menahan gaya geser dengan selisih kenaikan sudut gesernya yaitu sebesar 2,93º dari tanah yang tidak ditanami rumput (*bare soil*) atau sebesar 9,1%, nilai kohesinya tanah vulkanik meningkat sebesar 0.55 kg/cm^2, atau mencapai 225%. Tanah Vulkanik pada Gunung Abang merupakan tanah lanau kepasiran sehingga memiliki nilai kohesi yang kecil akan meningkat secara signifikan dengan penambahan vegetasi khususnya akar rumput gajah dan rumput vetiver.

Kekuatan geser tanah vulkanik sangat bergantung pada tegangan utama, yang dapat digunakan untuk menggambarkan kekuatan blok tanah elastoplastik. Kegagalan tanah vulkanik dengan akar rumput terjadi tegangan utama maksimum dapat dianggap sebagai tegangan batas berada di antara 420 kPa – 300 kPa. Kegagalan terjadi karena akar melemahkan gaya kohesif tetapi meningkatkan sudut gesek tanah karena kekuatan elastisnya, akar menurunkan kekuatan elastis-plastik tanah dengan akar, dan semakin besar jumlah akar, semakin rentan tanah-akar mengalami deformasi plastik. Hasil ini menunjukan bahwa kombinasi penanaman rumput vetiver dan rumput gajah merupakan salah satu metode mitigasi bencana *bioengineering* yang cukup efekttif untuk mengurangi risiko bencana pada lereng seperti *debris flow* dan juga longsoran.

DAFTAR PUSTAKA

Badhon, F. F., Islam, M. S., & Islam, M. A. (2021). Contribution of Vetiver Root on the Improvement of Slope Stability. *Indian Geotechnical Journal*, *51*(4), 829–840. https://doi.org/10.1007/s40098-021-00557-0

Havenith, H.-B., Torgoev, A., Braun, A., Schlögel, R., & Micu, M. (2016). A new classification of earthquake-induced landslide event sizes based on seismotectonic, topographic, climatic and geologic factors. *Geoenvironmental Disasters*, *3*(1), 6. https://doi.org/10.1186/s40677-016-0041-1

Hoque, I. L., Islam, M. S., & Hoque, E. (2022). Effect of vetiver root on triaxial shear strength of a cohesionless soil. *Geomechanics and Geoengineering*, *17*(3), 857–871. https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1903089

Li, Y., Wang, Y., Wang, Y., & Ma, C. (2017). Effects of root spatial distribution on the elastic-plastic properties of soil-root blocks. *Scientific Reports*, *7*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-017-00924-z

Nengah Sinarta, I., Aryastana, P., Candrayana, K. W., Ketut, I., & Sudewa, A. (2023). *Analisis Reability Pengaruh Vegetasi Rumput Gajah Dengan Metode Elemen Hingga Pada Lereng Tanah Vulkanik*.

Pelascini, L., Steer, P., Mouyen, M., & Longuevergne, L. (2022). Finite-hillslope analysis of landslides triggered by excess pore water pressure: the roles of atmospheric pressure and rainfall infiltration during typhoons. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *22*(10), 3125–3141. https://doi.org/10.5194/nhess-22-3125-2022

Pronoto, A., Roesyanto, R., & Iskandar, R. (2021). Studi Perbandingan Parameter Kekuatan Geser Triaxial (Cu) Multistage Dengan Singlestage Untuk Tanah Klasifikasi Mh Atau A-7-5(25). *Jurnal Syntax Admiration*, *2*(4), 558–568. https://doi.org/10.46799/jsa.v2i4.210

Pusdalop BPBD Provinsi Bali. (2020). *Laporan Kejadian Bencana Provinsi Bali 2010-2019*.

Sinarta, I. N., Rifa'i, A., Fathani, T., & Wilopo, W. (2017). Slope Stability Assessment Using Trigger Parameters and SINMAP Methods on Tamblingan-Buyan Ancient Mountain Area in Buleleng Regency, Bali. *Geosciences*, *7*, 110. https://doi.org/10.3390/geosciences7040110

Sinarta, I. N., Wahyuni, P., & Aryastana, P. (2021). Analysis of discharge and area of the debris flow based on geological structural and rainfall levels in the slopes of Mount Abang, Kintamani. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1098*, 022064. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/2/022064

Sinarta, I. N., & Wahyuni, P. I. (2022). Analisis Potensi Longsor Rombakan (Debris Flow) dengan Pemodelan Aliran di Lereng Gunung Abang, Kintamani, Bali. In *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 28, Issue 2). http://137.204.103.162/geoappl/dflowz/dflowz.htm

Sudani, P., & Patil, K. A. (2023). Evaluating the significance of saturation in shallow landslide failure: saturated–unsaturated soil perspective. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, *6*(4), 591–601. https://doi.org/10.1007/s41939-023-00175-8

Towhata, I. (2022). Earthquake-Induced Landslides and Related Problems. In G. and X. Q. and M. C. Towhata Ikuo and Wang (Ed.), *Coseismic Landslides: Phenomena, Long-Term Effects and Mitigation* (pp. 303–482). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6597-5_11

PENANGANAN LONSORAN BADAN JALAN PADA RUAS ENAROTALI – WAGHETE (STA 8 + 845)

Mamik Wantoro, ST., MT[1]

[1] *Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Universita Yapis Papua*
Jl. Dr. Sam Ratulangi No. 11 Dok V Atas, Tlp (0967)534012, 550355, Jayapura
[1*]*mam_wanto@yahoo.co.id*

ABSTRAK

Penelitian ini berisi tentang stabilitas tanah dan penanggulangan pada ruas jalan enarotali – waghete STA 8 + 845 Propinsi Papua Pegunungan, Kabupaten Enarotali. Bentang alam pada ruas jalan enarotali - waghete merupakan daerah topografi punggungan yang curam sehingga sangat berpotensi longsor. Jalan ini merupakan jalan nasional yang menghubungkan antara kota Paniai – Waghete dan termasuk jalan kelas I yang dibangun untuk menghubungkan antar kabupaten, sehingga sangat menunjang pertumbuhan ekonomi di daerah Paniai dan sekitarnya. Jalan ini melintasi perbukitan yang mengandung lapisan lempung pasiran yang berwarna coklat dan bersifat sangat lepas. Longsoran yang terjadi di badan jalan pada ruas enarotali – waghete sejumlah 9 titik longsoran di tahun 2023. Penelitian ini menganalisa nilai faktor keamanan pada badan jalan yang telah mengalami longsor yang dikarenakan telah terjadi pergerakan tanah pada lerengnya yang mengakibatkan tidak stabilnya lereng tersebut. Untuk perhitungan stabilitas lereng dianalisa secara manual dengan menggunakan metode Bishop. Dari hasil analisa dan perhitungan diketahui bahwa bidang gelincir yang terjadi pada kedalaman -9,0 m dari permukaan jalan. Untuk menangani hal tersebut dicoba alternatif penanganan berupa perkuatan dengan bore pile dengan jarak 2 m dan 2.75 m terhadap arah melintang sehingga memotong bidang gelincir sepanjang badan jalan yang longsor dan dikombinasikan dengan perkuatan dinding kantilever. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan longsoran berupa bored pile dengan diameter 0.4 m yang diletakkan pada bagian depan, belakang pada daerah yang mengalami lonsoran dengan kedalaman 6 m yang dikombinasikan dengan dinding kantilever setinggi 1.5m dengan ketebalan 0.3 m adalah penanganan yang memiliki peningkatan nilai faktor keamanan sangat besar, dimana faktor keamanan dari kondisi eksisting yang semula sebesar 0.875 menjadi factor keamanan stabilitas terhadap geser 2.164, stabilitas terhadap guling 3.551 dan stabilitas terhadap daya dukung 3.175.
Kata kunci : longsoran, stabilitas lereng, metode Bishop, dinding kantilever, bored pile.

ABSTRACT

This research contains soil stability and countermeasures on the Enarotali – Waghete STA 8 + 845 Papua Mountains Province, Enarotali Regency. The landscape on the Enarotali - Waghete road section is an area of steep ridge topography so it has the potential for landslides. This road is a national road that connects the cities of Paniai - Waghete and is a class I road built to connect between districts, so it really supports economic growth in the Paniai area and its surroundings. This road crosses hills which contain layers of brown sandy clay and are very loose. There were 9 landslides that occurred on the road body on the Enarotali - Waghete section in 2023. This research analyzes the value of the safety factor on the road body that has experienced a landslide due to land movement on the slope which resulted in the slope being unstable. To calculate slope stability, it was analyzed manually using the Bishop method. From the results of analysis and calculations it is known that the slip area occurred at a depth of -9.0 m from the road surface. To deal with this, an alternative treatment was tried in the form of strengthening with bore piles at a distance of 2 m and 2.75 m in the transverse direction so as to cut the slip area along the collapsed road body and combined with cantilever wall reinforcement. The results of the analysis show that strengthening the landslide in the form of bored piles with a diameter of 0.4 m placed at the front and back of the area that experienced the landslide with a depth of 6 m combined with a cantilever wall 1.5 m high with a thickness of 0.3 m is a treatment that has greatly increased the value of the safety factor. large, where the safety factor from the existing condition which was originally 0.875 became a safety factor for stability against sliding of 2.164, stability against overturning of 3.551 and stability for bearing capacity of 3.175.
Keywords: landslides, slope stability, Bishop method, cantilever walls, bored pile

1. PENDAHULUAN

Longsor merupakan salah satu bencana alam yang umumnya terjadi di wilayah pegunungan atau daerah perbukitan, terutama disaat musim hujan sehingga dapat mengakibatkan kerugian harta benda maupun korban jiwa. Peristiwa longsor dikenal sebagai gerakan massa tanah, batuan atau kombinasi yang sering terjadi pada lereng-lereng alam atau buatan. Longsor terjadi karena proses alami dalam perubahan struktur muka bumi, yakni adanya gangguan kestabilan pada tanah atau batuan penyusun lereng. Meskipun longsor merupakan gejala fisik alami, namun beberapa hasil aktivitas manusia yang tidak terkendali dalam mengeksploitasi alam juga dapat menjadi faktor penyebab ketidak stabilan lereng yang dapat mengakibatkan terjadinya longsor. Disamping itu perubahan penggunaan lahan yang tidak

sesuai dapat mengakibatkan risiko rawan longsor seamakin besar. Beberapa faktor aktivitas manusia yang dapat menyebabkan tanah longsor antara lain pemotongan lereng/penggalian tebing, drainase, konstruksi bangunan dan kepadatan penduduk. Peristiwa tanah longsor (landslides) atau dikenal sebagai gerakan massa tanah (soil mass movement), batuan (rock) atau kombinasinya, type longsoran ada 6 yaitu runtuhan, jungkiran, gelinciran, gerakan lateral, aliran dan majemuk



Ruas jalan Enarotali - Waghete merupakan jalan nasional yang berada di kabupaten Waghete Propinsi Papua Pegunungan. Sebagian besar wilayah pada ruas jalan ini terdiri dari lereng yang curam, menciptakan tantangan ekstra dalam menjaga kestabilan lereng. Daerah ini menampilkan perbedaan ketinggian yang signifikan, dari puncak pegunungan hingga lembah yang dalam. Variasi ini dapat memengaruhi distribusi tekanan tanah dan memperumit perencanaan dimensi dinding penahan tanah. Tipe tanah yang beragam mulai dari lempung hingga tanah berbatu, menambah tingkat kompleksitas dalam menentukan dimensi dinding penahan tanah yang optimal. Salah satu titik pada ruas jalan Enarotali – Waghete STA 8 + 845 mengalami kelongsoran saat musim hujan seperti yang terlihat pada Gambar disamping.

Problem longsoran yang mengganggu jalan nasional ruas Enarotali – Waghete di Provinsi Papua Pegunungan sudah berlangsung sejak tahun 2022. Lokasi longsoran tepatnya berada di ruas jalan enarotali – waghete STA.8 + 845 dari Paniai. Jenis longsorannya adalah gelinciran (rotasi) dengan lereng sedang sampai curam 30° - 60° , tata guna lahan di bagian atas merupakan hutan dengan aneka pohon heterogen. Panjang Longsor adalah 10 meter membentang dari barat dengan ketinggian lereng bawah 4 meter dan di tengah mencapai 10 meter. Mengingat prasarana tersebut cukup vital, sehingga diperlukan penanggulangan dengan tepat, cepat, dan ekonomis untuk menanggulangi kerugian-kerugian dalam pemanfaatan prasarana tersebut untuk masyarakat. Berdasarkan pertimbangan diatas, maka penulis melakukan analisis Penanganan Longsoran Pada Ruas Jalan Enarotali – Waghete STA 8 + 845. Sehingga hasil penelitian ini akan dapat memberikan rekomendasi jenis penanganan yang tepat dengan mempertimbangkan kondisi aktual dilapangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tanah

Tanah adalah lapisan permukaan bumi yang berasal dari material induk yang telah mengalami proses lanjut, karena perubahan alami di bawah pengaruh air, udara, dan macam-macam organisme baik yang masih hidup maupun yang telah mati. Tanah berasal dari pelapukan batuan yang prosesnya dapat secara fisik atau kimia. Sifat-sifat Teknik tanah dipengaruhi oleh sifat dari induk batuannya dan juga dipengaruhi oleh unsur-unsur luar yang menjadi penyebab terjadinya pelapukan batuan tersebut. Beberapa partikel yang terkandung di tanah antara lain yaitu :

a. Berangkal (boulders), merupakan potongan batu yang besar, biasanya lebih besar dari 250 mm sampai 300 mm. untuk kisaran antara 150 mm sampai 250 mm, fragmen batuan ini disebut kerakal (cobbles).
b. Kerikil (gravel), partikel yang batuan yang berkurang 5 mm sampai 150 mm.
c. Pasir (sand), partikel batuan yang berukuran 0,074 mm sampai 5 mm, berkisar dari kasar (3-5 mm) sampai halus (kurang dari 1 mm).
d. Lanau (silt), partikel batuan yang berukuran dari 0,002 mm sampai 0,074 mm. lanau dan lempung dalam jumlah besar ditemukan dalam deposit yang disedimentasikan ke dalam danau atau di dekat garis Pantai pada muara Sungai.
e. Lempung (clay), partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. partikel – partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi pada tanah yang kohesif.
f. Koloid (colloids), partikel mineral yang diam yang berukuran lebih kecil dari 0,001 mm.

Klasifikasi Tanah Longsor

Gerakan tanah (mass movement) adalah gerakan perpindahan atau gerakan lereng dari bagian atas atau perpindahan massa tanah maupun batu pada arah tegak, mendatar atau miring dari kedudukan semula. Longsoran merupakan bagian dari gerakan tanah. Tanah longsor yang disesuaikan dengan dasar klasifikasi yang dipergunakan masing-masing ahli, berikut ini dijelaskan nama- nama kelas gerakan tanah yang umum dipakai (Ritter, 1986).

1. Tanah longsor tipe jatuhan (fals)
2. Tanah longsor tipe robohan (toples)
3. Tanah longsor tipe gelincir (slides)

4. Tanah longsor tipe aliran (flows)
5. Tanah longsor tipe rayapan (creep)

Analisis Stabilitas Lereng

Pada umumnya suatu lereng dapat dikatakan stabil apabila faktor keamanannya lebih besar dari pada satu. Kestabilan lereng tergantung dari kekuatan geser tanahnya. Pergeseran tanahnya terjadi karena adanya gerakan relatif antara butir-butir tanah. Oleh karena itu, kuat geser tanah tergantung pada gaya yang bekerja antara butir butirnya. Tanah yang padat dengan susunan butir seperti pembagian ukuran butir interlocking dan besarnya kontak antara butir, lebih besar kekuatan gesernya dari tanah yang lepas (Braja M. Das.,1993). Lereng dapat terjadi secara alami maupun sengaja dibuat oleh manusia dengan tujuan tertentu (Bowles, 1984). Menurut SNI 8460 (2017), lereng terbagi menjadi beberapa jenis, diantaranya adalah:

1. Lereng alam
   Lereng alam terbentuk akibat kegiatan alam (erosi, gerakan tektonik, dan sebagainya).
2. Lereng galian
   Lereng galian terbentuk akibat kegiatan penggalian atau pemotongan pada tanah asli.
3. Lereng timbunan (embankment)
   Lereng timbunan umumnya digunakan untuk badan jalan raya, jalan kereta api, dan bendungan tanah.

Stabilitas sebuah longsoran dapat diselidiki dari faktor keamanannya yaitu perbandingan antara gaya yang menahan massa tanah pada lereng dibandingkan dengan gaya yang akan menggerakannya (Cornforth, 2005). Untuk mendapatkan nilai faktor keamanan, dapat dilakukan pemodelan longsoran menjadi bidang dua dimensi yang terbagi menjadi banyak pias yang kesetimbangannya masing-masing dijaga oleh gaya dalam pada tiap pias. Cara ini disebut metode Irisan, dan faktor keamanan dihitung secara kumulatif dari faktor keamanan masing masing pias.
Nilai-nilai faktor keamanan (FK) atau safety factor (SF) untuk menilai kestabilan suatu lereng menurut Joseph E. Bowles (1984) sebagai berikut:

SF < 1,07 : Keruntuhan biasa terjadi (labil)
1,07 < SF < 1,25 : Keruntuhan pernah terjadi (kritis)
SF ≥ 1,25 : Keruntuhan jarang terjadi (stabil)

Dalam menganalisa stabilitas lereng harus ditentukan terlebih dahulu faktor keamanan (FK) dari lereng tersebut. Secara umum faktor keamanan didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya penahan dan gaya penggerak longsoran

$$Fk = \frac{\text{Gaya Penahan}}{\text{Gaya Penggerak}}$$

Metode Irisan (Method Bishop)

Analisa stabilitas dengan menggunakan metode irisan, dapat dijelaskan dengan menggunakan gambar 1. Dengan AC merupakan lengkung lingkaran sebagai permukaan bidang longsor percobaan. Tanah yang berada di atas bidang longsor percobaan dibagi dalam beberapa irisan tegak. Lebar tiap-tiap irisan tidak harus sama. Perhatikan satu satuan tebal tegak lurus irisan melintang talud, gaya-gaya yang bekerja pada irisan tertentu (irisan no n) ditunjukkan dalam gambar. W_n adalah berat irisan. Gaya-gaya N_r dan T_r adalah komponen tegak dan sejajar dari reaksi R. P_n dan P_{n+1} adalah gaya normal yang bekerja pada sisi-sisi irisan. Demikian juga, gaya geser yang bekerja pada sisi irisan adalah T_n dan T_{n+1}. Untuk memudahkan, tegangan air pori dianggap sama dengan nol. Gaya P_n, P_{n+1}, T_n, dan T_{n+1} adalah sulit ditentukan. Tetapi, kita dapat membuat asumsi perkiraan bahwa resultan P_n dan T_n adalah sama besar dengan resultan P_{n+1} dan T_{n+1}, dan juga garis-garis kerjanya segaris. Untuk pengamatan keseimbangan

Gaya geser perlawanan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$T_r = \tau_d(\Delta L) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{F_s} = \frac{1}{F_s}[c + \sigma \tan \emptyset]\Delta L_n$$

Tegangan normal σ dalam persamaan diatas adalah :

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \propto_n}{\Delta L_n}$$

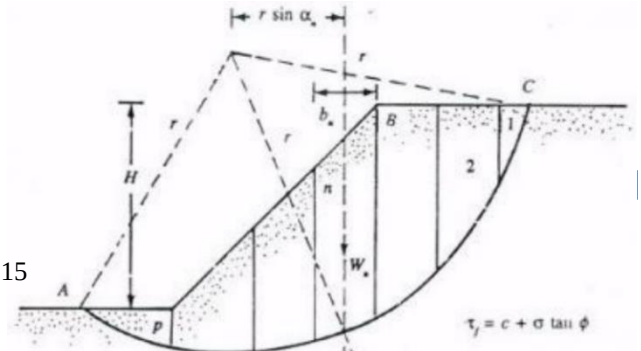
Untuk keseimbangan blok percobaan ABC, momen gaya dorong terhadap titik O adalah sama dengan momen gaya perlawanan terhadap titik O, atau

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \propto_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{F_s}\left(c + \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \emptyset\right)(\Delta L_n)(r)$$

atau

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p}(c\ \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \emptyset)}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

Catatan :



Gambar 1. Gaya – Gaya yang bekerja pada bidang irisan

Teknik Penanganan

Beberapa teknik penangan lonsoran dapat ditempuh dengan mengubah geometrik lereng, mengendalikan air permukaan, mengendalikan air rembesan, penambatan (bronjong, bor pile, tiang pancang) dan Teknik penguatan tanah. Dari beberapa cara penanggulangan longsoran tersebut namun yang akan digunakan adalah bored pile di kombinasikan dengan dinding kantilever. Bore pile adalah pondasi dalam yang dicor di tempat, yang dibangun dalam sebuah lubang yang telah distabilisasi supaya peletakan tulangan baja dan cor beton dapat terkontrol. Diameternya yang besar memberikan tahanan yang baik terhadap penggeseran dan penggulingan (US Department of Transportation, 2010). Pada suatu barisan bored pile yang ditanamkan ke dalam tanah sampai pada kedalaman tanah keras, dapat terbentuk soil arching effect, yaitu perpindahan tegangan dari tanah di depan (upslope) barisan bored pile menuju tanah di belakang (downslope) bored pile, karena tanah berusaha bergerak melalui sela-sela antar bored pile yang kaku (Liang dan Zeng, 2002). Perencanaan bored pile sebaiknya memperhitungkan soil arching effect untuk desain yang optimal.

Bore Pile

Pondasi Tiang terdiri dari berbagai macam konstruksi, sering digunakan sebagai salah satu metode dinding penahan tanah sementara atau permanen yang efisien. Bore Pile dengan diameter yang kecil maupun dapat digunakan sebagai dinding penahan tanah yang ekonomis. Sedangkan pemakaian tiang pancang untuk konstruksi yang sama, lebih mahal bila dibandingkan dengan Bore Pile, akan tetapi kontrol terhadap kekuatan strukturnya lebih baik. Konstruksi ini sangat cocok dan memenuhi syarat untuk digunakan pada basement yang dalam, struktur bawah tanah serta pada konstruksi jalan pada lereng perbukitan. Pondasi bore pile ini dapat membantu untuk mencegah kelongsoran dan membantu pergerakan tanah pada lereng akibat adanya tekanan lateral tanah serta penambahan beban lalu lintas yang terjadi. Beban ultimate yang dapat ditanggung oleh sebuah bore pile sama dengan jumlah tahanan dasar dan tahanan cerobong (shaft resistance). Tahanan ujung merupakan hasil kali luas dasar (A_b) dan daya dukung ultimate (q_f) pada elevasi dasar lorong. Tahanan Gesek adalah hasil kali luas keliling cerobong (A_s) dan nilai rata-rata tahanan geser ultimate tiap satuan luas (fs) yang lazim disebut ‘friksi kulit’ (skin friction) antara bored pile dan tanah. Berat tanah yang dipindahkan atau disingkirkan biasanya diasumsikan sama dengan berat bore pile. Pilihan dari masing-masing tipe tiang tersebut diatas tergantung dari jenis tanah (granular atau kohesif, lunak atau keras), profil muka air tanah, tinggi tanah maksimum yang ditahan, waktu konstruksi yang tersedia,biaya dan umur rencana.

Analisa Daya Dukung Tanah (Bearing Capasity)

Metode Skempton Kemampuan tanah untuk mendukung beban baik dari beban diatas atau pondasinya agar tidak terjadi kerunuhan geser.

Daya dukung bored pile tunggal

$Q_{ult} = Q_b + Q_s = (\mu.A_b.N_c.cb) + (\Sigma\ 0{,}45.c.As)$ (Sumber : Hardiyatmo Hary Chistady, 1997)

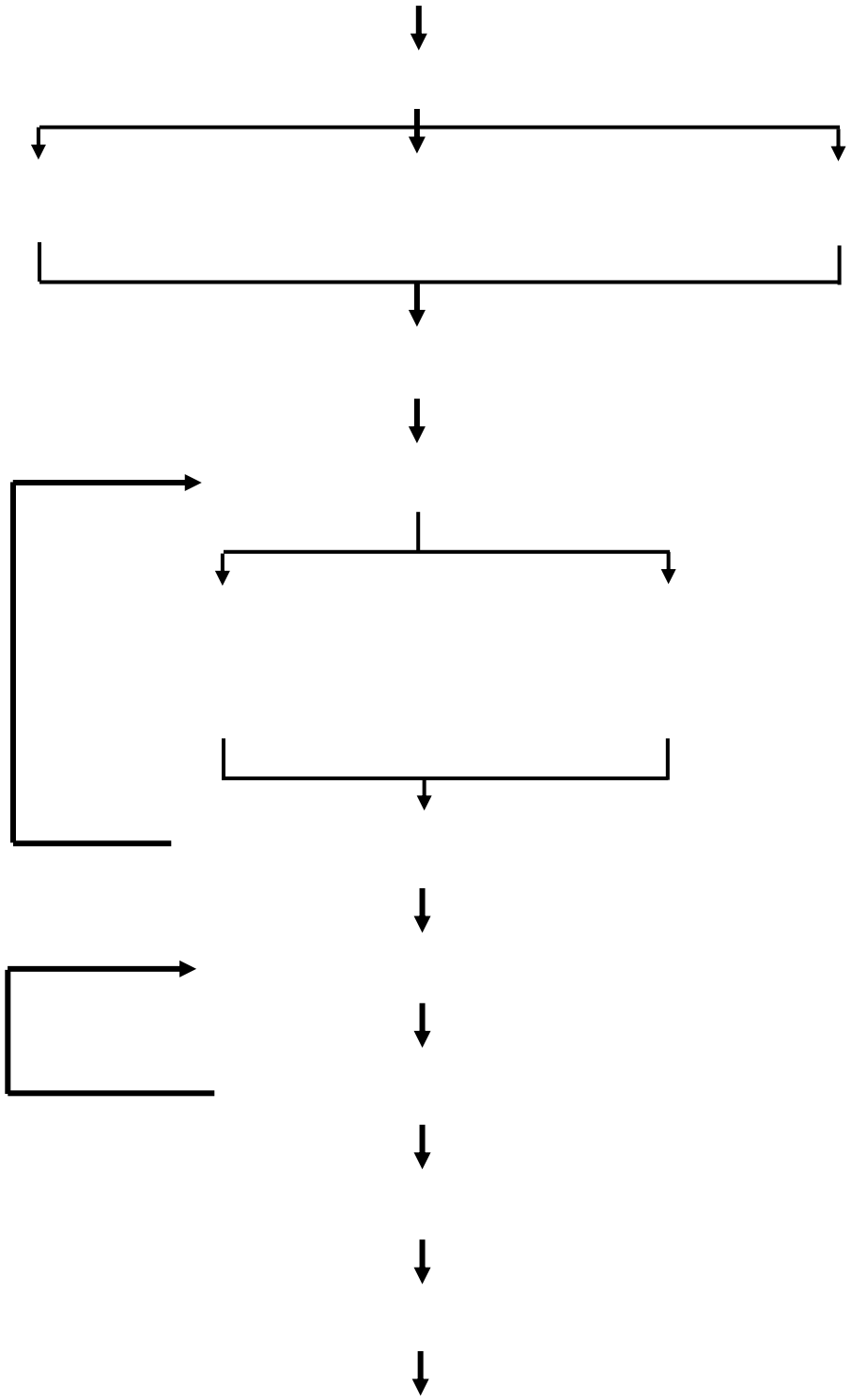
Dimana:

- Q_{ult} = Daya Dukung Tiang Maksimum (ultimate) pada bored pile
- Q_b = Tahanan ujung ultimit (kN)
- Qs = Tahanan gesek ultimit (kN)
- A_b = Luas Penampang tiang (m²)
- μ = faktor koreksi, dengan $\mu = 0{,}8$ untuk $d < 1$ $\mu =$ 0,75 untuk d
- Nc = Faktor kapasitas dukung menurut Skempton = 9
- Cb = Kohesi tanah di bawah ujung tiang

3. METODE PENELITIAN

Jurnal ini membahas mengenai desain dan analisis stabilitas lereng untuk menanggulangi longsoran yang terjadi di ruas jalan Enarotali – Waghete pada STA 8 + 845. Secara umum prosedur perancangan dan analisis secara sederhana ditunjukkan dengaan bagan alir seperti pada Gambar 2.



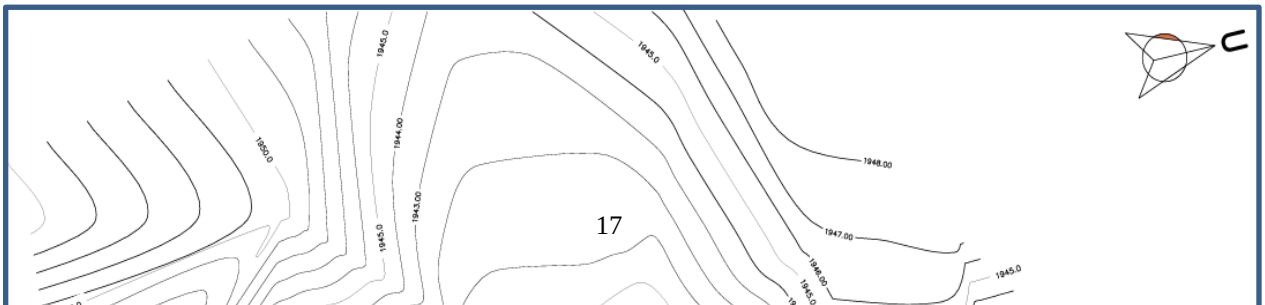


Gambar 2 Bagan Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHAS

Survei topografi

Survei topografi dilakukan menggambarkan situasi dilapangan pada peta. Pemetaan situasi meliputi pengukuran kerangka horizontal dan kerangka vertikal. Kerangka horizontal menggunakan metode polygon sedangkan kerangka vertikal menggunakan metode tacheometry. Hasil survey topografi seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pengukuran Toporafi

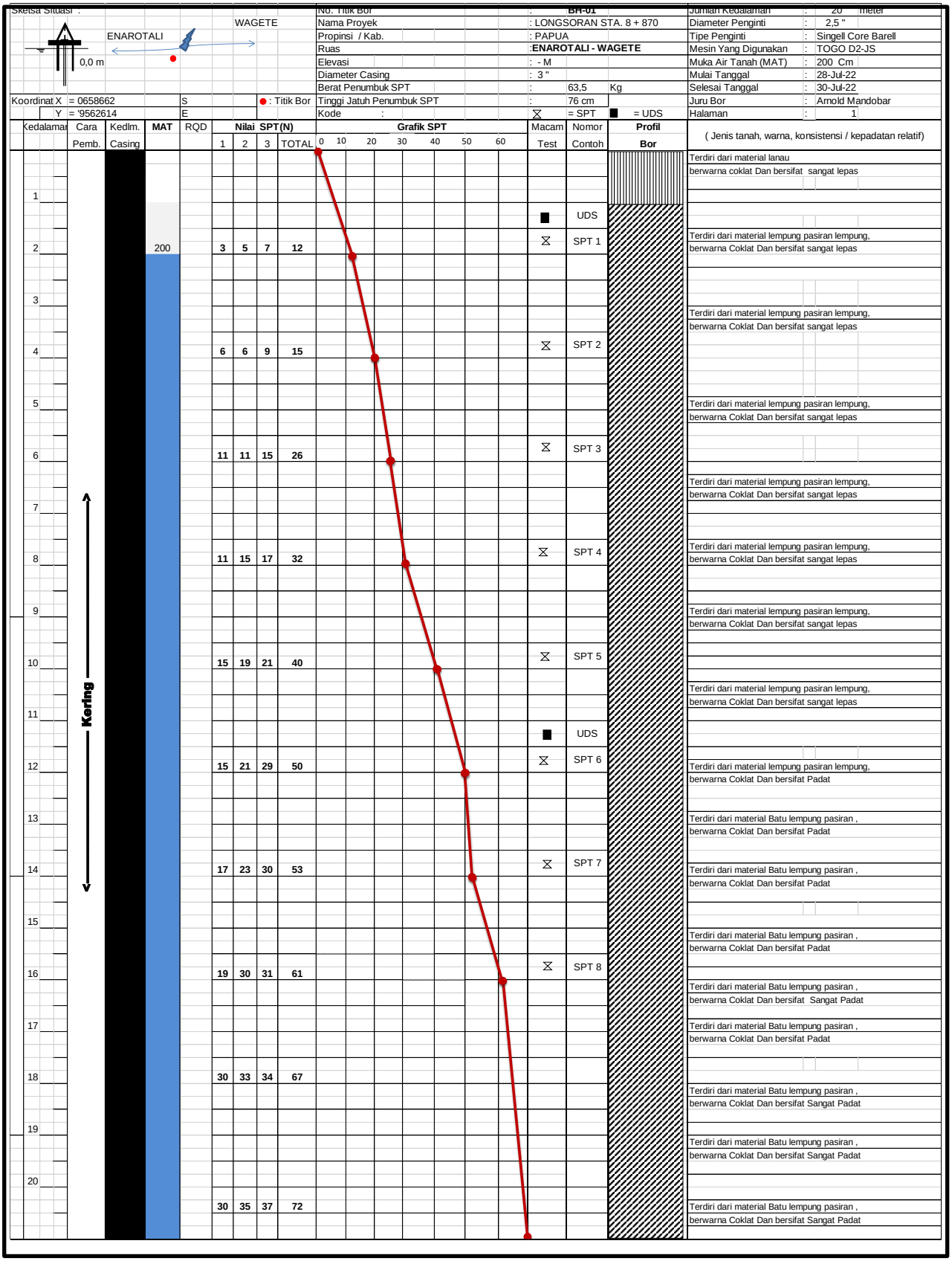
Pengujian Karateristik Tanah

Parameter tanah yang digunakan pada penelitian ini berasal dari data bor log dan hasil uji laboratorium dengan data parameter tanah dapat dilihat pada Tabel 1, data hasil pengeboran BH. 01 dapat dilihat pada Lampiran 1, Tabel 2 (a) (b) terdapat urutan jenis lapisan tanah, kedalaman dan nilai N-SPT masing-masing lapisan tanah, data kohesi tanah dapat dilihat pada Tabel 3, dan pada Tabel 4 data modulus elastisitas tanah dan data poisson ratio tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Tanah

Jenis tanah, lapisan	Parameter Tanah							
	Kadar Air (Wc) %	Berat Jenis (SG)	Berat Isi Basah (γsat) gr/cm^3	Berat Isi Kering (γdry) gr/cm^3	Angka Pori (e)	Isi Pori (n) %	Sudut Geser θ	Kohesi (C) Kpa
Lempung pasiran berwarna coklat dan bersifat lepas	23.41	2.65	1.26	1.56	1.01	33.87	13	1.82

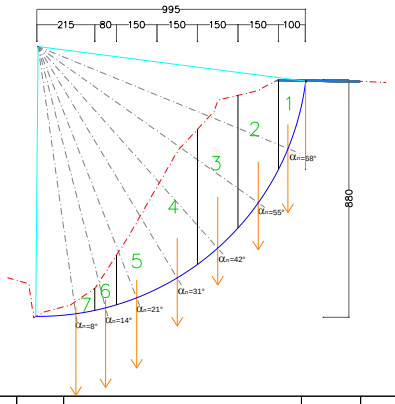
Tabel 2 . Hasil Pengeboran BH.01



1													UDS		Terdiri dari material lanau berwarna coklat Dan bersifat sangat lepas
2			200		3	5	7	12				SPT 1			Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat sangat lepas
3															Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat sangat lepas
4					6	6	9	15				SPT 2			
5															Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat sangat lepas
6					11	11	15	26				SPT 3			
7															Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat sangat lepas
8					11	15	17	32				SPT 4			Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat sangat lepas
9															Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat sangat lepas
10					15	19	21	40				SPT 5			
11															Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat sangat lepas
12					15	21	29	50				SPT 6	UDS		Terdiri dari material lempung pasiran lempung, berwarna Coklat Dan bersifat Padat
13															Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Padat
14					17	23	30	53				SPT 7			Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Padat
15															Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Padat
16					19	30	31	61				SPT 8			Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Sangat Padat
17															Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Padat
18					30	33	34	67							Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Sangat Padat
19															Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Sangat Padat
20															
					30	35	37	72							Terdiri dari material Batu lempung pasiran , berwarna Coklat Dan bersifat Sangat Padat

Parameter Bore Pile

Tiang bore Pile yang digunakan dalam penelitian ini adalah tiang bore pile berbentuk lingkaran dengan diameter 0,40 m, jarak antar tiang 2,00 m, dengan menggunakan mutu beton K-350 dan penggunaan penulangan D 16.



Analisis Stabilitas Lereng Sebelum di Perkuat Dengan Bor Pile di Kombinasikan Dinding Kantilever

Pemodelan lereng diperlakukan seperti pada gambar dengan di Analisa menggunakan metode simplifiel Bishop,s.

Tabel. 2 Analisa Stabilitas Lereng Sebelum Perkuatan

Sline No	A_n	γ (kN/m^3)	W_n	α_n	sin (α_n)	cos (α_n)	b_n	W_n sin (α_n)	c' (kPa)	Φ	tan (Φ)	A = c' b_n + W_n tan (Φ)	Fs	B = (Cos α_n + (sin αn * tan Φ))/Fs	A/B	FS
1	1.66	15.60	25.90	68	0.927	0.375	1.00	24.010	18.20	13.00	0.231	24.179	0.88	0.619	39.045	
2	6.17	15.60	96.29	55	0.819	0.574	1.50	78.877	18.20	13.00	0.231	49.531	0.88	0.790	62.720	
3	7.40	15.60	115.36	42	0.669	0.743	1.50	77.192	18.20	13.00	0.231	53.933	0.88	0.920	58.643	
4	6.56	15.60	102.26	31	0.515	0.857	1.50	52.667	18.20	13.00	0.231	50.908	0.88	0.993	51.264	0.875
5	1.07	15.60	16.72	21	0.358	0.934	1.50	5.993	18.20	13.00	0.231	31.161	0.88	1.028	30.308	
6	4.23	15.60	65.99	14	0.242	0.970	0.80	15.964	18.20	13.00	0.231	29.795	0.88	1.034	28.811	
7	0.89	15.60	13.92	8	0.139	0.990	2.15	1.937	18.20	13.00	0.231	42.343	0.88	1.027	41.231	
kendaraan			100.00	90	1.000	0.000		100.000								
	Jumlah							**356.64**							**312.02**	

Analisis Stabilitas Lereng Perkuatan dengan Bore Pile di Kombinasikan Dinding Kantilever

Pemodelan lereng diperlakukan seperti pada gambar 3 dengan galian tanah sedalam 1.5 meter. Simulasi model dilakukan dengan menambahkan bore pile sedalam ± 6 meter, menggunakan mutu beton K350 (f'c = 30 MPa) dengan jarak antar tiang 2 m dengan diameter 0,40 m dan dinding kantilever dengan tebal beton 0,3 m.

Parameter yang digunakan sebagai berikut :

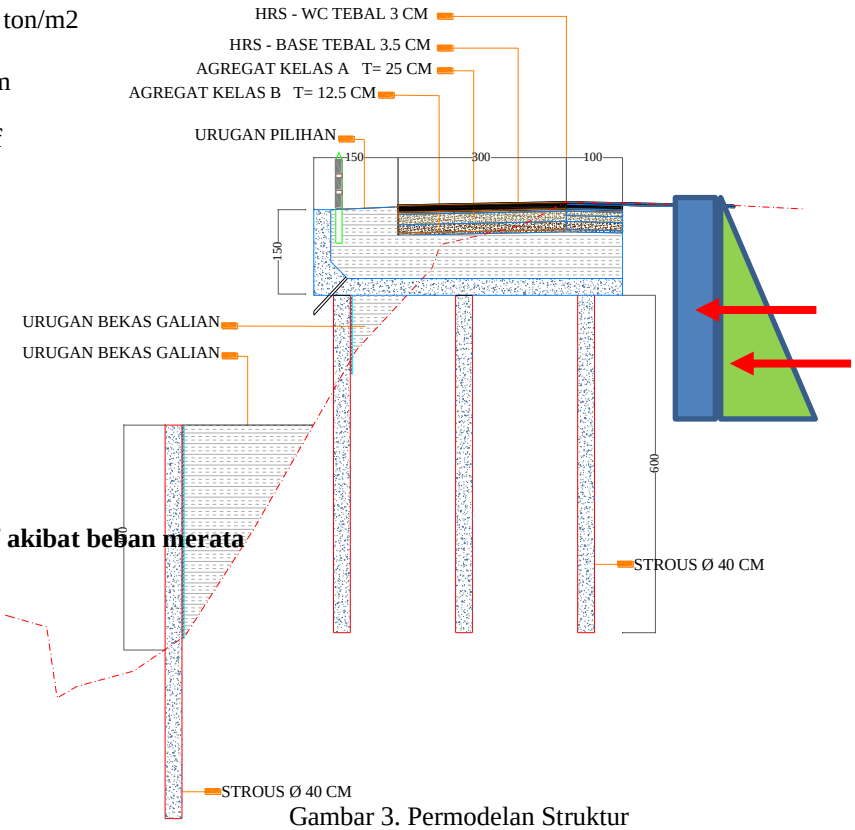
Berat Volume (γ) = 1.56 ton/m3
Kohesi (C) = 1.82 ton/m2
Sudut geser (Φ) = 13
Tinggiakibat tekanan tanah = 3.5 m

Perhitungan Tekanan Tanah Aktif

Ka = tan2 (450-Φ/2)
Ka = tan 45 – 13/2)
Ka = 0.63
Tekanan Tanah Aktif
Pa = 0.5 x γ x H2 x Ka
Pa = 0.5 x 1.56 x 7.52 x 0.63
Pa = 6.046 ton
Momen Aktif
Ma = 1/3 x Pa X H
Ma = 1/3 x 6.046 x 3.5
Ma = 7.053 tonm

Perhitungan Tekanan Tanah Aktif akibat beban merata

Q = 4 x 0.3 x 2.4 = 2.6 ton/m
Ka = tan 45 – 13/2)
Tekanan Tanah Aktif
Pa = q x H x Ka
Pa = 2.6 x 3.5 x 0.63
Pa = 1.64 ton
Momen Aktif
Ma = 1/2 x Pa X H
Ma = 1/2 x 1.640 x 3.5
Ma = 0.823 tonm



Gambar 3. Permodelan Struktur

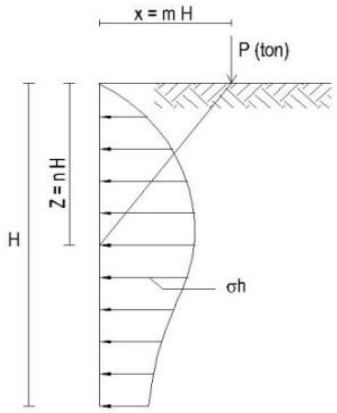
Tekanan Tanah Aktif Akibat Beban Kendaraan (P = 10 ton)

Maka tekanan tanah lateral akibat beban titik dapat di tulis dengan persamaan sebagai berikut

$$\sigma h = \frac{1.77\ P}{H^2}$$

$$\sigma h = \frac{1.77\ x\ 10}{3.5^2}$$

$$\sigma h = 1.45\ ton$$



Tekanan Tanah Akibat Beban Mobil

$P_a = \sigma_h$ x H

P_a = 1.45 x 3.5

P_a = 5.057 ton

Momen Aktif

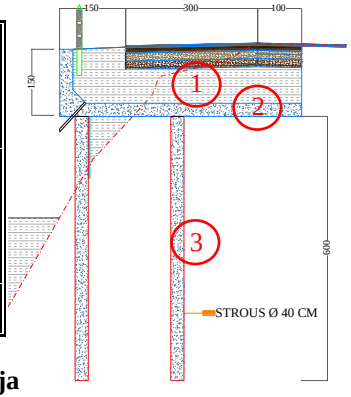
M_a = 1/2 x σ_h x H

M_a = 1/2 x 5.057 x 3.5

M_a = 8.85 tonm

Tabel 3 Menghitung Berat Sendiri Yang bekerja dan Momen Yang Bekerja

Bidang	L	H	Luas	γ (ton/m^3)	Berat per satuan Panjang	Jarak Momen Terhadap Titik A	Momen
1	5.2	1.2	6.24	1.8	11.23	2.60	29.20
2	5.5	0.3	1.65	2.4	3.96	2.60	10.30
3	0.4	6	1.51	2.4	7.23	2.75	19.90
Jumlah					22.42656		59.39



Kontrol kekuatan Bor pile Terhadap Tekanan Horisontal Beban Yang Bekerja

Momen akibat Beban (M_n) = 16, 725 tm

Diameter bore pile = 40 cm

Mutu beton = 30 Mpa

Digunakan tulangan 11 D 16 = 2210.56 mm2

$$a = \frac{\varnothing x\ fy\ x\ As}{0.85\ x\ Fc\ x\ b} = 55.48\ mm$$

Jd = d – 0.5 x a

Jd = 400 – (0.5 x 55.48) = 372.260 mm

Mn = ∅ x Fy x As x Jd

Mn = 0.8 x 3200 x 2210.56 x 372.260

Mn = 191511800.6 Nmm = 19.15 tm

Mn untuk 2 bor pile = 38.302 tm > 16.725 tm (maka tiang bore pile mampu menahan momen yang bekerja)

Jadi Kemampuan bor pile menahan terhadap gaya geser sebesar 38.302/3 = 12.76 ton

Analisis stabilitas lereng setelah ada perkuatan dinding kantilever dan bor pile

Stabilitas terhadap guling

$$Sf = \frac{Momen\ Lawan}{Momen\ Guling}$$

$$Sf = \frac{59.394}{7.053+0.822+8.85} = 3.55$$

Stabilitas terhadap geser

$$Sf = \frac{\Sigma V\ tan\ \Phi + B.C + Pp}{Pa}$$

ΣV tan $\Phi + B.C + Pp$ = (22.426 tan 13^0) + (5 x 1.82) = 14.278

$$Sf = \frac{14.278 + 12.76}{6.045 + 1.64 + 5.057} = 2.16$$

Stabilitas terhadap daya dukung

N =20

A_b = 0.25 x 3.14 x 0.4^2 = 0.1256 m^2

A_s = 3.14 x 0.4 x 6 = 7.536 m^2
Q_u = Qb + Qs
Qu = (Ab x μ x Cb x Nc) + (As x 0.45 x Cu)
Qu = (0.1256 x 0.8 x 18.2 x 32) + (7.536 x 0.45 x 30)
Qu = 160.252 kN = 16.02 Ton jadi untuk 2 tiang qu = 32.04 ton

Daya Dukung plat lantai
Qu = (Ab x μ x Cb x Nc)
Qu = 1 x 0.75 x 18.2 x 12 = 162 kN = 16.2 ton

Daya dukung total = 32.04 + 16.2 = 48.02 ton

$$Sf = \frac{Daya\ Dukung}{Beban\ yang\ bekerja}$$

$$Sf = \frac{48.02}{11.232+3.96} = 3.18$$

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan data yang dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan yaitu, kondisi lokasi perencanaan berupa lereng berada jalan ruas enarotali – waghete STA 8 + 845 dengan sudut kemiringan lereng 57^o dengan ketinggian 9.0 m, dengan hasil pengujian di laboratorium didapatkan nilai kadar air sebesar 23,41 %, bobot isi kering sebesar 12,60 KN/m3, serta bobot isi jenuh sebesar 15,60 KN/m3. Sudut geser dalam sebesar 13° dan kohesi sebesar 18,2 kN/m2. Dari Hasil analisis lereng dengan menggunakan metode Bishop didapat faktor keamanan untuk lereng aktual dalam kondisi lereng jenuh FK < 1.5 yaitu sebesar 0.875 sehingga kondisi tersebut sesuai dengan kondisi dilapangan sudah terjadinya runtuhan/longsoran. Untuk mengatasi longsor, digunakan bored pile dengan diameter 0,4 m, jarak as tiang 2 m, panjang tiang 6 m, mutu beton (f'c) 30 MPa, mutu baja (fy) 400 MPa, penulangan 11D16 dan di kombinasikan dengan dinding kantilever. Kenaikan faktor keamanan setelah bored pile dan dikombinasikan dengan dinding kantilever ditanamkan adalah sebagai berikut yang semula factor keamanan 0.875 menjadi 2.16 di tinjau dari stabilitas geser, 3.55 di tinjau dari stabilitas gulingnya dan 3.18dintau dari stabilitys daya dukungnya.

Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan di atas, maka penulis menyarankan untuk peneliti selanjutnya agar mengkaji ulang mengnalisis dengan metode elemen hingga dengan perangkat lunak komputer sehingga akan mereduksi nilai kohesi dan sudut geser dalam sampai mendapatkan bidang gelincir yang lebih tepat, hal ini akan memberikan hasil yang lebih baik daripada analisis menggunakan metode keseimbangan batas seperti metode Bishop.

PUSTAKA

Bowles, J. E. (1984). Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah), Edisi Kedua. Jakarta: Erlangga.
Das, B. M. (1993). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis). Jakarta: Erlangga.
Das, B. M. (2011). Principles of Foundation Engineering. USA: Stamford, CT Cengage Learning.
Standar Nasional Indonesia (SNI). SNI-8640:2017. Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik. (2017). Jakarta: Dewan Standarisasi Indonesia.
Kementrian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat. Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia. Pusat Pendidikan Dan Pelatihan Jalan Perumahan, Permukiman dan Pengembangan Infrstruktur Wilayah. Indonesia, 2012. Implementasi Penanganan Lereng Terhadap Bahaya Longsor

PEMANFAATAN KAPUR HIDUP YANG DI AKTIVASI DENGAN RESIN DAMAR DAN OKSIDA BESI UNTUK MENSTABLISASI TANAH LUNAK

Parea R. Rangan[1], M. Tumpu[2] dan Mansyur[3]
[1]Program Studi Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia, Toraja, Indonesia
[2]Program Studi Magister Manajemen Bencana, Sekolah Pascasarjana, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia
[3]Program Studi Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Sembilanbelas November, Kolaka, Indonesia
pareausanrangan68@gmail.com

ABSTRACT

Hamparan tanah jelek cenderung tersebar di dataran rendah di wilayah konsentrasi aktivitas manusia yang strategis, sehingga berbagai bangunan / infrastruktur lebih banyak yang dibangun di posisi tanah jelek. Tanah distabilisasi kapur mati $Ca(OH)_2$ dan bahan pozzolan masih menyisakan prilaku negatif penyebab stabilitas menurun, antara lain reaksi alkali dari kapur berdampak pada pembubaran terbatas partikel liat tanah dan menurunkan kohesi pada argillite murni. Flokulasi dari kandungan silika bersifat pozzolanik dalam kapur dan flokulasi (terbentuknya gel CSH) oleh reaksi pengikatan antara silika dari bahan pozzolan dengan kalsium hidroksida dari hasil hidrasi kapur, membentuk struktur gradasi baru bersifat gembur. Jika rasio gel melampaui batas optimum maka stabilitas tanah kembali menurun. Jika kadar airnya mengering maka gel menyusut dan berubah menjadi kristal sehingga stabilitas tanah kembali menurun. Stabilisasi tanah dalam penelitian ini menggunakan kapur hidup (CaO) agar masuknya air (saat dilakukan proses stabilisasi) menimbulkan panas yang cukup untuk mengaktifkan resin damar yang telah dicampurkan pada kapur hidup. Resin damar memudahkan proses pertukaran ion, memberikan daya tahan terhadap pengaruh air, mencegah terjadinya pembubaran partikel liat tanah oleh alkali, memperkuat daya ikat antar partikel tanah. Oksida besi ditambahkan pada kapur dan resin damar, karena memiliki kapasitas tukar kation yang baik, bisa bereaksi dengan kalsium karbonat menjadi oksida besi karbonat, memiliki ion H^+ untuk mencegah terjadinya flokulasi larutan, sehingga struktur gradasi cenderung merapat. Komposisi ini bisa menghasilkan bahan konstruksi kualitas tinggi. Kapur hidup yang diaktivasi resin damar dan oksida besi akan diuji pada dua jenis tanah lunak, pertama pada tanah lempung berlanau, kedua pada tanah organik.

1. PENDAHULUAN

a. Latar Belakang

Tanah jelek di Indonesia kurang lebih 10% dari luas daratan yang terletak di berbagai daerah, sehingga beberapa bangunan/infrastruktur terpaksa diba-ngun pada lokasi tanah jelek [27]. Hamparan tanah jelek cenderung tersebar di dataran rendah di wilayah konsentrasi aktivitas manusia yang strategis, sehingga berbagai bangunan / infrastruktur lebih banyak yang dibangun di posisi tanah jelek. Usaha stabilisasi tanah dengan bahan stabilisator telah banyak dilakukan, baik yang telah diaplikasikan dalam pembangunan infrastruktur maupun hasil penelitian ilmiah yang belum teraplikasi.

Penelitian stabilisasi tanah lempung menggunakan alkali, teridentifikasi bahwa pengaruh cairan alkali pada sifat-sifat *argillite* menyebabkan *argillite* murni mengalami sedikit penurunan kohesi akibat pembubaran terbatas partikel liat-Nya [9]. Tanah lempung ekspansif di stabilisasi menggunakan variasi kadar kapur 2%, 4%, 6%, 8%,10% tanpa abu ampas tebu, kemudian ditambahkan abu ampas tebu dengan variasi 2,5%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, menghasilkan kepadatan maksimum pada kadar kapur 4%, kuat tekan bebas naik hingga kadar abu 10% atau proporsi CaO dan SiO_2, Al_2O_3 terbaik pada kadar abu 10%. Pada kadar abu yang lebih tinggi kapur yang ada sudah tidak cukup mampu mengikat silikat dan aluminat yang ada didalam abu. Bahwa reaksi pozzolanik akan terjadi bila ada air. Apabila tidak ada air, silikat dan aluminat didalam abu tidak berarti apapun sehingga proses stabilisasi tidak berjalan [14].

Pengaruh abu batubara dan kapur terhadap kembang susut tanah lempung pada kondisi basah optimum. Variasi campuran kapur 0% dan 5%, abu batubara 0%, 12%, 16% dan 20% dari berat kering tanah asli dengan masa perawatan 3 hari. Pada 5% kapur dan 0% abu batubara nilai tekanan pengembangan turun 75%, dan nilai pengembangan turun 91,95%. Pada 5% kapur dan 20% abu batubara nilai tekanan pengembangan meningkat 81,82% dibandingkan tanah asli. Peningkatan persentase abu batubara justru meningkatkan nilai pengembangan dan nilai tekanan pengembangan tanah [15].

Teridentifikasi adanya prilaku negatif kapur dan pozzolan yang perlu diperbaiki antara lain: Reaksi alkali dari kapur berdampak pada pembubaran terbatas partikel liat tanah, menurunkan kohesi pada *argillite* murni. Flokulasi dari kandungan silika bersifat pozzolanik dalam kapur dan flokulasi akibat terbentuknya gel CSH oleh reaksi pengikatan antara silika dari bahan pozzolan dengan kalsium hidroksida dari hasil hidrasi kapur membentuk gel yang gembur. Gel berfungsi binder, filler dan menjadi struktur gradasi baru, dapat meningkatkan stabilitas tanah. Namun jika rasio

volume gel melampaui batas optimum maka stabilitas tanah kembali menurun. Jika suatu saat kadar airnya mengering maka gel berubah menjadi kristal sehingga stabilitas tanah kembali menurun.

Mekanisme alam organik mengisya-ratkan bahwa kalsium karbonat ($CaCO_3$) dapat diupayakan menjadi bahan stabilisasi tanah yang memiliki nilai strategis. Stalaktit terbentuk dari pengendapan kalsium karbonat dan mineral lainnya pada larutan air bermineral. Batu gamping yang merupakan batuan karbonat dilarutkan oleh air yang mengandung karbon dioksida sehingga membentuk larutan kalsium bikarbonat [17]. Cadangan batu gamping di Indonesia yang sudah diketahui adalah sekitar 28,7 milyar ton, yang terbesar terdapat di provinsi Sumatera Barat, yaitu 23,23 milyar ton atau sekitar 81,02 % dari cadangan seluruh Indonesia [13].

Kapur adalah hasil pembakaran batu gamping. Diperlukan solusi alternatif untuk memperbaiki prilaku kapur dalam fungsi stabilisasi tanah lunak. Damar mengandung asam-asam resinol, resin, dan minyak atsiri, merupakan bahan dasar bagi cairan pelapis kertas supaya tinta tidak menyebar. Juga dimanfaatkan untuk campuran lak dan vernis, perekat pada penambal gigi, dan perekat plester.

Resin damar dapat memudahkan proses pertukaran ion, memberikan daya tahan terhadap pengaruh air, memperkuat daya ikat antar partikel tanah [11], sehingga dapat mencegah pembubaran partikel liat tanah oleh alkali. Getah damar atau kopal adalah salah satu komoditas ekspor Indonesia yang menguasai 80% pasar dunia [18]. Oksida besi memiliki kapasitas tukar kation yang baik, bisa bereaksi dengan kalsium karbonat menjadi oksida besi karbonat, memiliki ion H^+ [21]. Ion H^+ bisa menetralisir terjadinya flokulasi larutan. Oksida besi adalah salah satu senyawa oksida dari besi dengan rumus kimia Fe_2O_3, mempunyai sifat paramagnetik. Di Indonesia potensinya melimpah tetapi masih kurang mendapat perhatian sehingga banyak produk impor digunakan. Untuk memperbaiki prilaku kapur pada tanah, batu gamping $CaCO_3$ (*Lime Stone*) dijadikan kapur hidup sebagai bahan stabilisator, resin damar dan oksida besi sebagai aktivator pada kapur hidup.

b. Rumusan Masalah

Yang menjadi rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :
1) Bagaimana optimasi campuran bahan stabilisator (aktivasi oksida besi dan resin damar pada kapur hidup)?
2) Bagaimana prosentase kadar bahan stabilisator optimum dan lama perawatan optimum dalam stabilisasi tanah lunak?
3) Bagaimana pengaruh bahan stabilisator pada tanah lunak yang distabilisasi terhadap sifat mekanis, perbaikan karakteristik kimia dan mineralogi?

c. Tujuan Penelitian

1) Menentukan campuran bahan stabilisator (aktivasi oksida besi dan resin damar pada kapur hidup).
2) Menentukan prosentase kadar bahan stabilisator optimum dan lama perawatan optimum dalam stabilisasi tanah dengan cara *trial mix*, variasi masa perawatan dan perlakuan.
3) Menganalisis pengaruh bahan stabilisator pada tanah lunak yang distabilisasi terhadap sifat mekanis, perbaikan karakteristik kimia dan mineralogi.

d. Ruang Lingkup Penelitian

1) Jenis tanah yang digunakan adalah tanah lunak (lempung berlanau dan tanah organik).
2) Bahan stabilisator yang digunakan adalah kapur hidup (CaO) dengan bahan tambah resin damar dan oksida besi (Fe_2O_3).
3) Pengujian adalah uji fisis dan struktur mikro bahan, kuat tekan benda uji, struktur mikro benda uji, koefisien permeabilitas dengan *suction test*.

2. LANDASAN TEORI

a. Kapur Hidup

Kapur adalah batu gamping yang dipanaskan dengan suhu tertentu. Reaksi kimia kapur dapat ditulis dengan rumus sebagai berikut [26]:

$$Ca + CO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \quad (1)$$
$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + panas \quad (2)$$
$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (3)$$

Stabilisasi tanah dengan kapur dapat menggunakan kapur mati (*slake lime*) yaitu kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$), atau kapur hidup (*quick lime*) yaitu kalsium oksida (CaO). Kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) lebih sering digunakan, tetapi kalsium oksida (CaO) lebih efektif pada kasus-kasus tertentu, sedangkan kalsium karbonat ($CaCO_3$) kurang efektif sebagai bahan stabilisasi kecuali sebagai pengisi [16]. Kapur bila direaksikan dengan mineral lempung atau mineral

halus tanah dan dibasahi maka terjadi pertukaran ion, dan ion sodium yang berasal dari larutan alkali diserap oleh permukaan butiran halus tanah hingga permukaan butirannya kehilangan kekuatan tolak (*repulsion force*). Efeknya adalah meningkatkan sifat kohesif antar butiran dan kekuatan konsistensi tanah. Proses ini diikuti oleh flokulasi butiran-butiran halus tanah menjadi gumpalan-gumpalan butir kasar yang gembur, menambah batas plastis dan menurunkan batas cair. Efek keseluruhan adalah memperkecil indeks plastis. Reaksi kimia yang terjadi adalah [11]:

$$Na_2O.Al_2O_3.(SiO_2)4H_2O+CaO.H2O \rightarrow Na_2O.H_2O+CaO.Al_2O_3(SiO_2)4H_2O \quad (4)$$

$$Na_2O.H_2O+CaO.Al_2O_3(SiO_2)4H_2O \rightarrow Na_2O(SiO_2)+2SiO_2H_2O+CaO.Al_2O_3 \quad (5)$$

Reaksi *pozzolanic* menghasilkan kristal Ca(SiO3) yang mengikat antar butiran lempung serta butiran lempung dengan Ca(SiO3). Untuk mencapai kekuatan penuh proses *pozzolanisasi* membutuhkan waktu beberapa tahun. Reaksi yang terjadi [25]:

$$SiO_2+Ca(OH)_2+H_2O \rightarrow Ca(SiO_3)+2H_2O \quad (6)$$

meningkatkan kekakuan dan stabilitas tanah, mengurangi *Plasticity Index*.

b. Fungsi Aktivator Pada Proses Stabilisasi

Dalam proses stabilisasi tanah, aktivator berfungsi untuk mempermudah terjadinya reaksi kimia antara bahan stabilisator dan tanah pada saat proses stabilisasi, memiliki kemampuan untuk memperkuat daya kohesi antar partikel tanah oleh bahan stabilisator, juga dapat meningkatkan daya tahan terhadap pengaruh air dan zat kimia (asam, basa, pelarut organik). Stabilisasi tanah dengan kapur hidup membutuhkan aktivator yang dapat mempermudah terbentuknya persenyawaan untuk memperbaki prilaku kapur. Senyawa organik didefinisikan sebagai senyawa berbasis karbon, atau senyawa hidrokarbon dan turunannya, atau senyawa yang tersusun dari hidrogen dan karbon [28]. Senyawa anorganik cenderung lebih stabil pada pemanasan suhu tinggi, senyawa organik umumnya mudah terurai. Karena senyawa organik berbasis karbon, maka sebagian besar yang ada di alam adalah senyawa organik. Atom karbon memiliki enam elektron dengan konfigurasi $1s^2\ 2s^2\ 2p^2$. Empat elektron pada kulit terluar dapat membentuk empat ikatan kovalen dengan sesama atom karbon maupun dengan atom lain [28]. Kemampuan atom karbon membentuk ikatan kovalen memungkinkan terbentuknya beragam rantai karbon, hingga sangat dimungkinkan untuk membuat berbagai senyawa karbon.

c. Mineralogi Tanah Lunak

Tanah lunak adalah tanah berbutir halus yang mengandung unsur lempung. Mineral lempung memiliki 4 karakteristik, masing-masing sebagai berikut:

Kaolinite, terdiri dari kombinasi lapisan dasar satu lembar *silika* dan satu lembar *aluminium* yang diikat oleh *ion hydrogen. Kaolinite* menjadikan tanah stabil karena sifatnya yang kohesif mampu menahan masuknya molekul-molekul air. Tebal dari setiap lapisan dasar kurang lebih 7,2 µm (1 A = 10^{-10} m), rumus kimianya adalah [19]:

$$(OH)_8\ Al_4\ Si_4\ O_{10.} \quad (7)$$

Halloysite, hampir sama dengan *kaolinite*, tetapi strukturnya tertumpuk lebih acak, sehingga molekul air dapat masuk diantara satuan-satuan 7,2A, memberikan rumus kimia [19]:

$$(OH)8Al_4Si_4O_{10}.4H_2O. \quad (8)$$

Montmorillonite terdiri dari susunan lapisan *silika-aluminium-silika* yang dipisahkan oleh ion H_2O, sehingga mudah lepas dan sangat tidak stabil. Air mudah masuk ke sela antar lapisan menyebabkan mineral mengembang, dan saat air diantara lapisan mengering, mineral menyusut. Susunan kristalnya terdiri dari satuan dua lempeng *silika tetrahedral* mengapit satu lempeng *alumina octahedral*, sehingga disebut mineral 2 : 1. Tebal satu satuan susunan kristalnya adalah 9,6A. Rumus kimianya adalah [19]:

$$(OH)4Si_8(Al_{33}4Mg_{66})O_{20},\ (OH)4(Si_{73}4Al_{66})Fe_4O_{20}\ \&\ (OH)4(Si_{73}4Al_{66})Mg_6O_{20} \quad (9)$$

Illite, susunan lapisannya sama dengan *montmorillonite* tetapi ion pemisahnya adalah ion K^+ yang sifatnya mudah mengembang. Formasi struktur satuan kristalnya mirip dengan *montmorrilonite*. Tebal dan komposisi satu satuan kristalnya sama dengan *montmorrilonite*, perbedaannya adalah:

1) Terdapat kurang lebih dua puluh persen pergantian *silicon* (Si) oleh aluminum (Al) pada lempeng *tetrahedral*.
2) Antar satuan kristal terdapat *kalium* (K) yang berfungsi sebagai penyeimbang muatan dan pengikat antar satuan kristal.

3) Struktur mineralnya tidak mengem-bang sebagaimana *montmorrilonite*. Rumus umum kimia komposisi *illite* adalah [19]:

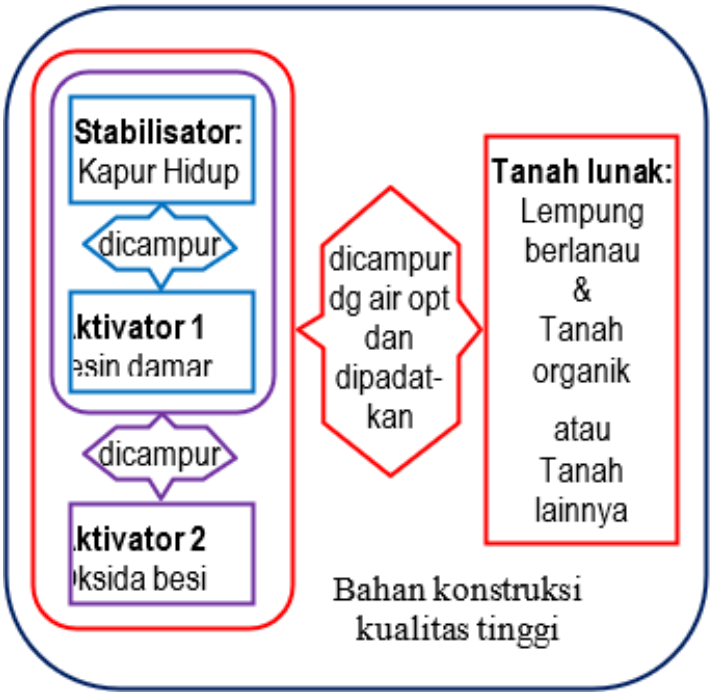
$$(OH)4Ky(Si_8\text{-}yAly)(Al_4Mg_6.Fe_4.Fe_6)O_{20}. \quad (10)$$

d. Kerangka Pikir Penelitian

Butiran tanah memiliki daya dukung yang tinggi dan ketahanan yang sangat baik, masalahnya adalah pada kadar air tertentu kehilangan sifat kohesinya. Oleh karena itu stabilisasi tanah dengan bahan kimia harus memandang reaksi-reaksi kimia sebagai fungsi penguatan gaya tarik antar butir dalam kondisi basah atau kering dan memiliki ketahanan terhadap reaksi kimia yang merusak. Upaya stabilisasi tanah dengan kapur dan pozzolan menghasilkan stabilitas yang baik, tetapi masih didapati prilaku negatif yang perlu diperbaiki antara lain reaksi alkali dari kapur berdampak pada pembubaran terbatas partikel liat tanah dan menurunkan kohesi pada *argillite* murni[9]. Flokulasi dari kandungan silika bersifat pozzolanik dalam kapur dan flokulasi akibat terbentuknya gel CSH oleh reaksi pengikatan antara silika dari bahan pozzolan dengan kalsium hidroksida dari hasil hidrasi kapur, membentuk struktur gradasi baru bersifat gembur [14].

Jika rasio volume gel melampaui batas optimum maka stabilitas tanah kembali menurun. Jika suatu saat kadar airnya mengering maka gel berubah menjadi kristal sehingga stabilitas tanah kembali menurun. Solusi yang dilakukan adalah menggunakan kapur hidup, agar dengan masuknya air saat dilakukan proses stabilisasi menimbulkan panas yang cukup untuk mengaktifkan resin damar yang telah tercampur dengan kapur hidup, dan pemuaian yang tinggi mampu menyelimuti butiran halus tanah untuk memperkuat daya kohesi tanah. Resin damar memudahkan proses pertukaran ion, memberikan daya tahan terhadap pengaruh air, mencegah terjadinya pembubaran partikel liat tanah oleh alkali, memperkuat daya ikat antar partikel tanah.

Oksida besi memiliki kapasitas tukar kation yang baik, bisa bereaksi dengan kalsium karbonat menjadi oksida besi karbonat, memiliki ion H^+ untuk menetralisir terjadinya flokulasi larutan sehingga struktur gradasi cenderung rapat (tidak porous), untuk memaksimalkan nilai stabilitas. Bahan stabilisator (kapur hidup aktivasi resin damar dan oksida besi) akan diuji pada dua jenis tanah lunak, pertama pada tanah lempung berlanau, kedua pada tanah organik. Karena itu dilakukan eksperimen stabilisasi tanah lunak sebagaimana pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema tanah stabilisasi kapur

3. METODOLOGI PENELITIAN

a. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian di Laboratorium Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Kristen Indonesia, Toraja, Indonesia. Waktu penelitian mengacu pada interval dan durasi yang telah ditetapkan berdasarkan standar pengujian yang

digunakan, dengan total waktu lebih kurang 60 hari kalender.

b. Rancangan Penelitian

1) Bahan yang dibutuhkan

Batu gamping ($CaCO_3$) ≥ 95% kalsit dan ≤ 5% dolomit sebanyak 50 kg, getah damar mata kucing 5 kg, oksida besi (Fe_2O_3) kemasan 5 kg dapat dibeli di toko bangunan, tanah lempung berlanau lebih kurang 100 kg, tanah organik lebih kurang 100 kg.

2) Peralatan Laboratorium

Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Diespersive Spectroscopy (EDS, The X-ray Diffraction (XRD), Cetakan benda uji, *Standard Proctor test, Hydrometer*, *Casagrande*, Mesin penekan untuk menguji kuat tekan.

3) Rancangan benda uji

Bahan stabilistor akan diuji pada 2 (dua) jenis tanah lunak (tanah lempung berlanau dan tanah organik) dalam 5 variasi campuran dengan 9 macam perlakuan, masing-masing dengan 5 buah benda uji sebagaimana pada Tabel 1. Benda uji berbentuk silinder diameter 50 mm, tinggi 100 mm, dirancang memiliki kepadatan dan kadar air sama dengan hasil pengujian pemada-tan *standar proctor* pada tanah asli.

Tabel 1. Rancangan pembuatan benda uji di laboratorium

a. Benda uji untuk stabilisasi tanah lempung berlanau

No.	Perb. berat		3 hr	7 hari		14 hari		21 hari		28 hari		Jum.
	Clay	S	TR	TR	R	TR	R	TR	R	TR	R	BU
1	100	0	5	5	0	5	0	5	0	5	0	25
2	100	15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
3	100	20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
4	100	25	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
5	100	30	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
Jumlah BU (buah)			25	25	20	25	20	25	20	25	20	205

b. Benda uji untuk stabilisasi tanah organik

No.	Perb. berat		3 hr	7 hari		14 hari		21 hari		28 hari		Jum.
	Clay	S	TR	TR	R	TR	R	TR	R	TR	R	BU
1	100	0	5	5	0	5	0	5	0	5	0	25
2	100	15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
3	100	20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
4	100	25	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
5	100	30	5	5	5	5	5	5	5	5	5	45
Jumlah BU (buah)			25	25	20	25	20	25	20	25	20	205

S = bahan stabilisator TR = tidak direndam BU = benda uji. R = direndam

4) Rancangan Pengujian

Pengujian bahan sebelum mendapat perlakuan (uji fisis dan struktur mikro), kemudian pengujian benda uji (uji mekanis dan struktur mikro). Rancangan pengujian sebagaimana Tabel 2.

Tabel 2. Rancangan pengujian laboratorium

No	Banah dan Benda uji	Pengujian karakteristik			
		Mekanis	Fisis	Mikrost	*Suction*
1	Batu gamping	-	-	1	-
2	Kapur Hidup	-	-	1	-

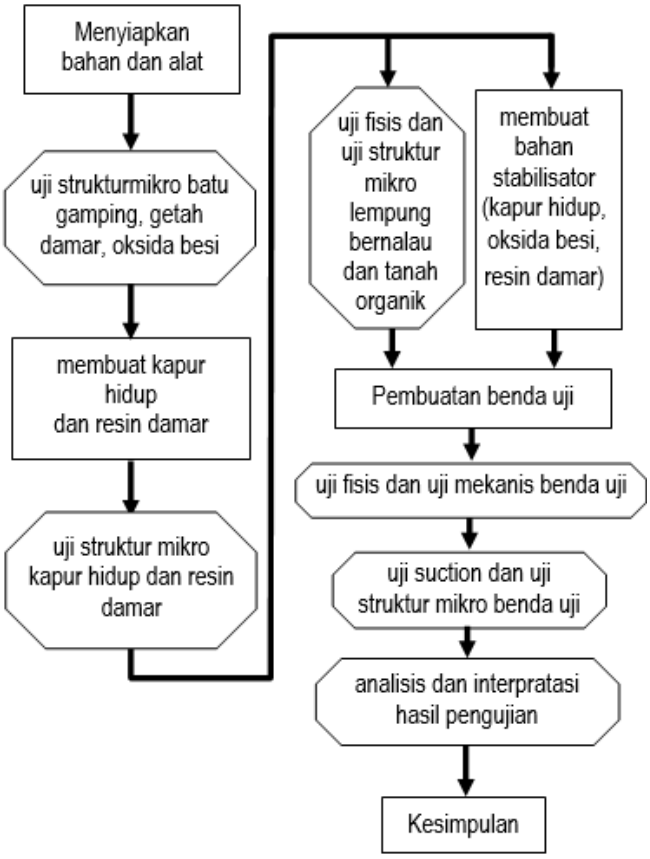
3	Getah damar mata kucing	-	-	1	-
4	Resin damar	-	-	1	-
5	Oksida besi	-	-	1	-
6	Lempung berlanau	1	1	1	-
7	Tanah organik	1	1	1	-
8	Benda uji lempung berlanau tanpa bahan stabilisator	5	1*	-	-
9	Benda uji lempung berlanau tanpa rendaman	25	1*	1*	-
10	Benda uji lempung berlanau dg rendaman	16	1*	1*	**1***
11	Benda uji tanah organik tanpa bahan stabilisator	5	1*	-	**1***
12	Benda uji tanah organik tanpa rendaman	25	1*	1*	-
13	Benda uji tanah organik dg rendaman	16	1*	1*	**1***
	Jumlah pengujian	94	8	8	

1* = Diuji yang hasil uji kuat tekannya paling tinggi (komposisi yang mana, pada umur berapa hari, direndam atau tidak direndam).

e. Prosedur Penelitian

1. Menguji struktur mikro batu gamping (*limestone*), oksida besi, dan getah damar.
2. Membuat kapur hidup. Batu gamping (*lime stone*) di*sinterring* dengan suhu 1500^{o} Celsius selama 12 jam, didinginkan kemudian digiling dan diayak dengan saringan 200.
3. Membuat resin damar. Getah damar dipanaskan dengan suhu 120^{o} Celsius selama 8 jam, didinginkan kemudian digiling dan diayak dengan saringan 200.
4. Menguji struktur mikro kapur hidup dan resin damar.
5. Membuat bahan stabilisator. Batu gamping yang telah diaktivasi menjadi kapur hidup dalam bentuk bubuk alkali (A) dicampur dengan resin damar (R) dengan persamaan A + R = 100 + 10 = M (dalam satuan berat). Selanjutnya ditambahkan oksida besi (O) dengan persamaan M + O = 100 + 10 = S (dalam satuan berat). S adalah bahan stabilisator untuk stabilisasi tanah. Komposisi campuran ini dibuat berdasarkan estimasi dan *trial mix*, selanjutnya perlu dilakukan analisis yang lebih detil untuk menentukan komposisi yang ideal.
6. Menguji karakteristik fisis tanah lempung berlanau dan tanah organik sebelum mendapat perlakuan stabilisasi, meliputi uji kadar organik [4], uji kadar air [2], uji gravitas khusus untuk menganalisis distribusi ukuran butiran tanah [5], uji batas konsistensi/*Atterberg* {batas cair dan batas plastis [7], batas susut [6], dan pemadatan *proctor standard* [8].
7. Menguji struktur mikro tanah lempung berlanau dan tanah organik.
8. Menyiapkan benda uji sebagaimana rancangan pada Tabel 1.
9. Menguji karakteristik mekanis benda uji untuk pengujian kompaksi [8] untuk menghasilkan berat isi kering maksimum (*gd max*) dan kadar air optimum (*w opt*) dan pengujian kuat tekan benda uji pada berbagai komposisi campuran perendaman. Uji kepadatan ringan [22], Uji kepadatan berat [23].
10. Menguji ratio hisapan air pada tanah terstabilisasi, dengan *suction test* [3].
11. Menguji struktur mikro benda uji untuk mengidentifikasi bentuk dan ukuran partikel penyusun (karakteristik morfologi) dengan *SEM*, fasa (karakteristik kimia) dengan *EDS*, dan senyawa (komponen mineralogi) dengan *XRD*.
12. Menganalisis hasil-hasil pegujian untuk mengambil kesimpulan.

Untuk lebih memperjelas rancangan penelitian, dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

c. Metode Analisis

Penelitian ini bersifat kuantitatif. Data yang dikumpulkan dari setiap tahapan pengujian di laboratorium dianalisis dan diuji menggunakan metode-metode, mengacu pada teori-teori tertentu untuk menganalisis hubungan antar variabel. Variabel-variabel diukur dengan menggunakan instrumen-instrumen pene-litian mengacu pada standar-standar yang telah ditetapkan, sehingga data yang terdiri dari angka-angka dapat dianalisis berdasarkan prosedur statistik dan dapat ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik. Dalam penelitian ini digunakan metode statistik analisis *variant, regresi*, dan *anova* dua arah. Data dari setiap tahapan pengujian dianalisis menggunakan asumsi-asumsi logis untuk menguji teori-teori secara deduktif agar tidak memunculkan bias-bias, mengontrol penjelasan-penjelasan alternatif agar hasil penelitian ini dapat digeneralisasi dan dapat diaplikasikan untuk memberikan manfaat.

4. KESIMPULAN

Stabilisasi tanah dalam penelitian ini menggunakan kapur hidup yang diaktivasi resin damar dan oksida besi. Batu gamping $CaCO_3$ dibuat menjadi kapur hidup, getah damar dibuat menjadi resin damar. Oksida besi yang digunakan adalah jenis oksida besi merah (Fe_2O_3). Resin damar dan oksida besi ditambahkan pada kapur hidup untuk memberikan keseimbangan pada penguatan gaya tarik antar butiran tanah oleh kapur. Intinya adalah penggabungan luas partikel menjadi satu kesatuan untuk memperkuat gaya tarik antar butir. Pada penelitian ini, bahan stabilisator akan diaplikasikan pada dua jenis tanah lunak (tanah lempung berlanau dan tanah organik). Pengujian dilakukan di laboratorium dengan metode *trial mix*. Pengujian yang akan dilakukan adalah uji sifat fisis tanah, uji mekanis termasuk uji *suction*, dan uji struktur mikro.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASTM D2166-66 (2000). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, Annual Book of ASTM Standards, ASTM Int., West Conshohocken, PA.
2. ASTM D2216-98 *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*[1].
3. ASTM D2434-68 (1994). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils*, Annual Book of ASTM Standards, ASTM Int., West Conshohocken, PA.

4. ASTM D2974. (2000). *"Standard Test Method for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and other Organic Soils"*. Annual Book of ASTM Standards ASTM, Philadelphia, USA, 2000.
5. ASTM D422-63. (1994). *"Standard Test Method for Specific Gravity of Soils"* Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, USA. vol. 04.08; 80-83, 1994.
6. ASTM D427-61 (1989). *"Standard Test Method for Shrinkage Limit of Soil Mixtures".* Annual Book of ASTM Standards, ASTM Int., West Conshohocken, PA.
7. ASTM D4318-78. (1994). *"Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic and Plasticity Index of Soils,"* Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, USA. vol. 04.08, 1994
8. ASTM D698-91. (1994). *"Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Standard Effort, 600kN m/m3".* Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, USA. vol. 04.08, pp. 69-76, 1994.
9. Cuisinier, O., Deneele, D., Masrouri, F., (2009). *Shear Strength Behaviour of Compacted Clayey Soil Percolated with an Alkaline Solution.* Engineering Geology 108 (2009) 177-188, journal homepage: www.elsevier.com/locate/enggeo.
10. Diamond, S., and Kinter, E.B., (1965). *Mechanisms of Soil-Lime Stabilization.* Highway Res. Rec., Volume 92, 1965, pp. 83-101.
11. Doelen, V.D., Berg, V.D., Boon, J.J., 1998a. *Comparative Chromatogra-phic and Mass Spectrometric Studies of Triterpenoid Varnishes Fresh Material and Aged Samples from Paintings*. Studies in Conservation. 43(4). 249-264.
12. Fathani, T.F., dan Adi, A.D., (1999). *Perbaikan Sifat Lempung Ekspansif dengan Penambahan Kapur*. Prosiding Seminar Nasional Geoteknik'99' hal.97105.
13. Haryadi, H. dkk., (1997). *Bahan Galian Industri, Batu Kapur*. Hal. 7-75 = 7-91;
14. Hatmoko, J.T., and Lulie, Y., (2007). *UCS Tanah Lempung Ekspansif yang Distabilisasi dengan Abu Ampas Tebu dan Kapur*. Jurnal Teknik Sipil, Volume 8 No. 1, Oktober 2007 : 64 – 77.
15. Herman dan Syahroni, (2014). *Pengaruh Abu Batubara Dan Kapur Terhadap Kembang Susut Tanah Lempung Pada Kondisi Basah Optimum.* Jurnal Momentum Vol.16, No.1, Februari 2014. ISSN : 1693-752X.
16. Ingles, O.G. dan Metcalf, J.B., (1992). *"Soil Stabilitzation Principles and Practice",* Butterworths Pty. Limited, Melbourne.
17. Indra., (2012). *Stalakmit dan Stalaktit.* http://geografiupi2010.blogspot.com.
18. Mimbar, S.M., (1999). *Pengaruh Cairan Asam Sulfat Terhadap Produksi Getah Damar.* Habitat, 10(108). 36-41.
19. Mitchel, J.K., (1976). *"Fundamental of Soil Behaviour"*. John Wiley and Sons, lnc., New York.
20. Mulyono, N. dan Apriyantono, A., (2004). *Sifat Fisik, Kimia, Dan Fungsional Damar*. Jurnal Teknologi dan Industri Pangan Vol. XV, No. 3. Tahun 2004.
21. Rangan, P.R., (2021). Effect Calcium Hydroxide (traditionally called slaked lime) to Stabilization of Laterite Soil, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, volume 1088, pages 1-6, IOP Publishing
22. Rossel, R.V., Cattle, S., Ortega, A., Fouad, Y., (2009). *In Situ Measurements of Soil Colour, Mineral Composition and Clay Content by Vis-NIR Spectroscopy*. Geoderma 150, 253–266.
23. SNI 03-1742-1989 *"Panduan pengujian kepadatan ringan untuk tanah"* Standar Nasional Indonesia. Bahan Konstruksi Bangunan Dan Rekayasa Sipil.
24. SNI 03-1743-1989 *"Panduan pengujian kepadatan berat untuk tanah"* Standar Nasional Indonesia. Bahan Konstruksi Bangunan Dan Rekayasa Sipil.
25. SNI 2900-2-2013 *"Damar mata kucing. Bagian 2: Klasifikasi, persyaratan, dan cara uji berdasarkan uji laboratorium".* Standar Nasional Indonesia. Hasil Hutan Bukan Kayu.
26. Sujatmaka, N., (1998). *Potensial Penambahan Abu Sekam Padi dan Kapur Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung.* Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM, Jogjakarta.
27. Tjokrodimuljo, K., (1992). *Bahan Bangunan*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
28. Utomo, S.H.T., (2007). *Stabilisasi Tanah Masa lalu, Masa kini, dan Masa depan*. Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Brsar Pada Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, tanggal 11 September 2007.
29. Wohler, F., (1828). *Complete Dictionary of Scientific Biography*, Copyright 2008 Charles Scribner's Sons.

PENGARUH PENAMBAHAN FIBER TERHADAP PARAMETER DAYA DUKUNG TANAH LEMPUNG

I Nyoman Aribudiman[1*], Anissa Maria Hidayati[2*]

[1]Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Bali.*
e-mail: naribudiman@unud.ac.id
[2]Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Bali*
e-mail: anissamaria@unud.ac.id

ABSTRAK

Abstrak : Tanah lempung merupakan jenis tanah yang kurang bagus digunakan sebagai elemen pendukung konstruksi. Sehingga perlu dilakukan perbaikan tanah yaitu stabilisasi, dengan menambahkan sejenis bahan fiber yaitu serat polipropilena ke dalam tanah lempung. Penelitian bertujuan untuk mengetahui karakteristik tanah lempung sesudah penambahan fiber . Tanah dicampur fiber dengan variasi 0%, 2%, 4%, dan 6%. Pengujian yang dilakukan adalah analisis saringan, kadar air, berat jenis, batas-batas Atterberg, pemadatan tanah, kuat tekan bebas, dan CBR. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa nilai daya dukung tanah dengan penambahan fiber mengalami perubahan peningkatan daya dukung tanah. Perubahan daya dukung tanah terjadi pada penambahan 6% fiber. Nilai CBR 0.1 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 2 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 3.628% (0% fiber) menjadi 5.234% (naik sebesar 44.267%) dan nilai CBR 0.2 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 2 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 2.541% (0% fiber) menjadi 4.133% (naik sebesar 62.652%). Sedangkan nilai CBR 0.1 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 4 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 4.041% (0% fiber) menjadi 5.464% (naik sebesar 35.214%) dan nilai CBR 0.2 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 4 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 2.786% (0% fiber) menjadi 4.347% (naik sebesar 56.030%). Pada penelitian ini terlihat bahwa penambahan fiber pada tanah lempung mengakibatkan nilai CBR meningkat, tetapi jika semakin banyak prosentase fiber yang ditambahkan kemungkinan nilai CBR akan mengalami penurunan. Pemeraman dan perendaman yang dilakukan pada penelitian CBR juga meningkatkan nilai CBR, karena pada saat pemeraman dan perendaman, air yang terkandung dalam tanah mengalir lebih merata sehingga tanah menjadi lebih padat.

Kata kunci: fiber, daya dukung tanah, tanah lempung

1. PENDAHULUAN

Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan tekanan atau beban bangunan pada tanah dengan aman tanpa menimbulkan keruntuhan geser dan penurunan berlebihan. Kapasitas nilai daya dukung dari tanah didasarkan pada karakteristik tanah dasar dan dipertimbangkan terhadap kriteria penurunan dan stabilitas yang diisyaratkan, termasuk faktor aman terhadap keruntuhan.

Sebagai suatu bahan konstruksi, tanah adalah bahan yang tidak dapat menahan tarik, dan juga diperhitungkan tidak dapat menahan desak. Semua bahan yang bekerja pada tanah diimbangi oleh daya dukung tanah. Masalah stabilitas pada tanah meliputi antara lain kemampuan tanah memikul beban pondasi, tekanan tanah pasif dan aktif, dan stabilitas lereng. Stabilisasi tanah lempung yang akan dilakukan berikut ini dengan menambahkan sejenis bahan fiber ke dalam tanah lempung. Fiber yang berupa serat dan sifatnya yang sedikit menyerap air akan memudahkan dalam mengalirkan air.

Hipotesa awal dari penelitian penambahan fiber yaitu, agar kadar air dan fiber yang ada pada campuran lebih merata. Fiber akan menurunkan kadar air pada batas cair, meningkatkan berat volume kering tanah dan menurunkan kadar air optimum, dan meningkatkan kepadatan yang mengakibatkan tingginya daya dukung tanah. Secara lebih rinci peningkatan konsentrasi bahan fiber akan diikuti peningkatan CBR. Sedangkan proses pemeraman dan perendaman akan mempengaruhi kadar air yang terkandung dalam tanah dan berpengaruh pada karakteristik tanah

2. MATERI DAN METODE

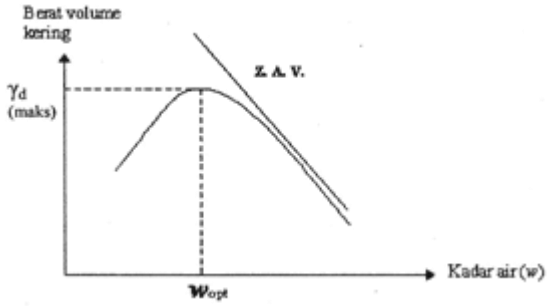
Klasifikasi Tanah

Karakterisasi tanah adalah suatu proses pengumpulan tanah menjadi suatu kelompok atau sub-kelompok dengan kualitas atau perilaku yang sama. (Simanjuntak, 2017). Biasanya kepastian sifat masing-masing orde tanah digunakan untuk mengatasi masalah khusus di lapangan, misalnya penyelesaian struktur yang berhubungan dengan hipotesis kombinasi, menghitung koefisien penetrasi yang terkait dengan peraturan Darcy untuk menentukan debit rembesan

yang melalui struktur tanah dan menilai kekuatan tanah miring. Dengan mempertimbangkan parameter kuat geser tanah, sebagian besar klasifikasi tanah menggunakan indeks jenis uji yang sangat sederhana untuk mendeskripsikan tanah. Karakteristik ini digunakan untuk mendefinisi klompok klasifikasi. Sebagai aturan umum, karakterisasi tanah bergantung pada ukuran molekul yang diperoleh dari pemeriksaan pengayakan dan plastisitasnya (Hardiyatmo, 1992). Pada periode ini, ada dua standar klasifikasi yang digunakan dalam perancangan struktural, yaitu Unified Soil Classification System dan AASHTO.

Pengujian Pemadatan Tanah

Pemadatan adalah suatu proses memadatnya partikel tanah sehingga terjadi pengurangan volume udara dan volume air dengan memakai cara mekanis. Tujuan pemadatan tanah adalah memadatkan tanah pada kadar air optimum dan memperbaiki karakteristik mekanisme tanah. Dengan dilakukannya pengujian pemadatan tanah ini, maka akan terdapat hubungan antara kadar air dengan berat volume, seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik hubungan antara berat volume kering dengan kadar air

Uji Kuat Tekan Bebas

Uji kuat tekan bebas atau UCT (Unconfined Compression Test) merupakan metode yang dilakukan di laboratorium untuk mengukur kemampuan tanah lempung dalam menahan beban tekanan tanpa adanya batasan tekanan lateral. Uji ini bertujuan untuk memahami sejauh mana tanah lempung dapat menerima beban tekanan sebelum terjadi pemisahan butiran-butirannya, serta untuk memahami regangan yang terjadi pada tanah akibat tekanan tersebut. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat geser dari tanah lempung. Kuat tekan bebas (qu) adalah nilai maksimum tegangan aksial yang dapat dipertahankan oleh sampel tanah berbentuk silinder sebelum mengalami kegagalan geser. (Prihatiningsih, 1998). Kuat tekan bebas diukur dalam satuan tekanan (kN/m2) yang diperlukan untuk mendorong suatu silinder tanah hingga pecah atau mengalami perpendekatan tanah sebesar 20%. Benda uji berupa silinder tanah lempung dengan tinggi antara 2 hingga 3 kali diameternya, sesuai standar SNI 3638:2012).

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (1)$$

dengan σ = Tegangan normal, P = Beban yang bekerja, A = luas tampang

California Bearing Ratio (CBR)

California Bearing Ratio (CBR) adalah perbandingan antara timbunan yang dapat dibawa oleh tanah terhadap beban standar pada tingkat penurunan tanah tertentu dan untuk menentukan strategi pengujian kekuatan keseluruhan tanah dasar. subbase dan base pada aspal interstate. (Boowles, 1998). Tanah yang telah tercampur dengan air secara optimal berfungsi sebagai benda uji. Benda uji kemudian dipukul dengan tiga variasi yaitu (10 x 5) pukulan, (30 x 5) pukulan, dan (65 x 5) pukulan. Uji California Bearing Ratio (CBR) dapat dihitung dengan persamaan 1.1. (SNI 1744:2012).

$$CBR = \frac{Beban\ Terkoreksi}{Beban\ Standart}\ x\ 100 \qquad (2)$$

Daya Dukung Tanah

Daya dukung untuk memikul tekanan yang bekerja di atasnya. Daya dukung ultimit (qf) didefinisikan sebagai tekanan terkecil yang dapat menyebabkan keruntuhan geser pada tanah pendukung tepat di bawah dan di sekeliling pondasi.

Menurut Terzaghi, daya dukung ultimit pada pondasi jalur dangkal dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$q_f = 0{,}5\ \boldsymbol{\gamma}.B.\ N_{\boldsymbol{\gamma}} + c.\ N_c + \boldsymbol{\gamma}.D.\ N_q \qquad (3)$$

dengan nilai $N_{\boldsymbol{\gamma}}$, N_c, N_q adalah faktor – faktor daya dukung yang tergantung pada nilai $\boldsymbol{\phi}$.

Fiber / Serat Polipropilena (Polypropylene)

Polypropylene (Polipropilena) adalah makromolekul thermoplastic (dapat dilelehkan) rantai jenuh (tidak memiliki ikatan rangkap) yang terdiri dari propilena sebagai gugus yang berulang dengan rumus kimia (C3H6)n. Serat polypropylene mempunyai berat jenis berkisar antara 0.910-0.928 dan dapat meleleh pada suhu 165-170°C. Sifat-sifat dari polypropylene yaitu : Bersifat ringan dan memiliki densitas yang rendah, Tahan terhadap tekanan tinggi, Tahan terhadap suhu tinggi karena titik lelehnya sekitar 165-170°C, memiliki sifat dielektrik yang baik, tahan terhadap suasana basa dan asam, pelarut organik tetapi kurang tahan terhadap pelarut aromatik, alifatik dan yang mengandung klor juga terhadap sinar UV (Ultraviolet), tidak beracun, tidak berwarna, Mudah diproduksi dan merupakan material yang ekonomis. Dalam kegunaannya sebagai bahan campuran untuk bidang konstruksi, polypropylene memiliki kelebihan dalam menahan gaya tarikan untuk beton dan mampu memberikan tambahan kekuatan dalam pekerjaan perkerasaan jalan dimana serat fiber digunakan sebagai filler.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan dan pemilihan tempat pengambilan sampel. Penelitian selanjutnya dilakukan studi literatur seperti mempelajari teori-teori yang dapat menunjang tentang pengaruh penambahan bahan tambahan terhadap perilaku tanah, teknik analisis data, tata cara pengujian, serta penelitian sejenis yang pernah dilakukan. Pengujian laboratoium diawali dengan persiapan alat dan bahan. Selanjutnya dilakukan penelitian karakteristik tanah yaitu dengan pengujian sifat fisis dan mekanis dari tanah serta pengaruh fiber terhadap nilai nilai CBR dan daya dukung tanah. Setelah mendapatkan hasil penelitian selanjutnya dilakukan analisa terhadap hasil penelitian. Melalui hasil tersebut, keimpulan dapat diambul dari tabel serta grafik yang dibuat berdasarkan hasil penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisik (Index Properties)

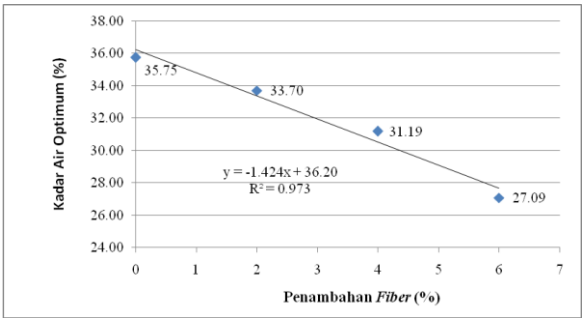
Berdasarkan hasil indek properties, pengujian analisa ukuran butiran dan uji hidrometer, dan Batas-batas Atterberg, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Pengujian Index Properties dan Batas-Batas Atterberg Tanah

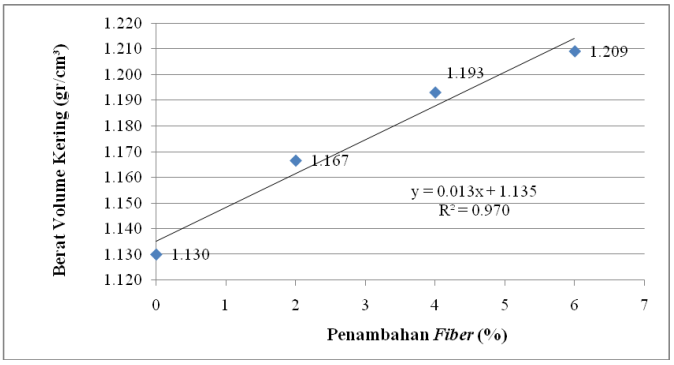
No.	Parameter Tanah	Hasil
1	Berat Jenis (Gs)	2,561
2	Batas Cair (LL)	52,08 %
3	Batas Plastis (PL)	31,79 %
4	Batas Susu (SL)	23,00 %
5	Indek Plastis (IP)	20,29 %
6	Lolos Saringan N0.200	55,267%
7	Klasifikasi Tanah (USCS)	A-6

Hasil Pengujian Pemadatan Tanah (*Standard Proctor Test*)

Berdasarkan hasil penelitian kepadatan tanah menunjukkan bahwa kepadatan kering maksimum tanah lempung Padangsambian Kaja setelah dicampur serat polipropelina berada pada rentang 1.130 gr/cm3 sampai 1.209 gr/cm3 dengan kenaikan rata-rata 6.99%. Dan kadar air optimum berada pada rentang 34.78% sampai 36.71% dengan kenaikan rata-rata 24.22%. Grafik hubungan antara nilai kadar air optimum dan berat volume kering maksimum dengan penambahan fiber dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.



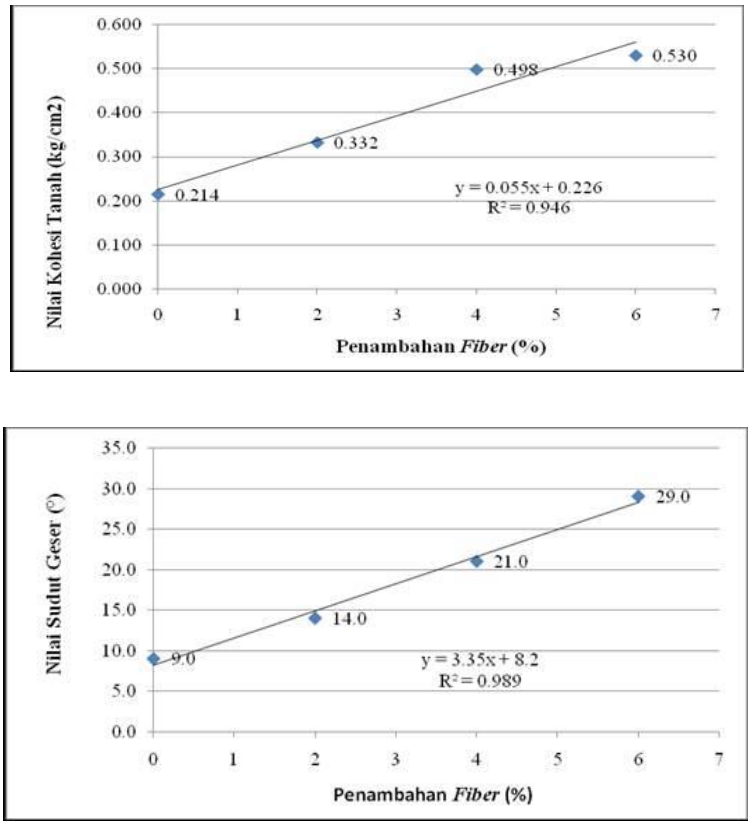
Gambar 2. Grafik Hubungan antara Kadar Air Optimum Rata- Rata dan Persentase Penambahan *Fiber*.



Gambar 3. Grafik Hubungan antara Berat Kering Maksimum Rata-Rata dan Persentase Penambahan *Fiber*.

Hasil Pengujian Tes Kuat Tekan bebas (UCT)

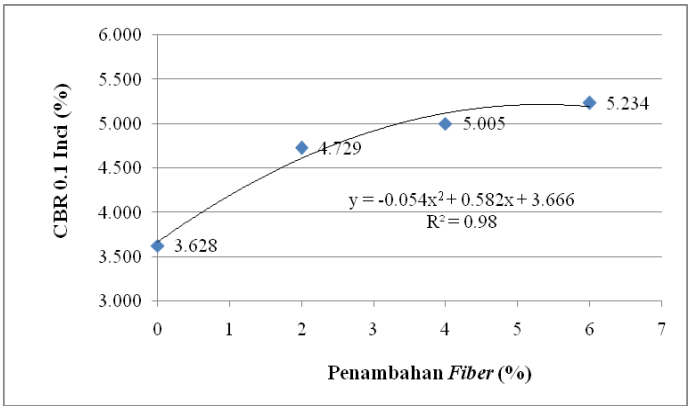
Berdasarkan hasil penelitianTes Kuat tekan bebas menunjukkan bahwa kuat tekan bebas tanah lempung Padangsambian (undisturbed sample) berada pada rentan 0.777 kg/cm2 sampai 1.066 kg/cm2 dengan nilai rata – rata 0.922 kg/cm2. Nilai Sudut Geser Tanah berkisar antara 4° sampai 6° dengan nilai rata – rata 5°, dan nilai kohesi tanah berada pada rentang 0.389 kg/cm2 sampai 0.533 kg/cm2 dengan rata – rata 0.461 kg/cm2. Sedangkan untuk tanah lempung Padangsambian (disturbed sample) yang dipadatkan memiliki nilai kuat tekan bebas pada rentang 0.373 kg/cm2 sampai 0.481 kg/cm2 dengan rata – rata 0.427 kg/cm2. Nilai sudut geser tanah 8° sampai 10.0° dengan rata – rata 9° dan kohesi tanah berada pada rentang 0.187 kg/cm2 sampai 0.241 kg/cm2 dengan rata – rata 0.214 kg/cm2. Berdasarkan data di atas, kenaikan nilai sudut geser (ϕ) setelah ditambahkan fiber dikarenakan fiber yang mempunyai karakteristik berbentuk serabut dan licin menyebabkan adanya daya tarik permukaan yang lebih besar antara tanah dengan fiber sehingga mampu menaikkan sudut keruntuhan tanah (α). Grafik hubungan antara nilai kohesi dan sudut geser tanah dengan penambahan fiber dapat dilihat pada Gambar 4.



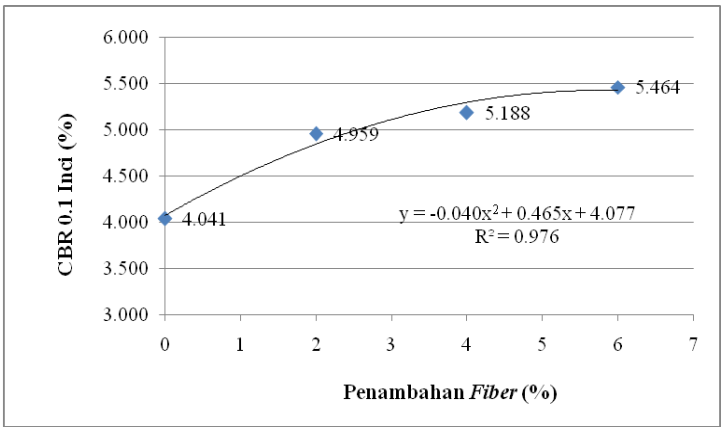
Gambar 4. Grafik Hubungan antara Kuat Tekan Bebas, Sudut Geser Tanah Rata-Rata dengan Persentase Penambahan Fiber.

Hasil Pengujian CBR (*California Baring Ratio*)

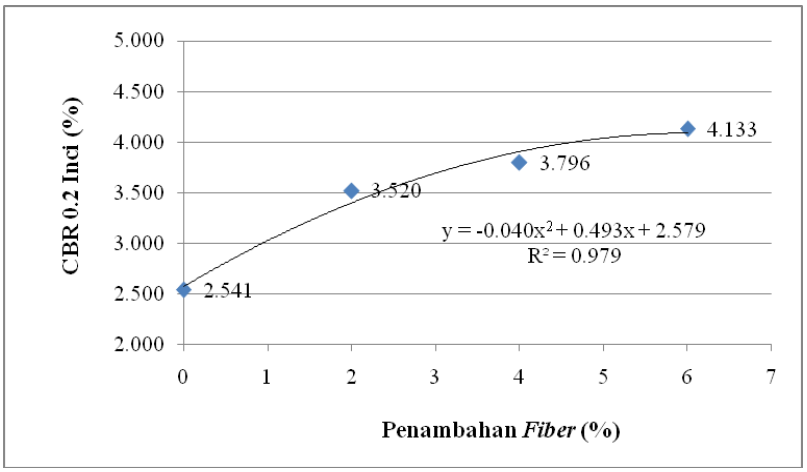
Berdasarkan hasil penelitian CBR menunjukkan bahwa nilai CBR 0,1 inci tanah lempung Padangsambian Kaja (disturbed sampel) berada pada rentang 3.490% sampai 3.765% dengan nilai rata- rata 3.628 % dan nilai CBR 0,2 inci berada pada rentang 2.388% sampai 2.694% dengan nilai rata – rata 2.541%. Berdasarkan data di atas, terlihat bahwa penambahan fiber pada tanah lempung mengakibatkan nilai CBR meningkat, tetapi jika semakin banyak persentase fiber yang ditambahkan kemungkinan nilai CBR akan mengalami penurunan. Fiber adalah jenis serat yang bisa mengalami perubahan berat volume tanah, sehingga pada campuran akan sedikit mengalami perubahan volume dibandingkan dengan tanah aslinya. Pemeraman dan perendaman yang dilakukan pada penelitian CBR juga meningkatkan nilai CBR, karena pada saat pemeraman dan perendaman, air yang terkandung dalam tanah mengalir lebih merata sehingga tanah menjadi lebih padat. Grafik hubungan antara nilai CBR, pemeraman dan perendaman dengan penambahan fiber dapat dilihat pada Gambar 5, 6, 7, dan 8.



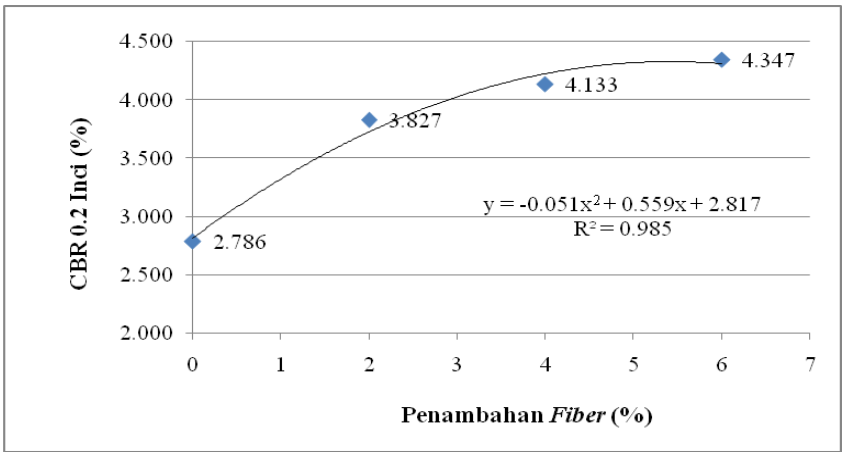
Gambar 5. Grafik Hubungan antara CBR 0,1 Inci Rata-Rata dan Persentase Penambahan Fiber 2 Hari Pemeraman dan 2 Hari Perendaman.



Gambar 6. Grafik Hubungan antara CBR 0,1 Inci Rata-Rata dan Persentase Penambahan Fiber 2 Hari Pemeraman dan 4 Hari Perendaman.



Gambar 7. Grafik Hubungan antara CBR 0,2 Inci Rata-Rata dan Persentase Penambahan Fiber 2 Hari Pemeraman dan 2 Hari Perendaman.



Gambar 8. Grafik Hubungan antara CBR 0,2 Inci Rata-Rata dan Persentase Penambahan Fiber 2 Hari Pemeraman dan 4 Hari Perendaman.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang dilakukan terhadap data hasil penelitian laboratorium, maka dapat disimpulkan bahwa dari test fisik dan mekanik yang dilakukan terhadap tanah lempung yang berada di daerah Padangsambian Kaja menunjukan bahwa fiber menyebabkan karakteristik tanah menjadi meningkat, peningkatan tersebut terjadi pada penambahan 6% fiber. Ditinjau dari nilai CBR, yaitu nilai CBR 0.1 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 2 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 3.628% (0% fiber) menjadi 5.234% (naik sebesar 44.267%) dan nilai CBR 0.2 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 2 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 2.541% (0% fiber) menjadi 4.133% (naik sebesar 62.652%). Sedangkan nilai CBR 0.1 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 4 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 4.041% (0% fiber) menjadi 5.464% (naik sebesar 35.214%) dan nilai CBR 0.2 inci yang diperam selama 2 hari dan yang direndam selama 4 hari mengalami kenaikan pada penambahan 6% fiber, yaitu dari 2.786% (0% fiber) menjadi 4.347% (naik sebesar 56.030%). Dapat disimpulkan bahwa semakin besar penambahan fiber maka nilai CBR akan semakin meningkat, tetapi jika semakin banyak prosentase fiber yang ditambahkan kemungkinan nilai CBR akan mengalami penurunan.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

Anonimus. 2008. *Polipropilena* http://id.wikipedia.org/wiki/Polipropilena

Bowles, J. E. 1993. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah.* Edisi Kedua. Erlangga. Jakarta

Craig , R.F. 1994. *Mekanika Tanah.* Edisi Ke empat. Erlangga. Jakarta

Das, B. M., Endah, Noor., dan Mochtar, I. B. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jilid 1 dan 2. Erlangga. Jakarta

Hardiyatmo, H. C. 1995. *dalam* Taufik Usman. 2008. *Pengaruh Stabilisasi Tanah Berbutir Halus Yang Distabilisasi Menggunakan Abu Merapi Pada Batas Konsistensi dan CBR Rendaman* (Tugas Akhir yang dipublikasikan, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, 2008)

Putra, I K. E. 2011. *Pengaruh Penambahan Fiber (Serat Polypropylene) Terhadap Kuat Geser Tanah Lempung.* (Tugas Akhir yang dipublikasikan, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, 2011)

Soedarmo, G. D. dan Purnomo, S. J. E. 1997. *Mekanika Tanah 1*. Kanisius Yogyakarta

Trisnayani, N. 2008. *Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi dan Kapur Terhadap Kembang Susut Tanah Ekspansif.* (Tugas Akhir yang dipublikasikan, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, 2008)

Wijantara, I G. F. 2009. *Pengaruh Penambahan Serat Ijuk Terhadap Karakteristik Tanah Ekspansif*. (Tugas Akhir yang dipublikasikan, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Udayana, 2009)

Pengaruh Jenis Energi Pemadatan Tanah di Laboratorium Terhadap Karakteristik Tanah Lempung dari Desa Pene dan Desa Konbaki Kabupaten TTS

Ronny S. Poyk[1], Tri M. W. Sir[2], Jusuf J. S. Pah[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jalan Adisucipto, Kupang
e-mail: (rspoyk08@gmail.com)

[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jalan Adisucipto, Kupang
e-mail: (trimwsir@staf.undana.ac.id)
[3] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jalan Adisucipto, Kupang
e-mail: (yuserpbdaniel@yahoo.com)

ABSTRAK

Pelaksanaan konstruksi timbunan tubuh bendungan merupakan pekerjaan yang memerlukan kajian geoteknik. Kajian geoteknik dilakukan terhadap material timpbunan yang digunakan pada saat tahapan pemadatan (kompaksi) di lapangan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh energi pemadatan di laboratorium tarhadap kuat geser tanah yang berasal dari Desa Pene dan Desa Konbaki, Kabupaten TTS. Tanah tersebut kemudian dipadatkan menggunakan alat *Standard Proctor* dan *Modified Proctor* dengan variasi pukulan 25 dan 29 pukulan dan juga variasi lapisan 4 dan 5 lapis tanah. Pada tanah yang dilakukan pemadatan selanjutnya akan diuji kuat geser menggunakan alat *Direct Shear Test*. Pengaruh energi pemadatan menghasilkan nilai berat kering volume paling besar yaitu 1.36 gr/cm^3 untuk tanah Pene dan 1.37 gr/cm^3 untuk tanah Konbaki dengan energi sebesar 14.164 kg/cm^3 (E6) dan jika pemadatan dengan energi berlebihan pada tanah jenis dari kedua desa ini justru menurunkan nilai kepadatan keringnya. Pengaruh energi terhadap kuat geser tanah menghasilkan tanah semakin kuat dengan tingkat kepadatan yang tergolong agak padat sampai dengan sangat padat (36.93° – 61.56°)

Kata Kunci: Karaktekristik, Tanah, Energi, Pemadatan, Geser

1. Pendahuluan

Tanah merupakan komponen yang sangat penting dalam bidang konstruksi. Hal ini ini karena fungsi tanah adalah sebagai perletakan suatu konstruksi (Buana, Sarie and Gandi, 2022). Salah satu unsur penting yang harus diperhatikan dalam tanah timbunan adalah karakteristik tanah dan cara stabilisasi tanah itu sendiri. Penentuan karakterisitik tanah harus melalui pengujian – pengujian laboratorium dan lapangan. Untuk memenuhi persyaratan stabilitas bendungan maka diperlukan kepadatan dan kekuatan geser yang memadai. Pelaksanaan pemadatan dilapangan didasarkan pada hasil pengujian pemadatan di laboratorium. Uji pemadatan di laboratorium terdiri atas 2 jenis yaitu pemadatan Standard dan pemadatan modifikasi. Kedua jenis pemadatan ini akan menghasilkan karakteristik teknis yang berbeda. Material untuk tubuh bendungan biasanya diusahakan agar dapat diambil sedekat mungkin dari tempat lokasi calon bendungan. Berhubung banyaknya jenis material yang terdapat di daerah sekitar lokasi bendungan, maka dengan dasar pemilihan material yang paling ideal, tubuh bendungan dapat direncanakan sedemikian rupa, sehingga dapat memenuhi aspek fungsi maupun stabilitas bendungan. Guna memenuhi kedua aspek tersebut perlu dilakukan pekerjaan pemadatan terhadap tanah timbunan inti bendungan. Untuk mendapatkan kepadatan maksimum maka perlu dilakukan pengujian di laboratorium. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan Febriana dkk (2021), didapat bahwa semakin banyak pukulan atau energi yang diberikan maka semakin besar energi pemadatan yang dihasilkan, serta nilai kohesi yang baik didapat pada saat pemadatan dengan jumlah pukulan 21 pukulan per lapis dengan 5 lapis tanah dan sudut geser dalam yang baik didapat pada saat pemadatan dengan 29 pukulan per lapis dengan 4 lapisan tanah. Untuk mendapatkan kepadatan maksimum maka perlu dilakukan pengujian di laboratorium. Kepadatan tanah dipengaruhi oleh besar kecilnya energi pemadatan yang diberikan. Pada proses pemadatan, peningkatan energi tidak dipengaruhi secara linear melainkan nilai optimum energi pemadatan yang diperlukan untuk memperoleh kepadatan maksimum sautu tanah, akan tetapi penambahan air setelah kadar air optimum justru cenderung menurunkan berat volume kering tanah. Tanah yang mempunyai kuat geser rendah akan berdampak pada terbatasnya beban yang bekerja diatasnya, untuk itu perlu dilakukannya pemadatan pemadatan tanah agar pori-pori dalam tanah bisa keluar dan dapat ditempati oleh partikel padat tanah. Oleh karena itu dilakukan penelitian di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Universitas Nusa Cendana untuk mengetahui pengaruh jenis energi pemadatan terhadap kuat geser tanah lempung yang berasal dari Desa Pene dan Desa Konbaki Kecamatan Polen Kabupaten Timor Tengah Selatan.

2. Bahan dan Metode

Bahan yang digunakan yaitu sampel tanah lempung yang diambil dari Desa Pene dan Desa Konbaki Kecamatan Polen Kabupaten Timor Tengah Selatan.

Metode yang digunakan yaitu metode eksperimental dengan variasi tumbukan dan lapisan pada proses pemadatan tanah.

2.1 Persiapan Bahan Uji

Sampel tanah terganggu yang telah diambil kemudian dikeringkan dengan dijemur di bawah terik matahari langsung selama 3–4 hari. Setelah kering dihancurkan dan diayak menggunakan saringan No. 4, 10 dan 40.

2.2 Pembuatan Benda Uji

- Pembuatan benda uji yakni tanah asli yang telah diuji sifat fisik dan mekaniknya, kemudian dilakukan pemadatan dengan variasi tumbukan dan lapisan. Variasi benda uji tersebut ditunjukan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Variasi Tumbukan dan Lapisan

Sampel	Jumlah Pukulan	Jumlah Lapisan	Energi (kg/cm^3)
1	25	3	6.068
2	29	3	7.039
3	29	4	9.386
4	29	4	11.250
5	25	5	12.123
6	29	5	14.063
7	25	5	27.277

- Untuk pengujian sifat mekanik tanah yaitu pemadatan tanah sampel tanah yang digunakan diperam terlebih dahulu selama 24 jam untuk memberikan waktu pada campuran tanah dan kadar air optimum untuk bereaksi. Selanjutnya dilakukan pengujian kuat geser tanah dengan alat Direct Shear Test dengan campuran kadar air pada dari uji pemadatan.

2.3 Pengujian Sifat Fisik, dan Mekanik Tanah

Tanah asli meliputi beberapa pengujian diantaranya:

1. Pengujian kadar air (ASTM D 2216-98)
2. Pengujian berat jenis spesifik (ASTM D 854-02)
3. Pengujian analisis saringan (ASTM D 442-63)
4. Pengujian hydrometer (ASTM D 442-63)
5. Pengujian batas-batas *atterberg*:
   a. Pengujian batas cair (ASTM D 4318-00)
   b. Pengujian batas plastis (ASTM D 4318-00)
   c. Pengujian batas susut (ASTM D 427-04)
6. Pengujian pemadatan standar Proctor (ASTM D 698-00)
7. Pengujian kuat geser langsung (ASTM D 3080-04)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Sifat Fisik dan Mekanik Tanah Asli

Berdasarkan pengujian yang dilakukan hasil pengujian sifat fisik dan mekanik tanah asli terdapat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik Tanah Asli

No	Parameter	Hasil		Satuan
		Pene	Konbaki	
1	Kadar air (w)	37,86	33,32	%
2	Berat jenis spesifik (*Specific Gravity*)	2,64	2,68	-
3	Batas cair (*Liquid Limit*)	35,9	43,26	%
4	Batas plastis (*Plastic Limit*)	26,1	34,76	%
5	Batas susut (*Shrinkage Limit*)	9,4	11,80	%
6	Indeks plastisitas (*Plasticity Index*)	9,8	8,51	%
7	Butiran tertahan saringan No. 200	30,20	29,97	%
8	Butiran lolos saringan No. 200	69,80	70,03	%
9	Permeabilitas	$3{,}06\text{x}10^{-5}$	$6{,}62\text{x}10^{-6}$	cm/detik
10	Kadar air optimum	31,28	32,13	%
11	Berat volume kering maksimum	0,86	0,84	gr/cm^3
12	Kohesi (c)	0,07	0,05	kg/cm^2
13	Sudut geser dalam (ø)	49,94	55,41	°

Berdasarkan Tabel 2, tanah Desa Pene masuk kelompok A-4 dengan nilai GI sebesar 6, dan tanah Desa Konbaki masuk dalam kelompok A-5 dangan nilai GI sebesar 7, yang dikategorikan sebagai bahan tanah dasar biasa sampai jelek menurut sistem klasifikasi AASHTO yang didasarkan nilai indeks plastisitas dan

persentase butir tanah lolos saringan No. 200. Sedangakan menurut sistem USCS, tanah Desa Pene dan Konbaki tergolong kedalam jenis lanau anorganik dengan plastisitas rendah (ML).

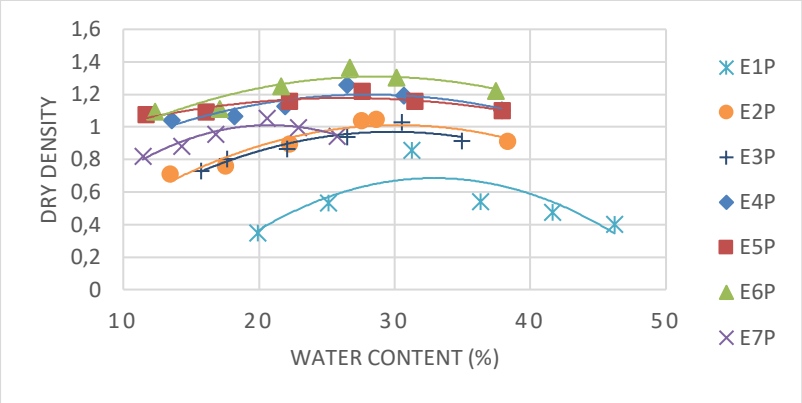
3.2 Pengaruh Energi Terhadap Pemadatan Tanah

Tujuan dari variasi energi ini adalah untuk mengetahui pengaruh mekanis tanah setelah dipadatkan pada kadar air optimum dan berat volume kering maksimum tanah dari Desa Pene dan Desa Konbaki. Hasil pengujian yang diperoleh tercantum pada Tabel 3.

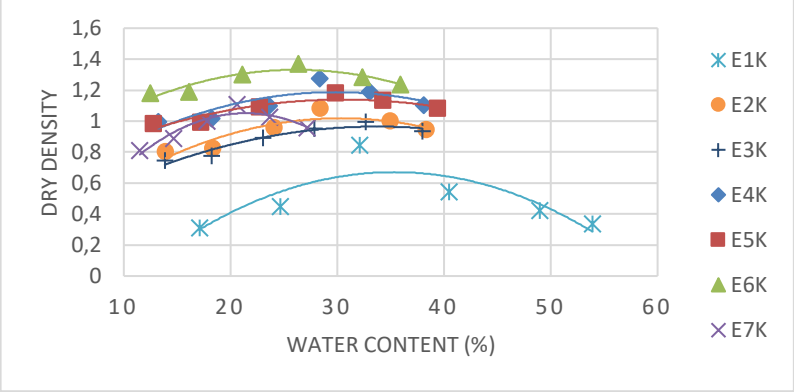
Tabel 3. Hasil Pengujian Pemadatan Tanah setelah Perubahan Energi

Sampel	Tumbukan	Lapisan	Energi	Tanah Pene		Tanah Konbaki	
				Wopt (%)	γdry (gr/cm^3)	Wopt (%)	γdry (gr/cm^3)
E1	25	3	6.068	32.28	0.86	31.12	0.83
E2	29	3	7.039	28.66	1.04	28.39	1.09
E3	29	4	9.386	30.53	1.03	32.64	0.99
E4	29	4	11.250	26.51	1.26	28.33	1.27
E5	25	5	12.123	27.61	1.22	29.86	1.18
E6	29	5	14.063	26.66	1.36	26.31	1.37
E7	25	5	27.277	20.60	1.05	20.57	1.11

Tabel 3 menunjukan bahwa nilai berat volume kering maksimum bertambah seiring dengan bertambahnya energi pemadatan yang diberikan pada setiap sampel tanah dari desa Pene dan desa Konbaki. Sedangkan kadar air semakin berkurang sesuai dengan bertambahnya energi. Selanjutnya perbandingan dari metode standard proctor dan modified proctor (E1-E7) untuk setiap sampel tanah dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Grafik Pemadatan Dengan Variasi Energi Tanah Pene



Gambar 2. Grafik Pemadatan Dengan Variasi Energi Tanah Konbaki

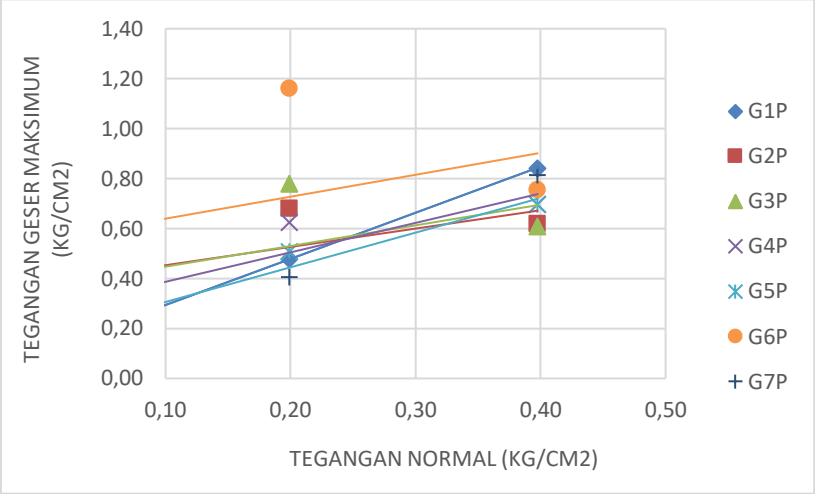
Gambar 1 dan 2 di atas untuk pengujian pemadatan dengan variasi energi menggunakan standard proctor (E1-E4) dan modfied proctor (E5-E7) pada masing-masing sampel tanah Pene dan Konbaki memperlihatkan nilai berat volume kering maksimum yang semakin meningkat seiring dengan kenaikan energi pemadatan. Unutk pengujian pemadatan dengan variasi energi menggunakan modified proctor (E5-E7)

pada masing-masing sampel tanah Pene dan Konbaki memperlihatkan bahwa berat volume kering maksimum tanah masih mengalami peningkatan sampai dengan energi 14.063 kg/cm^2 (E6) dan kemudian mengalami penurunan berat volume kering maksimum pada energi 27.277 kg/cm^2 (E7), hal ini menunjukan bahwa pemadatan dengan energi yang berlebih pada tanah jenis dari desa Pene dan Konbaki akan mengalami penurunan berat volume kering maksimum.

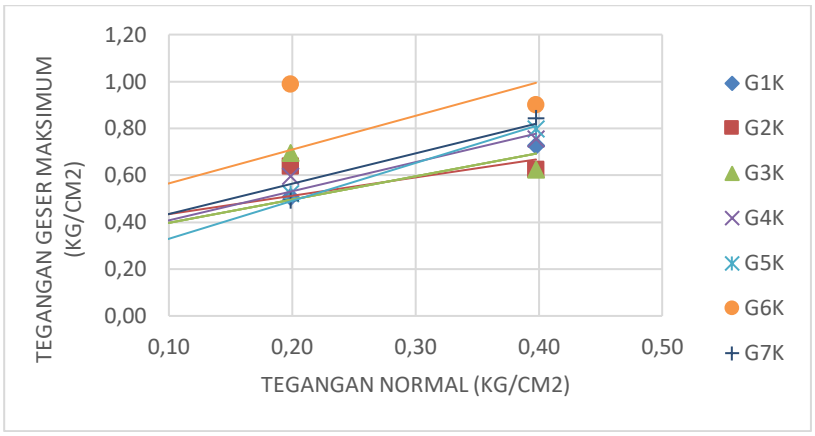
Hal lain yang dapat dilihat bahwa nilai kadar air optimum mengalami penurunan seiring bertambahnya energi pemadatan. Artinya adalah semakin tinggi energi pemadatan maka semakin meningkat berat volume kering maskimum namun menurunkan kadar air optimum tanah untuk jenis sampel tanah dari desa Pene dan Konbaki.

3.3 Pengaruh Energi Terhadap Kuat Geser Tanah

Nilai kuat geser diperoleh dari hubungan nilai tegangan normal dan tegangan geser tanah, yang dilakukan dengan uji Direct Shear. Dari hasil pengujian Direct Shear ini juga akan didapatkan nilai kohesi tanah dan sudut geser tanah. Pengujian dilakukan pada sampel tanah Pene dan Konbaki yang telah dipadatkan dengan variasi energi dengan nilai kohesi dan sudut geser yang dihasilkan terlihat pada Gambar 3 dan 4 berikut.



Gambar 3. Hubungan Tegangan Normal dan Tegangan Geser Maksimum Tanah Pene



Gambar 4. Hubungan Tegangan Normal dan Tegangan Geser Maksimum Tanah Konbaki

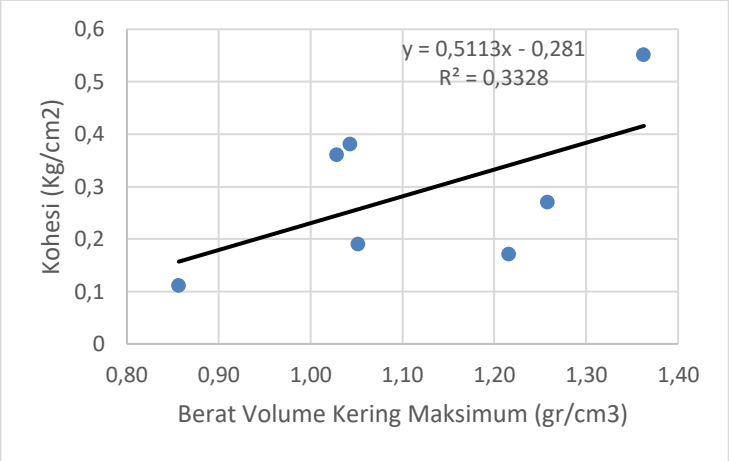
Tabel 4. Hasil Pengujian Direct Shear

Sampel	Energi	Tanah Pene		Tanah Konbaki	
		Kohesi (kg/cm^2)	Sudut geser dalam (°)	Kohesi (kg/cm^2)	Sudut geser dalam (°)
G1	6.068	0.11	61.56	0.21	52.96

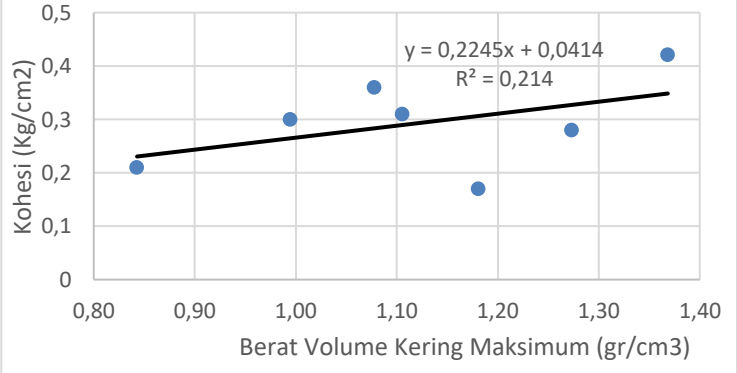
G2	7.039	0.38	36.93	0.36	38.05
G3	9.386	0.36	39.87	0.30	44.76
G4	11.250	0.27	49.70	0.28	51.15
G5	12.123	0.17	54.22	0.17	58.27
G6	14.063	0.55	41.27	0.42	55.23
G7	27.277	0.19	56.34	0.31	52.29

Hasil dari Gambar 3 dan 4 hubungan tegangan normal dan tegangan geser maksimum tanah dari masing-masing sampel tanah Pene dan Konbaki menunjukan bahwa nilai kohesi terbesar yang dihasilkan oleh pengujian geser langsung yaitu pada (G6) 0.55 kg/cm^2 untuk tanah Pene, dan (G6) 0.42 kg/cm^2 untuk tanah Konbaki. Atau dapat dikatakan bahwa nilai kohesi terbesar (G6) dihasilkan oleh energi pemadatan yang sama untuk masing-masing sampel tanah Pene dan Konbaki yaitu dengan nilai energi sebesar 14.063 kg/cm^2.

Hubungan antara berat volume kering maksimum terhadap kohesi sampel tanah Pene dan Konbaki juga terlihat bahwa semakin besar nilai berat volume kering maksimum sampel tanah menjadikan nilai kohesi cenderung meningkat seperti terlihat pada Gambar 5 untuk tanah Pene dan Gambar 6 untuk tanah Konbaki.



Gambar 5. Hubungan Berat Volume Kering Maksimum dan Nilai Kohesi Tanah Pene.



Gambar 6. Hubungan Berat Volume Kering Maksimum dan Nilai Kohesi Tanah Konbaki.

Berdasarkan grafik pada Gambar 5 dan 6 dapat dilihat bahwa hubungan berat volume kering maksimum terhadap kohesi tanah dari masing-masing desa menghasilkan perubahan nilai kohesi yang tetap mengalami peningkatan walaupun nilai korelasinya rendah, hal ini disebabkan oleh ketersediaanya sampel yang sedikit. Dapat dilihat juga bahwa pengaruh energi terhadap sudut geser tanah dari masing-masing desa menghasilkan tingkat kepadatan yang tergolong agak padat sampai dengan sangat padat, karena rentang nilai sudut geser adalah 36.93˚ – 61.56˚ untuk sampel tanah Pene, dan 38.05˚ – 55.23˚ untuk sampel tanah Konbaki. Semakin besar sudut geser dalam suatu material maka maeterial tersebut akan lebih tahan menerima tegangan luar yang diberikan terhadapnya. Besaran sudut geser dalam tanah menurut Bowles (1989) terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Besaran Sudut Geser Dalam Tanah

Tingkat Kepadatan	Sudut Geser Dalam
Sangat lepas	<30
Lepas	30-35
Agak padat	35-40
Padat	40-45
Sangat padat	>45

Selanjutnya, perubahan peningkatan dan penurunan nilai kohesi dan nilai sudut geser berdasarkan variasi energi pemadatan terhadap dinyatakan pada Tabel 6 untuk sampel tanah Desa Pene, dan Tabel 7 untuk sampel tanah Desa Konbaki.

Tabel 6. Peningkatan Kohesi dan Sudut Geser sampel Tanah Pene

Sampel	Jumlah pukulan	Jumlah lapisan	Energi pemdatan (kg/cm2)	Kohesi (kg/cm2)	Peningkatan Kohesi	Sudut geser (˚)	Perubahan sudut geser (%)
E1	25	3	6.068	0.11	-	61.56	-
E2	29	3	7.039	0.38	3.5	36.93	40.0
E3	29	4	9.386	0.36	3.3	39.87	35.2
E4	29	4	11.250	0.27	2.5	49.70	19.3
E5	25	5	12.123	0.17	1.5	54.22	11.9
E6	29	5	14.063	0.55	5.0	41.27	33.0
E7	25	5	27.277	0.19	1.7	56.34	8.5

Tabel 7. Peningkatan Kohesi dan Sudut Geser sampel Tanah Konbaki

Sampel	Jumlah pukulan	Jumlah lapisan	Energi pemdatan (kg/cm2)	Kohesi (kg/cm2)	Peningkatan Kohesi	Sudut geser (˚)	Perubahan sudut geser (%)
E1	25	3	6.068	0.21	-	52.96	-
E2	29	3	7.039	0.36	1.7	38.05	28.2
E3	29	4	9.386	0.30	1.4	44.76	15.5
E4	29	4	11.250	0.28	1.3	51.15	3.4
E5	25	5	12.123	0.17	0.8	58.27	10.0
E6	29	5	14.063	0.42	2.0	55.23	4.3
E7	25	5	27.277	0.31	1.5	52.29	1.3

Tabel 4.8 untuk tanah Pene menujukan besaran nilai perubahan kohesi terhadap E1 yang cenderung mengalami penurunan seiring dengan peningkatan energi, kemudian untuk nilai perubahan sudut geser terhadap E1 juga mengalami penurunan. Tabel 4.9 untuk tanah Konbaki menunjukan besaran nilai perubahan kohesi terhadap E1 yang juga cenderung mengalami penurunan seiring dengan peningkatan energi, kemudian untuk nilai perubahan sudut geser terhadap E1 juga mengalami penurunan.

Maka dapat dikatakan bahwa perubahan energi pemadatan tidak berpengaruh terlalu besar terhadap nilai kohesi dan sudut geser tanah untuk jenis sampel tanah dari desa Pene dan Konbaki.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, perubahan energi pemadatan tanah Desa Pene dan Desa Konbaki terdahap pengaruh pemadatan dan kekuatan geser tanah, dapat disimpulkan :

1. Tanah Pene memiliki nilai kadar air 37.86%, nilai berat jenis tanah 2.64, nilai batas cair 35.92%, nilai batas plastis 26.11%, nilai batas susut 9.49% dan nilai indeks plastisitas 9.81%. Gradasi butiran tanah 69.80% lolos saringan No. 200. Hasil pengujian permeabilitas memiliki nilai $3.06x10^{-5}$ cm/detik. Dalam klasifikasi AASHTO tanah ini termasuk ke dalam kelompok A-4 (6) dengan penilaian sebagai bahan tanah dasar biasa sampai jelek, dan dalam klasifikasi USCS tana ini termasuk dalam kelompok ML yang merupakan jenis lanau anorganik dengan plastisitas rendah. Tanah Pene memiliki berat kering maksimum 0.86 gr/cm^3 pada kadar air optimum 31.28%. Nilai kohesi (c) = 0.07 kg/cm^3 dan susdut geser dalam (ø) = 49.94˚. Tanah Konbaki memiliki nilai kadar air 33.32%, nilai berat jenis tanah 2.68, nilai batas cair 43.26%, nilai batas plastis 34.76%, nilai batas susut 11.80% dan nilai indeks plastisitas 8.51%. Gradasi butiran tanah 70.03% lolos

saringan No. 200. Hasil pengujian permeabilitas memiliki nilai $6.62x10^{-6}$ cm/detik. Dalam klasifikasi AASHTO tanah ini termasuk ke dalam kelompok A-5 (7) dengan penilaian sebagai bahan tanah dasar biasa sampai jelek, dan dalam klasifikasi USCS tana ini termasuk dalam kelompok ML yang merupakan jenis lanau anorganik dengan plastisitas rendah. Tanah Konbaki memiliki berat kering maksimum 0.84 gr/cm^3 pada kadar air optimum 32.12%. Nilai kohesi (c) = 0.05 kg/cm^3 dan susdut geser dalam (ø) = 55.41˚.

2. Pengaruh energi pemadatan dari hasil studi dapat disimpulkan bahwa peningkatan energi pemadatan untuk kompaksi di laboratorium dari energi *standard Proctor* (E1) sebesar 6.068 kg/cm^2 menjadi (E6) sebesar 14.063 kg/cm^2 menaikan *maximum dry density, γdry max* sebesar 59% untuk sampel tanah Desa Pene, dan *γdry max* sebesar 62% untuk sampel tanah Desa Konbaki, dan pemadatan dengan energi berlebihan pada tanah jenis sampel dari kedua desa ini justru akan menurunkan nilai kepadatan keringnya seperti nilai *γdry max* pada (E7) sebesar 23% untuk sampel tanah Desa Pene, dan 31% untuk sampel tanah Desa Konbaki.

3. Pengaruh energi pemadatan terhadap kekuatan geser tanah dari hasil pengujian geser langsung dapat disimpulkan bahwa peningkatan energi pemadatan menghasilkan nilai sudut geser yang semakin menurun dari E1 sebesar 61.56˚ menjadi E7 sebesar 56.34˚ untuk sampel tanah desa Pene, dan E1 sebesar 52.96˚ menjadi E7 sebesar 52.29˚ unutk sampel tanah desa Konbaki. Tingkat kepadatan tanah tergolong agak padat sampai dengan sangat padat karena peningkatan energi menghasilkan nilai sudut geser diantara 36.93˚ – 61.56˚ untuk sampel tanah Desa Pene dan 38.05˚ – 55.23˚ untuk sampel tanah desa Konbaki berdasarkan besaran sudut geser dalam tanah terhadap tingkat kepadatan tanah menurut Bowles (1989).

Daftar Pustaka

Bowles, J. E. (1984). *Sifat-sifat Fisik Dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)* (Edisi 2). Jakarta: Erlangga.

Bowles, J. E. (1991). *Sifat Fisis Dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah) (Edisi I)*. Jakarta: Erlangga.

Das, B. M. (1988). *Mekanika Tanah I. Jakarta: Erlangga. Das, B. M. (1995)*. Mekanika Tanah II. Jakarta: Erlangga.

Das, B. M. (2009). *Mekanika Tanah Dan Prinsip Rekayasa Geoteknik*. Jakarta: Erlangga.

Hardiyatmo, H. C. (1992). *Mekanika Tanah I.* Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C. (2017). *Mekanika Tanah I. Edisi Ketujuh*. Jakarta: Erlangga.

Hazzi, A. A. (2021). *Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Dengan Variasi Serbuk Bata Merah Pada Tanah Lempung Terhadap Parameter Kuat Geser Tanah*. Skripsi. Yogyakarta: Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Irawan, C. (2010). *Pengaruh Pemadatan Dengan Proctor Modifikasi Pada Kuat Geser Tanah Gambut Melalui Uji Triaksial Consolidated Undrained*. Skripsi. Depok: Fakultas Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Indonesia.

Mashemi., & Saputra, F. S. (2018). *Analisis Uji Pemadatan Standard Dan Uji Pemadatan Modified Terhadap Nilai Koefisien Permeabilitas Tanah Lempung Berkerikil*. Jurnal Teknik Sipil. TAPAK, Vol 8, No. 1, November, 2018.

Putri, V. S., Rangga. F., Hadiyati. S., & S, W. K. (2017). *Analisa Permeabilitas Zona Inti dan Zona Filter Bendungan Logung*. Jurnal Karya Teknik Sipil. Vol 6, No. 2, Tahun 2017.

Sari, K. I., & Tambunan, L. (2020). *Studi Perbandingan Uji Pemadatan Standar Dan Uji Pemadatan Modified Terhadap Tanah Dari Jalan Pertahanan - Patumbuk Yang Dicampur Kapur*. JCEBT, 4 (1) Maret, 2020.

Sembiring, N., Iswan., & Jafri, M. (2016). *Studi Perbandingan Uji Pemadatan Standar dan Uji Pemadatan Modified Terhadap Nilai Koefisien Permeabilitas Tanah Lempung Berpasir*. JRSDD, Vol. 4, No. 3, Edisi September, 2016.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1987). Mekanika Tanah Dalam Praktek Rekayasa. Jakarta: Erlangga.

Utami, W., Setyanto., & Sulistyorini, R. (2019). *Korelasi Uji Pemadatan Standard Proctor Method Terhadap Pengujian CBR Laboratorium Berdasarkan Alat Uji Tekan Modifikasi di Laboratorium Untuk Pemadatan Tanah di Lapangan*. JRSDD, Vol 7, No, 1, Edisi Maret, 2019.

Wijatmiko, E. I. Ir., Dr. (2013). *Bendungan Urugan I*. Bahan Ajar Fakultas Teknik Universitas Islam Malang.

Wesly, L. D. Dr., & Pranyoto S. Ir., Dr. (2010). *Mekanika Tanah, untuk Tanah Endapan dan Residu*. Yogyakarta: Penerbit Andi.

Muda, Anwar (2016). *Model Pendekatan Alat Uji Kepadatan Ringan Untuk Tanah Di Laboratorium.* Jurnal Info Teknik Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional VII Volume 17 No. 1 Juli 2016 (53-68).

Febriana, E., Primanita., & Agustina H., Dian (2021). *Pengaruh Energi Pemadatan Terhadap Kuat Geser Tanah.* Sigma Teknika, Vol. 4, No.2 : 262-266, Edisi November, 2021

Perilaku Sifat Fisik-Mekanik dan Mikrostruktur Tanah Lempung Ekspansif yang Distabilisasi Menggunakan Kapur

Angelina Fitriani Doke Bei

Civil Engineering, NUSA CENDANA University, Kupang
***e-mail**: elsy@staf.undana.ac.id*

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif adalah tanah lempung yang memiliki aktifitas yang tinggi dalam perubahan volume akibat adanya perubahan kadar air. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui mengetahui pengaruh stabilitasi tanah lempung ekspansif menggunakan kapur terhadap sifat fisik-mekanik dan sifat mikrostruktur tanah. Metode yang digunakan dalam penelitian ini ialah metode eksperimental, dimana tanah dicampur dengan kapur pada variasi campuaran kapur 0 % (TA) , 3 %(V1) , 6 % (V2), dan 9 % (V3), kemudian dilanjutkan dengan uji sifat fisik-mekanik dan mikrostruktur. Hasil pengujian menunjukkan penurunan nilai indeks plastisitas, dan potensi pengembangan Seiring penambahan kapur dengan potensi pengembangan terendah pada V3 yaitu 0,395% . Sedangkan untuk nilai batas susut dan berat volume kering maksimum tanah mengalami peningkatan. Pengujian XRD dan SEM menunjukkan penurunan mineral montmorillonite dari 45,4 % menjadi 39,9 % serta perubahan strukktur menjadi struktur kristal, dan ukuran partikel tanah lebih besar akibat adanya rekasi pozzolanic. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan 9% kapur pada tanah lempung ekspansif dapat meningkatkan daya dukung tanah untuk tanah dasar pada suatu konstruksi.

Kata kunci: stabilisasi tanah lempung ekspansif, sifat fisik-mekanik, sifat mikrostruktur, kapur

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung yang menunjukkan aktivitas yang cukup besar dalam perubahan volume sebagai akibat dari variasi kadar air dikenal sebagai tanah lempung ekspansif. Mineral utama di tanah ini adalah montmorillonite, yang berpotensi memiliki pengembangan tinggi hingga sangat tinggi yang dapat menurunkan stabilitas tanah, sehingga dapat merusak bangunan apa pun yang dibangun di atasnya. Tanah lempung ekspansif, juga dikenal sebagai lempung Bobonaro, yang ditemukan di beberapa lokasi, termasuk Desa Oebelo, Kecamatan Kupang Tengah, Kabupaten Kupang (Hangge, 2017) (Fernandez, 2017). Berdasarkan penelitian Bella, dkk (2015) terdapat 2 tipe kerusakan rumah yang disebabkan karena adanya potensi pengembangan tanah lempung Bobonaro di Desa Oebelo yaitu tipe I (rusak berat) dimana celah retak pada dinding dan lantai ≥ 2 cm, dan tipe II (rusak ringan) dimana celah retak pada dinding dan lantai < 2 cm. Dari permasalahan tersebut, maka perlu adanya stabilisasi pada tanah. Stabilisasi pada tanah merupakan salah satu teknik rekayasa yang bertujuan untuk meningkatkan dan menjaga karakteristik khusus dari tanah, sehingga selalu memenuhi persyaratan teknis yang diperlukan untuk mengoptimalkan kinerja konstruksi seperti kapasitas dukung tanah, penurunan (*settlement*), permeabilitas tanah, plastisitas, kekuatan geser tanah, potensi dan tekanan pengembangan tanah.

Dalam studi ini, penulis menerapkan metode stabilisasi kimia menggunakan kapur sebagai bahan stabilisasi. Penggunaaan kapur untuk stabilisasi tanah dengan penambahan sebesar 2-10 % terhadap berat kering tanah (Departemern Pekerjaan umum, 2005) berdampak pada pengurangan ketebalan lapisan difusi ganda, sehingga meningkatkan gaya tarik di tepi permukaan partikel lempung, seperti yang disebutkan oleh Hilt dan Davidson (1960) dan diacu oleh Adi Prasetijo

(1991). Hal ini menyebabkan partikel-partikel lempung mengalami flokulasi dengan sifat plastisitas rendah, tekstur besar, dan lepas. Pada kondisi kelebihan air, terjadi reaksi isotermal pada tanah selama proses pengeringan, mempermudah pekerjaan tanah. Reaksi berikutnya terjadi setelah flokulasi antara partikel-partikel lempung dan kapur, dilanjutkan dengan reaksi pozzolanic, di mana ion silika (SiO_2) dan alumina (AlO_2) dari mineral lempung bereaksi dengan ion kalsium (C) dari mineral kapur untuk menghasilkan senyawa Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) dan Calcium Aluminate Hydrate (C-S-A-H). Reaksi ini menghasilkan sementasi pada tanah, yang membuatnya menjadi lebih keras, padat, dan kedap air, sehingga meningkatkan stabilitas dan kekuatan tanah. (Hardiyati, 2003). Penambahan kapur pada lempung ekspansif telah diteliti sebelumnya oleh Ranggaesa, dkk (2017) dan Aryanto dkk (2017) dimana hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai batas cair dan indeks plastisitas mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kapur, sedangkan nilai batas plastis dan batas susut mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya kapur. Kenaikan nilai CBR soaked dan unsoaked tertinggi terjadi pada penambahan kapur 8%. Semakin banyak kadar kapur yang ditambahkan maka semakin kecil pengembangan (swelling) yang terjadi. Pada penelitian Zhou, dkk (zhou dkk, 2019) analisis struktur mikro dan komposisi mineral menunjukkan bahwa tanah biasa sebagian besar dalam struktur serpihan dan flokulan dengan pori-pori dan retakan yang jelas. Penambahan fly ash membuat pori-pori dan retakan terisi partikel fly ash dan beberapa produk hidrasi. Setelah penambahan kapur, pertukaran ion, dan reaksi pozzolanic kapur membuat struktur semen tanah dari serpihan dan flokulan menjadi struktur kristal, sehingga meningkatkan kekompakan dan integritas sampel tanah.

Berdasarkan uraian, penulis tertarik untuk melakukan riset tentang penggunaan kapur sebagai bahan stabilisasi pada tanah dasar lempung ekspansif di Desa Oebelo, Kabupaten Kupang untuk mengetahui sejauh mana pengaruh kapur terhadap sifat fisik-mekanik dan mikrostruktur tanah lempung ekspansif, sehingga dapat meminimalisir kerusakan yang dialami oleh konstruksi yang dibangun di atas tanah lempung ekspansif akibat dari kembang-susut tanah.

2. BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampel tanah lempung ekspansif yang diambil pada ruas Jl. Timor Raya Km.21, Desa Oebelo, Kecamatan Kupang Tengah, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur dan kapur sebagai bahan stabilisasi yang dibeli di Jl. Timor Raya no. 9, Oesapa Barat, Kelapa Lima, Kota Kupang. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental, yaitu melalui pengujian di laboratorium pada Bulan Mei 2023- Februari 2024.

Teknik pengambilan data

1. Teknik observasi
   Teknik observasi yaitu teknik pengumpulan data melalui pengujian di laboratorium.
2. Teknik dokumentasi
   Teknik dokumentasi yaitu teknik pengambilan data yang diperoleh dengan mengumpulkan teori-teori, rumus-rumus, dan ketentuan yang relevan dengan materi penelitian dari buku-buku tertentu.
3. Studi literatur
   Studi literatur merupakan teknik pengumpulan data yang didapat melalui teks-teks tertulis berupa buku, e-book, jurnal, makalah dan lainnya.

Tahapan penelitian

1. Pengambilan sampel dan persiapan benda uji
   Sampel tanah lempung ekspansif yang diambil pada ruas Jl. Timor Raya Km.21, Desa Oebelo, Kecamatan Kupang Tengah, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur, tepatnya pada titik koordinat 10°06'38"S dan 123°44'50"E dengan kedalaman ± 50 cm dari permukaan tanah.Sampel tanah terganggu yang telah diambil dijemur dibawah terik matahari selama 3-4 hari. Setelah itu, dihancurkan dan diayak menggunakan saringan no 4, 10 dan 40.
2. Pengujian tanah asli
   Pengujian terlebih dahulu dilakukan pada tanah asli untuk mengetahui sift fisik dan mekanik tanah yang terdiri dari pengujian sifat fisik yang meliputi pengujian kadar ir, berat jenis spesifik (spesific gravity), batas-batas konsistensi (atterberg limit), dan uji distribusi ukuran butiran, serta pengujian sifat mekanik yang terdiri dari pengujian pemadatan standar Proctor, serta pengujian potensi dan tekanan pengembangan tanah.
3. Pembuatan benda uji
   Pembuatan benda uji dilakukan dengan cara mencampurkan tanah lempung ekspansif (tanah asli) dengan kapur sebagai bahan additif sebesar 0%, 3%, 6%, dan 9% terhadap berat kering tanah.

Tabel 1 Variasi campuran tanah asli dan kapur

Jenis Sampel	Label Sampel	Komposisi
Tanah asli	TA	Tanah asli
Variasi 1	V1	Tanah asli + kapur 3 %
Variasi 2	V2	Tanah asli + kapur 6 %
Variasi 3	V3	Tanah asli + kapur 9 %

4. Pengujian sifat fisik dan mekanik tanah setelah dsitabilisasi
   Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat fisik dan mekanik tanah setelah dicampur dengan kapur. Yang terdiri dari :
   A. Pengujian sifat fisik tanah
      a. Pengujian kadar air (ASTM D 2216-98)
      b. Pengujian berat jenis (ASTM-854-02)
      c. Pengujian analisis saringann (ASTM D 422-63)
      d. Pengujian hidrometer (ASTM D 442-63)
      e. Pengujian atterberg limit :
         - Pengujian batas cair (ASTM D 4318-00)
         - Pengujian batas plastis (ASTM D 4318-00)
         - Pengujian batas susut (ASTM D 427-98)
   B. Pengujian sifat mekanik tanah
      a. Pengujian pemadatan standar Proctor (ASTM D 698-00)
      b. Pengujian potensi pengembangan dan tekanan pengembangan tanah (ASTM D 4546-96)
   C. Pengujian pemadatan standar Proctor dilakukan pada campuran dari tanah asli dengan kapur dengan beberapa variasi tertentu. Kemudian hitung kadar air optimum dan berat volume kering maksimumnya.
   D. Pengujian potensi dan tekanan pengembangan diambil 1 sampel dari tiap variasi yang didasarkan pada pengujian pemadatan standar Proctor yang memiliki nilai kadar air optimum dan berat volume kering maksimum.

Tabel 2 Jumlah sampel pengujian sifat fisik-mekanik

No	Jenis Sampel	Pemadatan Standar	Potensi dan Tekanan Pengembangan (Pemeraman 7 hari)
1	Tanah asli (TA)	2	2
2	Variasi 1 (V1)	2	1
3	Variasi 2 (V2)	2	1
4	Variasi 3 (V3)	2	1
Jumlah		8	5
Jumlah Keseluruhan		13	

5.Pengujian sifat mikrostruktur
Pengujian sifat mirkostrukutr terdiri dari pengujian SEM dan Pengujan XRD

Tabel 3 Jumlah sampel pengujian sifat mikrostruktur

Jenis Pengujian	Jumlah Sampel	Label Sampel	Komposisi
Pengujian XRD	2	TA	Tanah asli
		V3	Tanah asli + 9% kapur
Pengujian SEM	2	TA	Tanah asli
		V3	Tanah asli + 9% kapur

Dalam pengujian XRD, terdapat dua sampel, yaitu tanah asli dan tanah yang telah distabilisasi. Sampel untuk pengujian XRD pada tanah yang distabilisasi diambil dari hasil pengujian potensi dan tekanan pengembangan terkecil dari tiga variasi benda uji, khususnya sampel variasi 3 dengan komposisi tanah dicampur dengan 9% kapur, yang memiliki nilai potensi pengembangan sebesar 0,395 % dan tekanan sebesar 69,06 kPa. Sama halnya, dalam pengujian SEM.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik tanah asli dan tanah yang distabilisasi

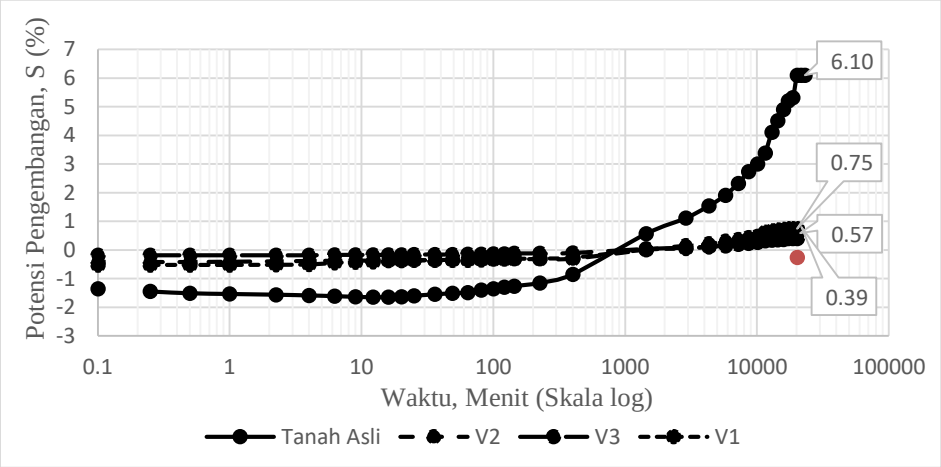
Tabel 4 Karakteristik tanah asli dan tanah yang distabilisasi

Pengujian	Tanah Asli	Tanah Asli (TA)		
		3% KA (V1)	6% KA (V2)	9% KA (V3)
Kadar air (w, %)	28,27	-	-	-
Berat spesifik (Gs)	2,69	2,57	2,48	2,39
Batas cair (LL, %)	74,33	65,43	62,26	60,96
Batas plastis (PL, %)	29,50	27,84	26,75	25,80
Batas susut (SL, %)	9,84	28,85	35,91	38,39
Indeks plastisitas (PI, %)	44,83	37,59	35,51	35,16
Butiran lolos saringan No. 200 (%)	98,53	94,69	92,92	92,86
Butiran tertahan saringan No.200 (%)	1,47	5,31	7,08	7,14
Kadar air optimum (%)	32,60	31,83	28.54	28,00
Berat volume kering maksimum (g/cm^3)	1,29	1,30	1,35	1,37
Potensi pengembangan (%)	6,10	0,75	0.57	0.39
Tekanan pengembangan (kPa)	355,08	146,04	120, 33	69,06
Tingkat Keaktifan (AC)	3,62	1,50	1,31	0,75

Berdasarkan Tabel. 4, maka tanah lempung ekspansif Desa Oebelo dapat diklasifikasikan berdasarkan sistem USCS, dimana berdasarkan nilai batas cair sebesar 74,33% dan nilai indeks plastisitas tanah sebesar 44,83% maka tanah tergolong dalam lempung anorganik dengan plastisitas tinggi (CH). Selain itu, dalam klasifikasi AASHTO tanah tergolong kelompok A-7-6 (53) dengan tanah berlempung sebagai jenis material yang paling dominan, dan dikategorikan sebagai tanah dasar (*subgrade*) yang jelek. Berdasarkan nilai potensi pengembangan tanah (S = 6,10%), tanah lempung Bobonaro Desa Oebelo dikategorikan kedalam tanah dengan derajat ekspansif tinggi (Seed dkk, 1962 dalam Hardiyatmo, 2002). Berdasarkan hal tersebut maka dapat dipastikan bahwa kerusakan yang terjadi pada Jl. Timor Raya Kilometer 21 Desa Oebelo, Kabupaten Kupang disebabkan oleh perilaku kembang susut tanah lempung ekspansif yang menjadi tanah dasar pada jalan tersebut akibat fluktuasi kadar air selama musim hujan dan musim kemarau.

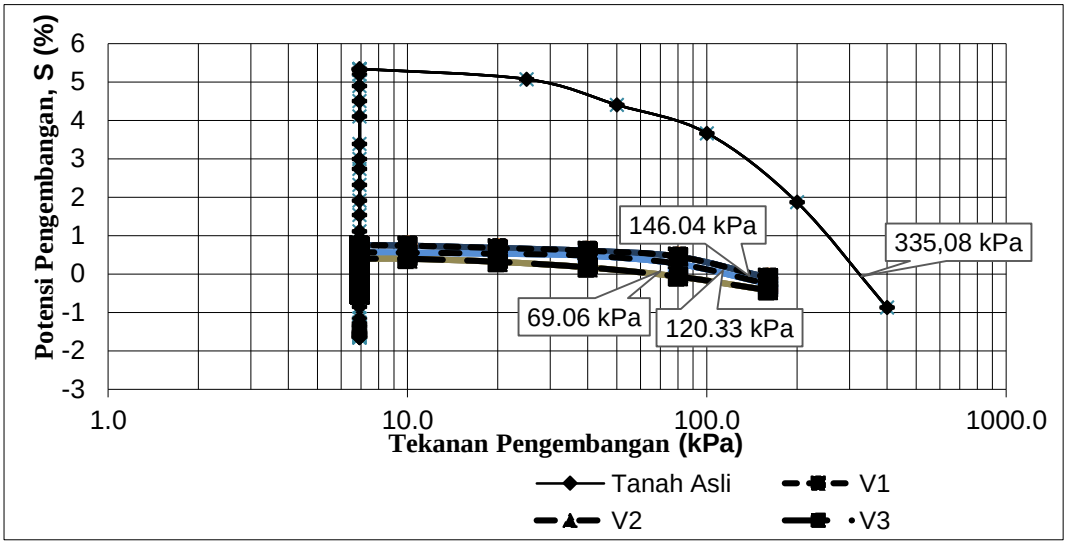
Berdasarkan Tabel 4. Setelah tanah distabilisasi menggunakan kapur, nilai berat jenis spesifik tanah, batas cair tanah, batas plastis tanah, nilai indeks plastisitas tanah, butiran lolos ayakan no 200, nilai kadar air optimum, dan nilai potensi dan tekanan pengembangan tanah mengalami penurunan seiring dengan penambahan persentase kapur 3%, 6%, dan 9% kapur. Besar penurunan yang terjadi berturut-turut pada nilai berat jenis spesifik tanah yaitu 4,46 %, 7,81%, dan 11,15 % terhadap nilai berat jenis spesifik tanah asli. Besar penurunan yang terjadi berturut-turut pada nilai batas cair tanah yaitu 11,97%, 16,24% dan 17,99% terhadap nilai batas cair tanah asli. Besar penurunan yang

terjadi berturut-turut pada nilai batas plastis tanah yaitu 5,63%, 9,32%, dan 12,54% terhadap nilai batas plastis tanah asli. Besar penurunan yang terjadi berturut-turut pada nilai indeks plastisitas tanah yaitu 16,1%, 20,8%, dan 21,6% terhadap nilai indeks plastisitas tanah asli. Besar penurunan yang terjadi berturut-turut pada persentase lolos ayakan no. 200 yaitu 3,84%, 5,7%, dan 5,8% terhadap persentase lolos ayakan no. 200 tanah asli. Besar penurunan yang terjadi berturut-turut pada nilai kadar air optimum yaitu 2,81%, 12,85%, dan 14,50% terhadap nilai kadar air optimum tanah asli. Hal tersebut disebabkan karena sifat kapur yang dapat memancarkan panas akibat proses hidrasi dan adanya reaksi kimia antara kapur dan tanah membentuk gel kalsium silikat yang merekatkan partikel tanah. Gel kalsium silikat bereaksi dengan melapisi dan merekatkan partikel lempung serta menutup pori-pori tanah, yang menyebabkan air sulit teradsorbsi sehingga dapat menurunkan nilai batas cair, batas plastis, dan nilai kadar air optimum tanah, memperkecil nilai indeks plastisitas tanah, serta mengurangi persentase partikel yang lolos saringan no.200 karena perubahan ukuran partikel tanah menjadi lebih besar akibat penambahan kapur. Perubahan ini juga mengakibatkan penurunan kohesi partikel tanah (Ranggaesa dkk, 2017). Sedangkan untuk nilai batas susut dan berat volume kering maksimum mengalami peningkatan dengan besar peningkatan yang terjdi berturut-turut pada nilai batas susut yaitu 3,9 kali, 4,6 kali, dan 4,9 kali terhadap nilai batas susut tanah asli. Besar peningkatan yang terjadi berturut-turut pada nilai berat volume kering maksimum tanah yaitu 1,30 gr/cm³, 1,35 gr/cm³, dan 1,37 gr/cm³ terhadap nilai berat volume kering maksimum tanah asli. Hal ini disebabkan karena terjadinya reaksi *pozzolanic*, yang meningkatkan adhesi antara butiran tanah dan kapur yang menjadikan tanah yang lebih padat dan kokoh. Keadaaan inilah yang menyebabkan peningkatan nilai berat volume kering maksimum yang siginifikan (Ranggaesa dkk, 2017).



Gambar 1 Pengaruh Penambahan Variasi Kapur 3%, 6%, Dan 9% Terhadap Nilai Potensi Pengembangan Tanah Asli

Berdasarkan Gambar 1, tanah asli memiliki nilai potensi pengembangan sebesar 6,10 %. Seiring dengan peningkatan variasi kapur 3%, 6% dan 9% dengan pemeraman selama 7 hari terjadi penurunan nilai potensi pengembangan dengan besar penurunan berturut-turut 87,70%, 90,72%, dan 93,52 terhadap nilai potensi pengembangan tanah asli. Hal terjadi karena adanya flokulasi setelah penambahan kapur dan pertukaran kation. Pertukaran kation yang terjadi melibatkan ion kalsium yang berasal dari terurainya $Ca(OH)_2$ yang bereaksi dengan air dan kation monovalen natrium, mengakibatkan terbentuknya reaksi pozzolan membentuk senyawa kalsium silikat hidrat dan kalsium aluminat hidrat yang dapat melapisi dan mengikat partikel lempung menjadi partikel yang lebih besar serta mengisi rongga tanah, yang menyebabkan air sulit teradsorbsi sehingga dapat menurunkan nilai potensi pengembangan tanah. Semakin besar ukuran partikel, maka luas permukaan spesifik semakin kecil, sehingga proses penyerapan air pun berkurang (Hardiyati, 2003).

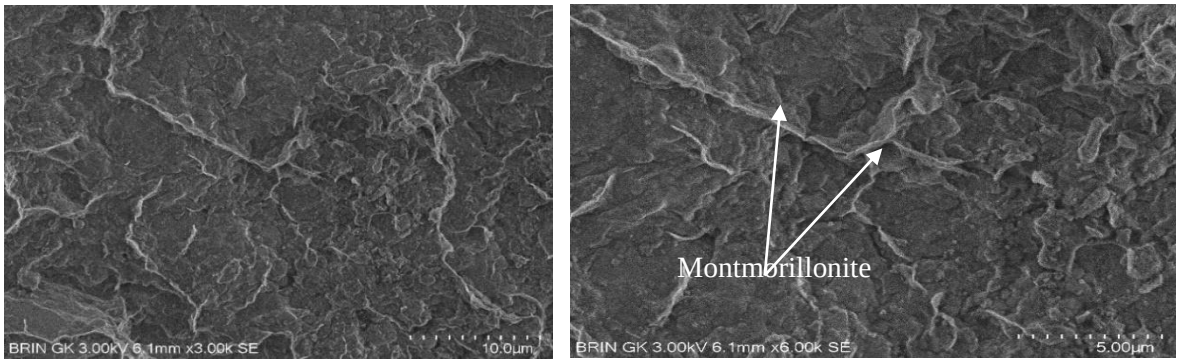


Gambar 2 Pengaruh Penambahan Variasi Kapur 3%, 6%, Dan 9% Terhadap Nilai Tekanan Pengembangan Tanah Asli

Berdasarkan Gambar 2, besarnya nilai tekanan pengembangan tanah asli sebesar 335,08 kPa. Seiring dengan penambahan kapur 3%, 6%, dan 9% tekanan yang diberikan mengalami penurunan sebesar 146,04 kPa, 120, 33 kPa, dan 60,06 kPa. Hal ini sebanding dengan nilai potensi pengembangan tanah, dimana jika suatu tanah memiliki potensi pengembangan yang besar maka tekanan yang diberikan ke tanah untuk kembali ke tinggi awal (h_0) juga besar, begitupun sebaliknya, jika suatu tanah memiliki potensi pengembangan yang semakin kecil maka tekanan yang diberikan ke tanah untuk kembali ke tinggi awal (h_0) juga semakin kecil.

Hasil pengujian sifat mikrostruktur tanah asli

Hasil pengujian SEM



(a) (b)

Gambar 3 Hasil Pengujian SEM Tanah Asli (a) 3.000x, (b) 6.000x

Berdasarkan Gambar 3. hasil pengujian menunjukkan adanya serpihan tanah lempung montmorillonite yang banyak, yang ditandai dengan lapisan tanah yang berlapis dan bertumpuk. Semakin diperbesar gambarnya, maka terlihat pori-pori dan retakan yang jelas antara partikel tanah. Hal ini yang menyebabkan tanah mengalami perubahan volume yang sangat signifikan. Ketika tanah mengadsorbsi air, partikel-partikel tanah akan membengkak menyebabkan tanah mengembang, dan sebaliknya ketika kehilangan air tanah akan menyusut (Das, 1995).

Hasil pengujian XRD

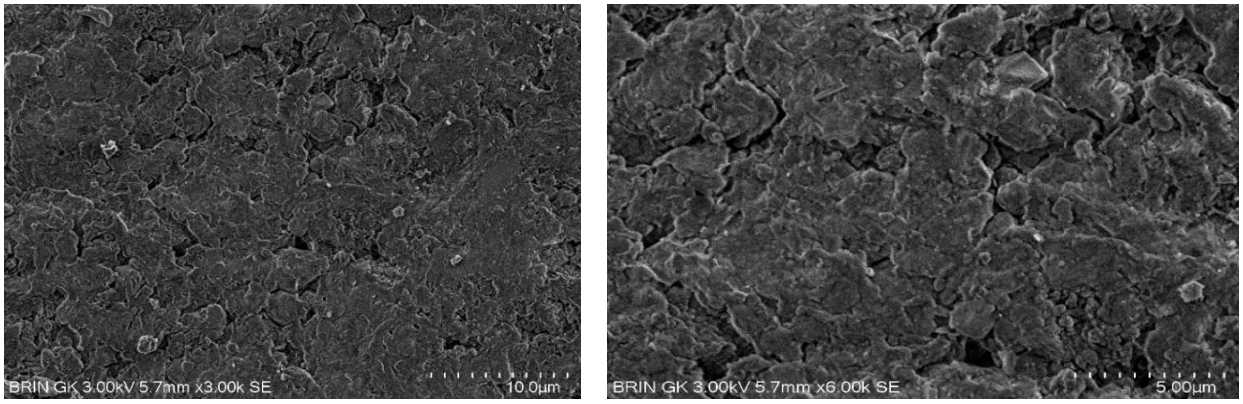
Tabel 5 Komposisi mineral lempung ekspansif

Jenis Mineral	Kandungan Mineral (%)
Quartz alpha	44,0
Monmorillonite	45,4
Calcite	10,0

Menururt Seed dkk, tanah yang diklasifikasikan sebagai tanah lempung ekspansif dengan potensi pengembangan yang sangat tinggi, jika persenatse lempung *montmorillonite* > 35% dari total komposisi mineralnya. (Sudjianto, 2009).

Hasil pengujian sifat mikrostruktur tanah yang distabilisasi

Hasil pengujian SEM



(a) (b)

Gambar 4 Hasil Pengujian SEM Tanah yang Distabilisasi (a) 3.000x, (b) 6.000x

Berdasarkan Gambar 4 pengujian SEM tanah yang distabilisasi menunjukkkan perbedaan dengan struktur SEM tanah asli. Pada Gambar 4.13, menunjukkan bahwa berkurangnya struktur yang berlapis, menyebabkan tanah yang semakin padat, dan berkurangnya rongga tanah. Hal ini diakibatkan oleh adanya flokulasi antara partikel tanah lempung ekspansif dan kapur membentuk reaksi pozzolan yang memiliki ikatan antara kapur (CaO) yang berekasi dengan komponen silika (SiO_2) dan alumina (AlO_2) dalam tanah lempung ekspansif menghasilkan senyawa kalsium-silikat hidrat (C-S-H) dan senyawa kalsium aluminat hidrat (C-S-A-H) membentuk pasta semen (hydrate gel) yang memiliki sifat perekat sehingga mampu mengikat partikel- partikel tanah, yang membuat tanah yang sebelumnya memiliki struktur yang berlapis dengan flokulan antara partikel tanah lempung ekspansif, menjadi struktur yang kristal dan padat. (Zhou dkk, 2019)

Hasil pengujian XRD

Tabel 6 Komposisi mineral lempung ekspansif yang telah distabilisasi

Jenis Mineral	Kandungan Mineral (%)
Quartz alpha	39,0
Monmorillonite	39,9
Calcite	13,2
portlandite	7,8

Dari Tabel 6. dapat dilihat bahwa untuk kandungan mineral montmorillonite mengalami penurunan dari tanah asli ke tanah yang telah distabilisasi. Hal ini disebabkan oleh Kapur (CaO) bereaksi dengan komponen silika (SiO_2) dan alumina (AL_2O_3) dalam tanah lempung ekspansif menghasilkan senyawa kalsium-silikat hidrat (C-S-H) dan senyawa kalsium-aluminat hidrat (C-S-A-H) yang memiliki sifat perekat, yang menyebabkan tanah menjadi padat. Selain itu, adanya proses hidrasi kapur yang disebabkan karena adanya reaksi kapur (CaO) dengan air (H_2O) membentuk

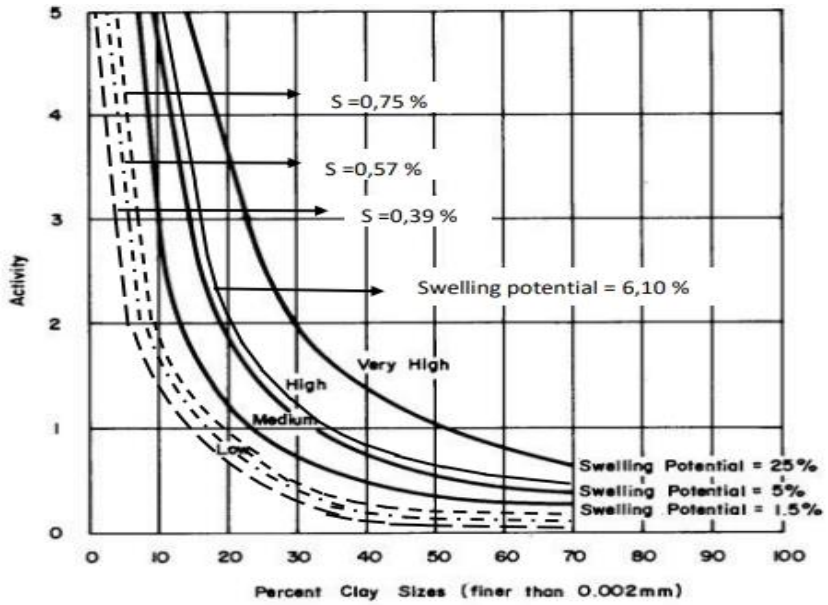
kalsium-hidroksida ($Ca(OH)_2$) atau membentuk kandungan mineral portlandite berupa pembentukan senyawa kalsium karbonat (batu kapur) di sekitar butiran-butiran tanah yang membantu mengikat partikel-partikel tanah bersama-sama, meningkatkan stabilitas tanah, dan mengurangi erosi tanah, serta membantu mengendalikan potensi pengembangan tanah lempung ekspansif dan meningkatkan kekuatan tanah. (Zhou dkk, 2019)

Identifikasi tanah ekspansif secara tidak langsung dan langsung

Identifikasi secara tidak langsung

a. Nilai indeks plastisitas dan batas susut
   Berdasarkan Tabel 4 tanah asli dan yang distabilisasi menggunakan kapur sebesar 3%, 6%, dan 9% tergolong dalam tanah lempung kohesif dengan sifat plastisitas tinggi karena memiliki nilai indeks plastisitas lebih besar dari 17%, serta tergolong dalam derajat mengembang dengan kategori kritis karena memiliki nilai batas susut lebih kecil dari 10%, namun setelah distabilisasi menggunakan kapur sebesar 3%, 6%, dan 9% dengan nilai batas susut berturut-turut 28,85 %, 35,91 %, 38,39 % tergolong dalam kategori tidak kritis (>12%).
b. Tingkat keaktifan
   Berdasarkan Tabel 4 menurut Sekmpton (1953) dalam (Pd T-10-2005-B) Tanah asli, Penambahan 3% kapur dan 6% kapur memiliki tingkat keaktifan yang aktif, karena nilai tingkat keaktifan lebih besar dari 1,25 sehingga tergolong dalam potensi pengembangan tanah yang tinggi. Sedangkan pada penambahan 9% kapur memiliki tingkat keaktifan normal karena nilai tingkat keaktifan diantara 0,71-1,25 sehingga tergolong dalam potensi pengembangan tanah yang sedang.
c. Kandungan mineral
   Pengujian hasil XRD tanah asli dan tanah yang distabilisasi pada Tabel 5 dan Tabel 6, menunjukkan bahwa kandungan mineral montmorillonite tanah asli sebesar 45,4 % mengalami penurunan menjadi 39,9 % setelah distabilisasi menggunakan kapur. Penunuranan ini menujukkan pengaruh positif terhadap kestabilan tanah, karena semakin kecil nilai kandungan mineral montmmorilinite dalam tanah, tanah menjadi semakin baik sebagai dasar dari sebuah konstruksi.

Identifikasi secara langsung



Gambar 5 Tingkat Potensi Pengembangan Tanah

Berdasarkan hasil pengujian, tanah asli memiliki nilai potensi pengembangan sebesar 6,10%, sedangkan untuk tanah yang telah distabilisasi dengan penambahan variasi kapur 3%, 6%,dan 9% menunjukkan nilai berturut-turut 0,75%, 0,57% dan 0,39% (dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 1). Berdasarkan Tabel 4 (Seed dkk, 1962 dalam Hardiyatmo, 2002) dan Gambar 3 tanah asli tergolong dalam derajat ekspansif yang tinggi dengan potensi pengembangan berada pada rentang 5,0- 25 %. Namun, setelah tanah distabilisasi menggunakan kapur dengan persentase kapur 3%, 6% dan 9%, tanah tergolong dalam derajat ekspansif yang rendah dengan potensi pengembangan berada pada rentang 0-1,5%. Hal ini menunjukkan bahwa stabilisasi tanah lempung Bobonaro menggunakan kapur dapat mengurangi potensi dan

tekanan pengembangan tanah. Hal ini dapat mengurangi kerusakan pada jalan yang disebabkan oleh potensi dan tekanan pengembangan pada tanah dasar, sehingga kerusakan tersebut dapat diminimalisir.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, pengaruh stabilisasi tanah lempung ekspansif dari Desa Oebelo, dengan penambahan variasi kapur sebanyak 3%, 6%, dan 9% terhadap berat kering tanah asli, menunjukkan bahwa stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan kapur mempengaruhi sifat fisik-mekanik tanah. Tanah asli dan tanah yang distabilisasi diklasifikasikan sebagai lempung non-organik dengan plastisitas tinggi (CH) menurut sistem klasifikasi USCS, dan sebagai tanah berlempung dalam kelompok A-7-6 menurut sistem klasifikasi AASHTO. Penambahan kapur mengakibatkan penurunan nilai berat jenis tanah, batas cair, batas plastis, indeks plastisitas, dan persentase lolos ayakan no. 200, kadar air optimum, serta potensi dan tekanan pengembangan tanah, sementara batas susut dan berat volume kering maksimum meningkat. Dari segi mikrostruktur, pengujian SEM menunjukkan bahwa tanah asli memiliki struktur bersisik dan berflokulan dengan pori-pori yang jelas, dan setelah distabilisasi dengan 9% kapur terjadi perubahan struktur, yaitu pori-pori dan retakan pada tanah asli sudah terisi dengan partikel kapur dan beberapa produk terhidrasi. Pengujian XRD menujukkan hasil bahwa tanah asli mengandung 45,4% montmorillonite sebagai mineral dominan, dan terjadi penurunan menjadi 39,9% setelah stabilisasi dengan 9% kapur diikuti dengan penambahan mineral lain seperti Quartz alpha, calcite, dan portlandite. Pada pengujian tingkat potensi pengembangan tanah berdasarkan identifikasi tidak langsung, menunjukkan bahwa tanah asli memiliki potensi pengembangan tinggi dengan kandungan montmorillonite 45,4%, dan setelah stabilisasi potensi pengembangannya menurun menjadi kategori tidak kritis dengan kandungan montmorillonite 39,9%. Sedangkan berdasarkan identifikasi langsung melalui pengujian potensi pengembangan tanah, tanah asli yang awalnya memiliki potensi pengembangan tinggi (6,102%) berubah menjadi tanah dengan derajat ekspansif rendah setelah penambahan kapur 3%,6%, dan 9% dengan nilai potensi pengembangan berturut-turut sebesar 0,75% 0,56% dan 0,39%. Hasil ini menunjukkan dampak positif terhadap kestabilan tanah, di mana rekomendasi untuk stabilisasi tanah lempung ekspansif di Desa Oebelo adalah menggunakan variasi kapur 9%, karena memiliki nilai potensi dan tekanan pengembangan yang paling rendah.

DAFTAR PUSTAKA

Aryanto, Muhardi., Suhendra., & Amalia, K. Rizky (2021). *Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Kapur Tohor*. Jurnal Talenta Sipil, Vol. 4 (1), 38-43

ASTM Internasional (19996). Standard Test Method for One-Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soils (ASTM D 4546-96). United State.

ASTM Internasional (1998). Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (ASTM D 2216). United State.

ASTM Internasional (2000). Standard Test Method for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standard Effort (ASTM D 698). United State.

ASTM Internasional (2000). Standard Test Method Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM D 4318). United State.

ASTM Internasional (2002). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (ASTM D 442). United State.

ASTM Internasional (2002). Standard Test Method for Spesific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM D 854). United State.

Bella, R. A., Bunganaen, W., & Sogen, P. M (2015). *Identifikasi Kerusakan Konstruksi Akibat Potensi Pengembangan Tanah Lempung Ekspansif di Desa Oebelo*. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 4 (2)

Das, Braja M (1995). Mekanika Tanah (Prinsi-prinsip Rekayasa Geoteknis). Erlangga, Jakarta

Fernandez,G. J. W (2017). *Kajian Karakteristik Lempung Bobonaro di Provinsi Nusa Tenggara Timur.* Jurnal Jalan dan Jembatan, Vol.24(1), 1-17

Hangge, E. E (2017). Pengaruh Kadar Air pada Potensi Pengembangan Lempung Oebelo. Prosiding Seminar Nasional Teknik FST Undana 2017. 4-05 November 2017. Kupang, Indonesia. 415-422.

Hangge, E. E ., Bela, Romiyati A ., & Ullu, Martha C (2021). *Pengaruh Stabilisasi Tanah lempung Ekspansif Menggunakan Kapur, Fly Ash, dan Bottom Ash Terhadap Kapasitas Dukung Tanah*. Jurnal Teknik Sipil,Vol.1(1), 89-102

Hardiyatmo, Hary Christady (2002). Mekanika Tanah 1.Gajah mada University Press, Yogyakarta.

Hardiyatmo, Hary Christady (2019). Mekanika Tanah 1.Gajah mada University Press, Yogyakarta
Pd T-10-2005-B (2005). Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan. Departemen Pekerjaan Umum.
Ranggaesa, R. Abeng., Zaika, Yulvi.,Suroso (2017). *Pengaruh Kapur Terhadap Kekuatan dan Pengembangan (Swelling) Pada Tanah lempung Ekspansif Bojonegoro*. Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil, Vol,4(1), 1-7
Sudjianto, A.T., Suryolelono, K.B., Rifa'i, A., Mochtar, I.B (2009). "Behavior of Expansive Clay of Ngawi Region (East java) Under Water". Civil Engineering Dimension, Vol 11(2) , 100-105

Zhou, Sheng-quan., Zhou, Da-wei., Zhang, Young-fei., & Wang, Wei-jian (2019). "Study on Physical-Mechanical properties And Microsructure of Ekspansive Soil Stabilized with Fly Ash and Lime".

INTERAKSI SIMULTAN BEBAN AXIAL-LATERAL PADA PONDASI TIANG TUNGGAL

Sumiyati Gunawan[1*], Vienti Hadsari[1], Oktoditya Ekaputra[1] dan Christin Sri Hastuti[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Daerah Istimewa Yogyakarta
***e-mail**: sumiyati.gunawan@uajy.ac.id* *
e-mail: vienti.hadsari@uajy.ac.id
e-mail: oktoditya.putra@uajy.ac.id
e-mail: christin.hastuti@uajy.ac.id

ABSTRAK

Pondasi tiang adalah salah satu bentuk struktur bawah dalam konstruksi sipil. Aplikasi di lapangan, pondasi tiang mendukung beban axial dari berat struktur dan lateral dari angin, gempa bumi, atau tekanan tanah lateral secara bersamaan. Perilaku pondasi tiang di bawah beban axial dan lateral secara terpisah banyak dipelajari, interaksi antara kedua jenis beban ini masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa bagaimana beban axial mempengaruhi daya dukung lateral pondasi tiang tunggal, dan sebaliknya. Penelitian ini akan menganalisa secara eksperimental laboratorium dan dibandingkan dengan teori *Reese Matlock* 1956, penurunan vertikal dan perpindahan horisontal pada pondasi tiang tunggal, akibat pembebanan axial dan lateral yang bekerja simultan. Uji eksperimental model skala laboratorium, yaitu berupa kotak uji dengan ukuran (90x90x100) cm^3 yang diisi dengan *sample* tanah *silty sand* sebagai gambaran kondisi di lapangan, sedangkan pondasi tiang tunggal menggunakan baja dengan ukuran panjang 60,0cm dan 50,0cm serta diameter 2,0cm dan 1,5cm dengan variasi beban axial dan beban lateral serta kombinasi beban simultan. Hasil penelitian mencatat bahwa pembebanan lateral tanpa beban axial, tidak menyebabkan penurunan vertikal, dan sebaliknya. Kombinasi beban simultan menambah daya dukung lateral dan mengurangi daya dukung axial.

Kata kunci: beban-axial-lateral, perpindahan-vertikal-horisontal, daya-dukung-pondasi-tiang

1. PENDAHULUAN

Pondasi adalah struktur bangunan paling dasar yang meneruskan beban struktur atas ke tanah dasar untuk dukungannya. Pondasi tiang menopang beban bangunan ke lapisan tanah dalam yang cukup kuat untuk mendukung beban. Beban pondasi tiang tidak hanya beban aksial (vertikal) saja, tetapi pondasi tiang juga menerima beban lateral (horisontal) yang dapat berasal dari angin, gempa, atau beban tidak simetris dari struktur atas. Interaksi antara beban aksial dan lateral ini secara signifikan mempengaruhi daya dukung, deformasi, dan stabilitas tiang.

Beban axial dan lateral, walaupun seringkali bekerja bersamaan pada pondasi tiang, namun umumnya dianalisa secara terpisah - atau tidak bersamaan - dengan terlebih dahulu menganalisis beban aksial untuk menentukan kapasitas dukung axial dan penurunannya, kemudian menganalisis beban lateral untuk menentukan kapasitas dukung lateral dan defleksinya. Demikian juga pada percobaan pembebanan di Indonesia, umumnya tidak dilaksanakan secara bersamaan, tetapi dilaksanakan secara *independent*, meskipun telah ada peraturan dalam (ASTM D3966 2013), tentang *simultant loading test*, yang menjelaskan tentang test pembebanan di lapangan dengan kombinasi beban simultan.

Interaksi simultan antara beban aksial dan lateral pada pondasi tiang tunggal merupakan fenomena kompleks yang mempengaruhi perilaku tiang secara keseluruhan. Beban aksial akan meningkatkan daya dukung lateral pondasi tiang, sedangkan beban lateral cenderung menambah penurunan daya dukung vertikal.

Penelitian ini menyajikan hasil eksperimen di laboratorium yang bertujuan menganalisis efek pembebanan axial dan lateral yang bekerja secara simultan dan pengaruhnya terhadap penurunan vertikal dan perpindahan horisontal pada pada pondasi tiang tunggal. Selanjutnya, teori *Reese & Matlock* (1956) akan digunakan sebagai pembanding dari analisis tersebut.

2. TINJUAN PUSTAKA

Penelitian (Ibrahim, et al 2018) menunjukkan bahwa defleksi akibat gaya horisontal lebih kecil akibat pondasi tiang yang mendapat beban vertikal, dibandingkan dengan pondasi tiang yang tidak mendapat beban vertikal..

(C. Anagnostopoulos 1993) mengemukakan bahwa pembebanan horisontal murni tidak menyebabkan pergerakan penurunan vertikal, tetapi untuk kombinasi beban, beban horisontal menambah pergerakan penurunan vertikal.

Penelitian (Suryadi, et al 2016) menyajikan hasil pengujian pendahuluan terhadap pasir yang digunakan dalam penelitian maka pasir digolongkan dalam klasifikasi *Poorly Graded Sand* (SP). Pengujian utama terdiri dari beberapa variasi tiang dan beberapa variasi pembebanan dengan beberapa metode menunjukan peningkatan daya dukung lateral pondasi tiang seiring bertambahnya beban vertikal.

(Zhu et al. 2017) menganalisis pengaruh beban vertikal pada kapasitas dukung lateral tiang pada beban gabungan. Kapasitas dukung lateral utama akan berkurang secara signifikan jika tiang yang tertanam dikurangi dan defleksi lateral akan berkurang dengan meningkatnya beban vertikal pada head pile.

(Brown, et al 1989) melakukan uji metode numerik dengan GEOFEM3D dari studi kasus di lapangan (*case study 1*, (E.M. Comodromos 1977)) dan studi kasus di laboratorium (*case study 2*, (Achmus et al 2010)) tentang respon tiang tunggal dengan beban simultan, pada tanah lempung homogen dan tanah berpasir homogen, menunjukkan pengaruh beban aksial pada defleksi horisontal tiang tunggal di tanah berpasir, terlihat bahwa dukungan lateral meningkat seiring bertambahnya beban aksial.

(Khodair et al 2014) menganalisis mengenai studi numerik interaksi tiang-tanah dikenakan beban aksial dan lateral secara bersamaan dengan menggunakan LPILE, elemen hingga (FE) model interaksi tiang-tanah telah dikembangkan menggunakan Abaqus / Cae dan SAP2000 untuk mempelajari efek pembebanan lateral pada tiang yang tertanam di tanah liat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan beban axial, mengurangi momen lentur yang diinduksi dan perpindahan lateral pada tiang dan karenanya meningkatkan kapasitasnya untuk menahan gaya lateral.

(K. Rajagopal 2008) menyajikan beberapa hasil dari analisis elemen hingga tiga dimensi yang menunjukkan pengaruh signifikan beban vertikal dan lateral yang bekerja bersama. Analisis dilakukan di tanah lempung homogen dan tanah berpasir homogen. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaruh beban vertikal pada respons lateral tiang secara signifikan meningkatkan kapasitas di tanah berpasir dan sedikit menurun kapasitas tanah liat. Secara umum, ditemukan bahwa efek beban vertikal pada tanah berpasir adalah signifikan bahkan untuk tiang pancang yang panjang sepanjang 30D, sedangkan untuk tanah lempung, efeknya tidak signifikan untuk tiang di atas panjang 15D.

3. METODOLOGI

a. Model Laboratorium

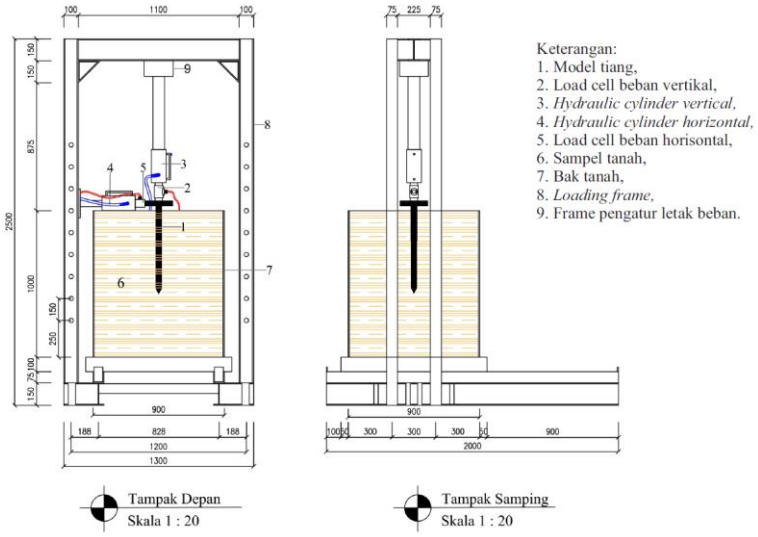
Penelitian ini melaporkan hasil pemodelan skala laboratorium dengan memperhitungkan beberapa variasi pembebanan : 1. Perpindahan horisontal akibat beban lateral, 2. Perpindahan vertikal akibat beban aksial, 3. Perpindahan horisontal akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial, 4. Deformasi sepanjang tiang akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial, dan 5. Pembebanan axial, dengan, dan tanpa beban lateral, serta pembebanan lateral, dengan, dan tanpa beban axial (dijelaskan pada Gambar 4.)

Skala *prototype* dan model dihitung menggunakan Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental sehingga perilaku benda uji skala model yang akan dibuat sesuai dengan perilaku *prototype*nya. Hal ini terlihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Pemodelan di laboratorium

No.	Variabel	Notasi	Satuan	Prototipe	Model
1	Panjang tiang	L_1	meter	18,0	0,600
		L_2	meter	17,0	0,500
2	Diameter tiang	D_1	meter	0,6	0,020
		D_2	meter	0,5	0,015
3	Defleksi horisontal	δy_1	mm	10,0	0,33
		δy_2	mm	10,0	0,29
4	Penurunan vertikal	δx_1	mm	6,0	0,20
		δx_3	mm	6,0	0,20
5	Tinggi box	Z	meter	22,8	Min 0,76
6	Lebar box	B	meter	13,20	Min 0,44
9	Modulus elastisitas beton	E	kN/m^2	2,50E+07	-
10	Modulus elastisitas baja	E	kN/m^2	-	1,00E+08
11	Beban Aksial	V	ton	250,0	0,87
12	Beban Lateral	H	ton	10,0	0,03
13	Momen inersia	I_1	m^4	6,3617E-03	1,4569E-09
		I_2	m^4	3,0680E-03	4,1006E-10

Pemodelan skala di laboratorium dibuat dengan menggunakan kotak uji dengan ukuran (900x90x100) cm^3 yang diisi dengan *sample* tanah lanau pasir (Gambar 1) untuk sedekat mungkin menggambarkan kondisi di lapangan. *Sampel* diambil di dusun Karang, Kalitirto, Berbah, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan parameter tanah pada Tabel 2. Pondasi tiang tunggal dimodelkan dengan menggunakan baja dengan ukuran panjang 60cm dan 50cm, serta diameter 2cm dan 1,5cm (Gambar 2.a.) yang dibebani secara axial, lateral, dan kombinasi beban (Gambar 2.b.).



(a)



(b)

Gambar 1.a. Sket kotak uji

Gambar 1.b. Kotak uji

Tabel 2. Parameter sample tanah eksperimental laboratorium

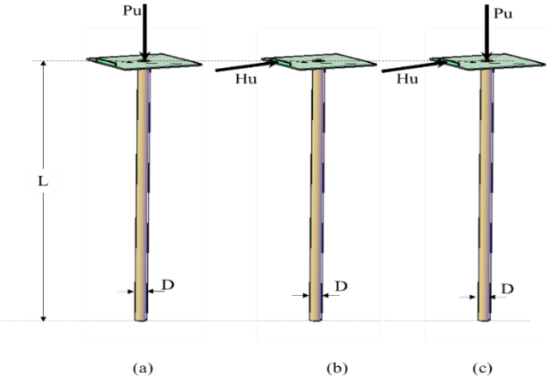
Nama/simbol	BH1 (m)			BH2 (m)			sample kotak uji
	-1,2	-2,2	-3,7	-1,2	-2,2	-4,0	
Water Content (%)	16,78	28,78	24,33	31,50	28,66	22,67	25,45
Specific Gravity G	2,73	2,55	2,56	2,54	2,51	2,61	2,60
Unit weight (kN/m^3)	16,55	17,57	16,50	18,30	17,60	16,00	17,09
Dry unit weight (kN/m^3)	14,17	13,64	13,27	13,92	13,68	13,04	13,62
Saturated unit weight (kN/m^3)	18,79	18,10	17,90	18,25	18,04	17,86	18,19
Void ratio, e	0,89	0,83	0,89	0,79	0,80	0,96	0,87
Poisson Ratio,μ	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Cohesion, c (kN/m^2)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Angle of internal friction, ∅(°)	20,23	17,65	25,47	19,60	18,34	26,50	21,30
Ko=1-sin∅	0,65	0,70	0,57	0,66	0,69	0,55	0,64
σ' (kN/m^2)	19,86	38,65	61,05	21,96	38,72	64,00	-
σ_m (kN/m^2)	15,28	30,84	43,55	17,05	30,60	44,96	-
Relative Density, Dr	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,56
Secant shear Modulus, Gs	1,84E+04	2,33E+04	3,18E+03	1,99E+04	2,29E+04	2,77E+04	1,92E+04
Modulus Young's, E (kN/m^2)	4,78E+04	6,06E+04	8,28E+03	5,18E+04	5,94E+04	7,20E+04	5,00E+04

BH = *bore hole*



(a)

Gambar 2.a. Tiang Baja



(b)

Gambar 2.b. Sket pembebanan tiang tunggal di laboratorium
(a) Beban axial Pu; (b) Beban lateral Hu; (c) Beban simultan axial lateral

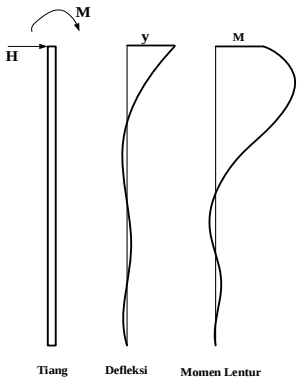
(b) Pembebanan Laboratorium

Penambahan beban aksial Pu pada tiang tunggal dilakukan dengan *interval load* 2500 gr. Hal ini dilakukan dengan penambahan beban axial berangsur angsur dinaikkan hingga runtuh. Kriteria keruntuhan yang dipakai yaitu jika laju penurunan vertikal lebih dari 0,05 mm/10 menit atau lebih dari 0,0125mm/2 menit atau penurunan vertikal terus bertambah tanpa tambahan beban (ASTM D3966 2013).

Penambahan beban lateral, Hu pada tiang tunggal dilakukan dengan *interval load* 500 gr. Hal ini dilakukan dengan penambahan beban lateral berangsur angsur dinaikkan hingga runtuh. Kriteria keruntuhan yang dipakai yaitu jika laju defleksi horisontal lebih dari 0,05 mm /10 menit atau 0,0125 mm/2,5 menit atau hingga *poer* mengalami defleksi horisontal max 5% D (D = Diameter tiang) (ASTM D3966 2013).

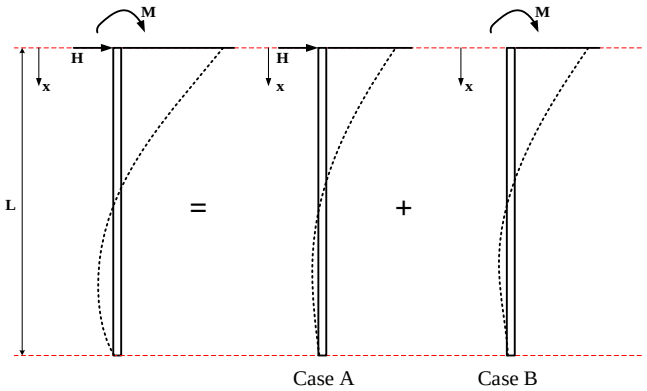
(c) Perilaku tiang terhadap beban horisontal

Eksperimen di laboratorium menganalisis efek pembebanan axial dan lateral yang bekerja secara simultan dan pengaruhnya terhadap penurunan vertikal dan perpindahan horisontal pada pada pondasi tiang tunggal, dibandingkan dengan teori (Reese and Matlock 1956) yang menggunakan analogi balok diatas dukungan elastis seperti pada Gambar 2.3.berikut ini,



(a)

Gambar 3.a. Deformasi tiang akibat beban horisontal H dan momen M, (Reese and Matlock 1956)



(b)

Gambar 3.b. Superposisi akibat H dan akibat M (Reese and Matlock 1956)

Defleksi y(x) merupakan fungsi (H, M, EI,k, Ls, dan T); dimana T adalah faktor kekakuan relatif (T = L/λ); λ adalah bilangan bulat postif. Dengan demikian secara matematis dapat ditulis seperti pada Persamaan 1 berikut,

$$y(x) = F(x, T, Ls, k, EI, H, M) \qquad 1$$

Tiang dan tanah masih dalam keadaan elastis, maka dapat digunakan prinsip superposisi. Dengan demikian, deformasi akibat H dan akibat M dapat dipisahkan, seperti terlihat pada Gambar 2.4.b.

yA adalah defleksi akibat gaya horisontal H, dan yB akibat M, maka: y = yA + yB
Penyelesaian elastis, rasio yA/H dan yB/M adalah faktor penting yang perlu diperhatikan, maka penyelesaian kasus A (akibat H) dan kasus B (akibat M) dapat diekpresikan sebagai Persamaan 2 berikut,

$$(yA/H) = fA(x, T, Ls, k, EI) \text{ dan } (yB/M) = fB(x, T, Ls, k, EI) \quad 2$$

dengan fA dan fB adalah dua buah fungsi berbeda

Pada setiap kasus, ada enam suku dengan dua dimensi yaitu: gaya dan panjang, maka diringkas menjadi 4 buah faktor tidak berdimensi yang tidak saling bergantung, seperti terlihat pada Persamaan 3 dan 4 berikut,

$$Kasus\ A: \left(\frac{y_A.EI}{H.T^3}\right); \left(\frac{x}{T}\right); \left(\frac{L_S}{T}\right); \left(\frac{k.T^4}{EI}\right) \quad 3$$

$$Kasus\ B: \left(\frac{y_B.EI}{M.T^2}\right); \left(\frac{x}{T}\right); \left(\frac{L_S}{T}\right); \left(\frac{k.T^4}{EI}\right) \quad 4$$

Parameter tak berdimensi tersebut dapat diberi simbul dan diberi nama sebagai Persamaan 5 sampai dengan Persamaan 9 berikut ini,

$$\left(\frac{x}{T}\right) = Z.....koefisien..kedalaman \quad 5$$

$$\left(\frac{L_S}{T}\right) = Z_{max} \quad 6$$

$$\left(\frac{k.T^4}{EI}\right) = \varphi(z).....fungsi..modulus..tanah \quad 7$$

$$\left(\frac{y_A.EI}{H.T^3}\right) = A_y....koefisien..defleksi..kasus..A \quad 8$$

$$\left(\frac{y_B.EI}{M.T^2}\right) = B_y....koefisien..defleksi..kasus..B \quad 9$$

Persamaan 5 sampai dengan Persamaan 9, menghasilkan Persamaan 10 sebagai berikut,

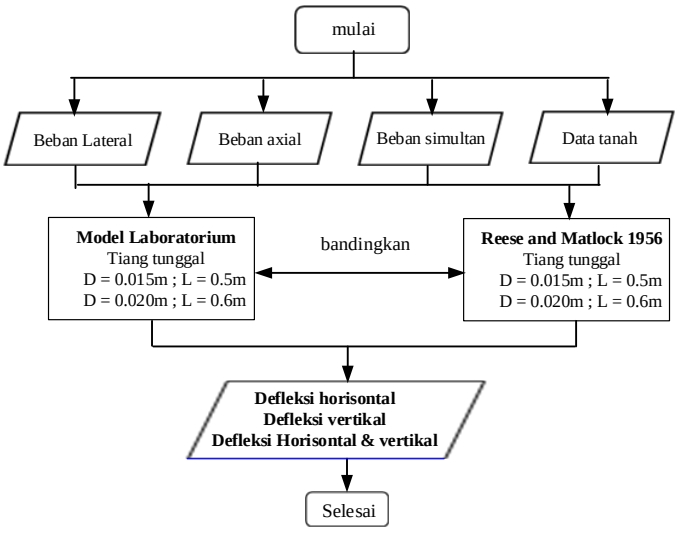
$$y_x = y_A + y_B = A_y\left(\frac{H.T^3}{EI}\right) + B_y\left(\frac{MT^2}{EI}\right) \quad 10$$

Persamaan 11 sampai dengan Persamaan 14, diperoleh dari turunan Persamaan 10 sebagai berikut ini,

$$Slope, Sx = S_A + S_B = A_s\left(\frac{H.T^2}{\text{EI}}\right) + B_s\left(\frac{M.T}{EI}\right) \quad 11$$

$$Momen, M_x = M_A + M_B = A_m(H.T) + B_m(M) \quad 12$$

Koefisien A dan B diselesaikan secara numerik dengan tabel (Reese & Matlock, 1956)



Gambar 4. Flowchart penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

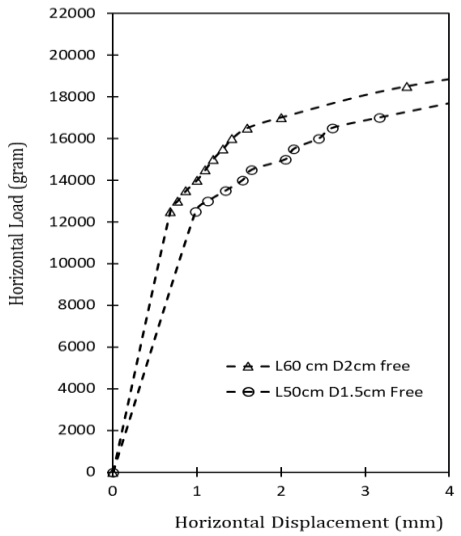
Hasil pembebanan laboratorium pada pondasi tiang tunggal dengan beban independen mencatat perpindahan vertikal dan perpindahan horisontal di kepala tiang, seperti terlihat pada Gambar 5. dan Gambar 6.

Grafik hasil pembebanan independen menunjukkan bahwa semakin panjang ukuran tiang dan semakin besar diameter tiang, maka perpindahan vertikal dan perpindahan horisontal semakin kecil, dengan kata lain daya dukung

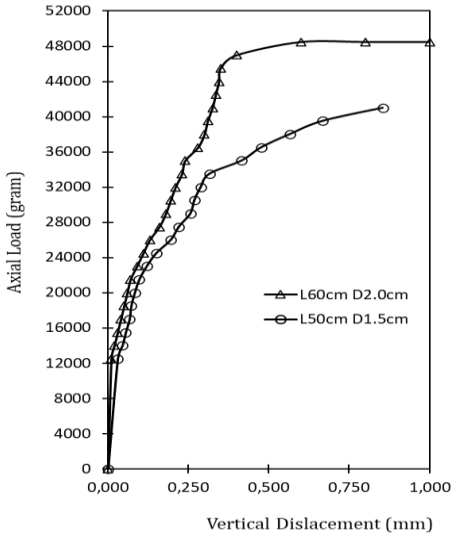
tiang akan semakin besar.

Perpindahan horisontal akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial di laboratorium pada pondasi tiang tunggal disajikan pada Gambar 7. Beban axial Pu yang digunakan masing masing sebesar 10kg dan 40kg, sedangkan beban lateral berangsur angsur ditambah hingga runtuh. Gambar 7 merupakan pembebanan lateral dengan dan tanpa beban axial, terlihat pada grafik, semakin besar beban axial yang diberikan, perpindahan horisontal semakin berkurang, dengan kata lain daya dukung lateral semakin bertambah.

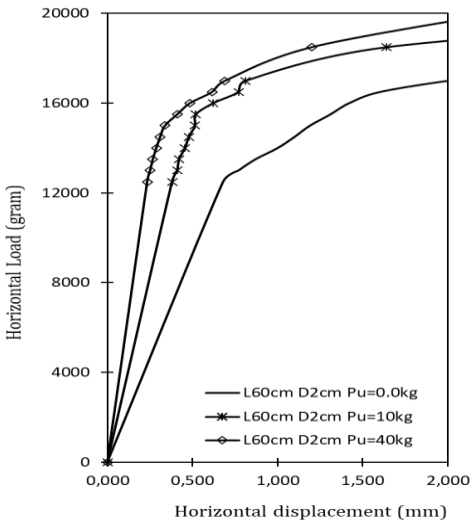
Deformasi sepanjang tiang dengan metode (Reese and Matlock 1956), akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial, disajikan pada Gambar 8. Beban axial masing masing Pu=10kg dan Pu=40kg serta beban lateral Hu=17kg. Terlihat pada grafik hasil pembebanan lateral dengan dan tanpa beban axial, tidak berbeda dengan hasil laboratorium bahwa semakin besar beban axial yang diberikan, perpindahan horisontal semakin berkurang, dengan kata lain daya dukung lateral semakin bertambah.



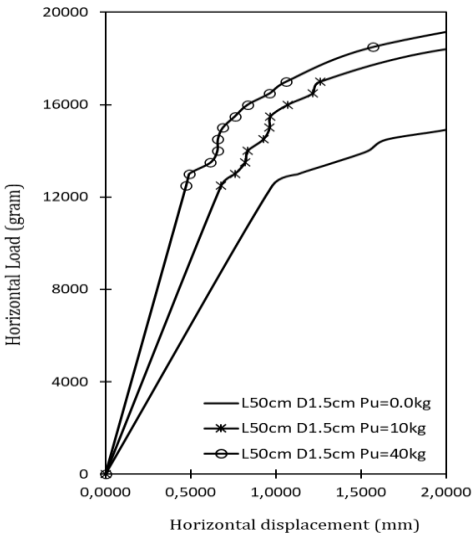
Gambar 5. Perpindahan horisontal akibat beban lateral (Pembebanan laboratorium)



Gambar 6. Perpindahan vertikal akibat beban axial (Pembebanan laboratorium)

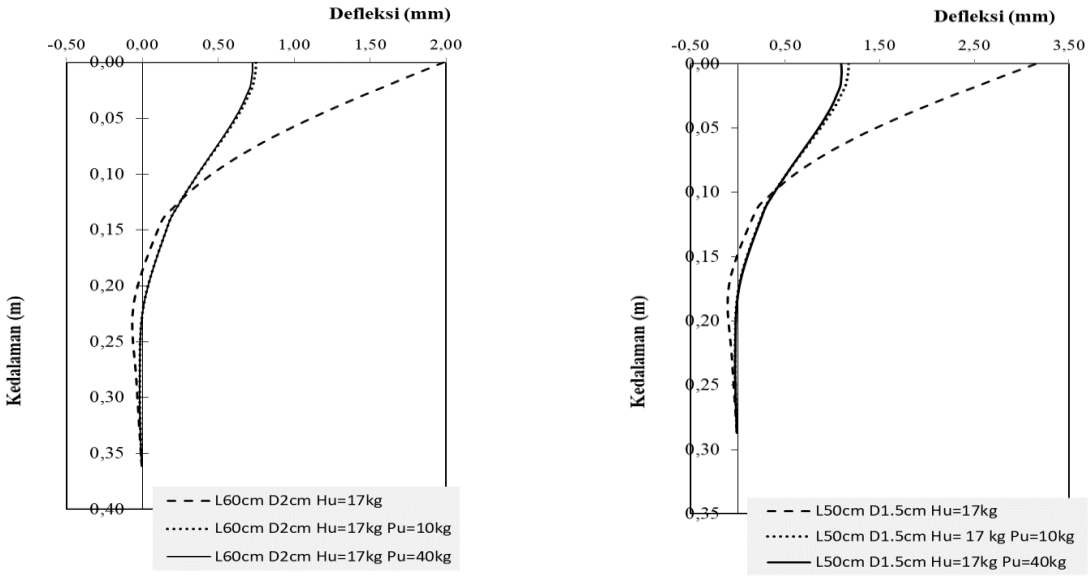


(a)



(b)

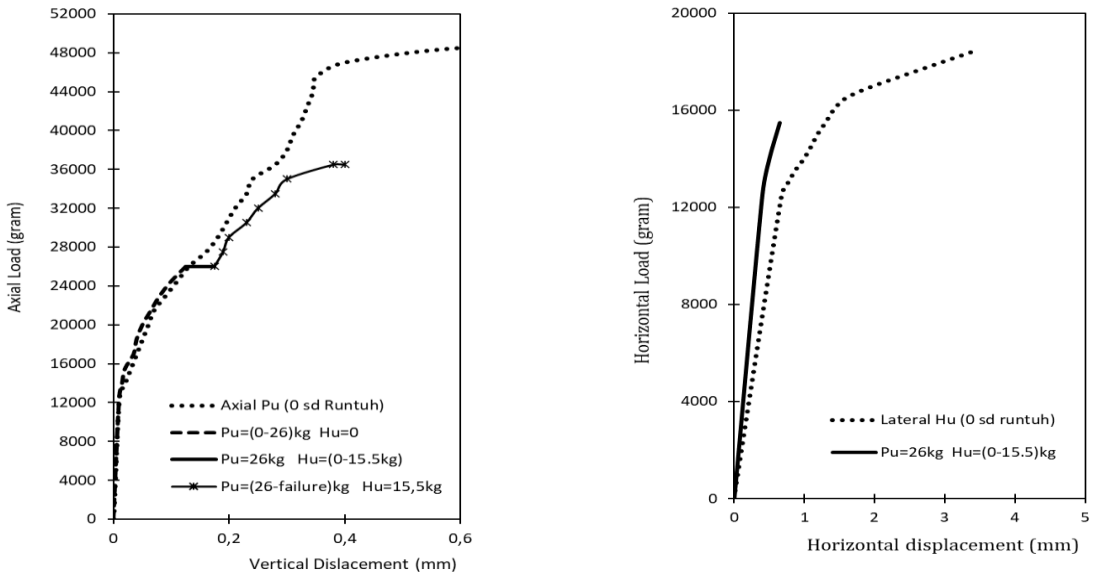
Gambar 7. Perpindahan horisontal akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial
(a) Tiang L60cm D2cm; (b) Tiang L50cm D1.5cm
(Pembebanan laboratorium)



(a) (b)

Gambar 8. Deformasi sepanjang tiang akibat beban lateral dengan dan tanpa beban axial
(b) Tiang L60cm D2cm; (b) Tiang L50cm D1.5cm
(Reese and Matlock 1956)

Hasil pembebanan laboratorium pada pondasi tiang tunggal dengan beban axial yang berangsur angsur ditambah sampai runtuh dibandingkan dengan pembebanan axial dengan tambahan beban lateral dan sebaliknya terlihat pada Gambar 9 berikut ini,



(a) (b)

Gambar 8. Perpindahan vertikal dan horisontal
(a) Pembebanan axial dengan dan tanpa beban lateral
(b) Pembebanan lateral dengan dan tanpa beban axial
(Pembebanan laboratorium)

5. KESIMPULAN dan SARAN

Hasil eksperimen efek simultan dari beban aksial dan lateral serta pengaruhnya terhadap penurunan vertikal dan defleksi horisontal pada pondasi tiang menunjukkan bahwa:

1. Pembebanan lateral murni tidak menyebabkan pergerakan penurunan vertikal.
2. Pada beban lateral dan aksial yang bekerja bersamaan, beban lateral menambah pergerakan penurunan vertikal.
3. beban aksial mengurangi defleksi horisontal / menambah kapasitas dukung lateral pada beban simultan.

Saran:

1. Eksperimen laboratorium yang dilakukan pada beban simultan axial-lateral, sebaiknya ditingkatkan dengan perbandingan tertentu untuk menganalisa pengaruh yang signifikan pada perpindahan vertikal maupun perpindahan horisontal.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan berbagai macam kepadatan tanah dan jenis tanah.

DAFTAR PUSTAKA

Achmus, Martin, and Klaus Thieken. 2014. "On the Behavior of Piles in Non-Cohesive Soil under Combined Horizontal and Vertical Loading." *Acta Geotechnica* 5 (3): 199–210. https://doi.org/10.1007/s11440-010-0124-1.

ASTM D3966. 2013. "Standard Test Methods for Deep Foundations Under Lateral Load." *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 1–18. https://doi.org/10.1520/D3966-07.recommended.

Brown, By Dan A, Clark Morrison, and Lymon C Reese. 1989. "Lateral Load Behaviour of Pile Group in Sand." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 26 (3–4): A145. https://doi.org/10.1016/0148-9062(89)92298-5.

C. Anagnostopoulos, M.Georgiadis. 1993. "Interaction of Axial and Lateral Pile Responses." *Journal of Geotechnical Engineering* 119 (4): 793–98.

E.M. Comodromos. 1977. "Response Prediction for Horizontally Loaded Pile Groups." *Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society* 2: 123–33.

Ibrahim, Saad Farhan, Shakir Al-Soud Madhat, and Ibrahim Al-Asadi Fawaz. 2018. "Performance of a Single Pile Under Combined Axial and Lateral Loads in Layered Sandy Soil." *Journal of Engineering and Sustainable Development* 2018 (01): 121–36. https://doi.org/10.31272/jeasd.2018.1.10.

K. Rajagopal, S. Karthigeyan. 2008. "Influence of Combined Vertical and Lateral Loading on Lateral Response of Piled Raft Foundation." *International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 3272–3282. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.12.002.

Khodair, Yasser, and Ahmed Abdel-Mohti. 2014. "Numerical Analysis of Pile–Soil Interaction under Axial and Lateral Loads." *International Journal of Concrete Structures and Materials* 8 (3): 239–49. https://doi.org/10.1007/s40069-014-0075-2.

Reese, L.C., and H Matlock. 1956. *Non-Dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth*. John Wiley & Sons, Inc.

Suryadi, Nugroho Soewignjo Agus, and Muhardi. 2016. "Pengaruh Beban Vertikal Terhadap Daya Dukung Lateral Pondasi Tiang." *Ph.D. Dissertation, Riau University*, 1–9.

Zhu, Ming-xing, Yanbei Zhang, Wei-ming Gong, Lei Wang, and Guo-liang Dai. 2017. "Generalized Solutions for Axially and Laterally Loaded Piles in Multilayered Soil Deposits with Transfer Matrix Method." *International Journal of Geomechanics* 17 (4): 04016104. https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000800.

PENGARUH PENAMBAHAN KAPUR, *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH* PADA *SUBGRADE* LEMPUNG BOBONARO

Elsy E. Hangge[1*], Remigildus Cornelis[2], Lilys N. Peni[3]

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto, Kupang*
***e-mail**: elsy@staf.undana.ac.id*

[2]*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto, Kupang*
***e-mail**: remi@staf.undana.ac.id*

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto, Kupang
***e-mail**: lilyzpeni@gmail.com*

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif merupakan jenis tanah yang sering menimbulkan masalah dalam bidang konstruksi karena memiliki sifat kembang susut yang tinggi. Untuk mengatasi hal tersebut dapat dilakukan dengan stabilisasi tanah. Pada penelitian ini digunakan sampel tanah lempung Bobonaro yang distabilisasi menggunakan kapur, *fly ash* dan *bottom ash* dengan tujuan mengetahui pengaruhnya terhadap sifat fisik dan mekanik *subgrade* jalan khususnya kepadatan tanah, daya dukung tanah, potensi pengembangan dan tekanan pengembangan tanah. Metode penelitian yang digunakan yaitu metode eksperimental. Tanah asli (TA) dicampurkan dengan 5% kapur, 20% *bottom ash* dan *fly ash* dengan variasi 10% (V1), 20% (V2), dan 30% (V3) terhadap berat kering tanah. Selanjutnya dilakukan uji sifat fisik tanah dan mekanik tanah yakni uji pemadatan standar proctor, potensi pengembangan tanah dengan tekanan 6,9 kPa menggunakan alat oedometer, uji tekanan pengembangan tanah, dan uji CBR dengan perlakuan pemeraman 7 hari pada tanah yang distabilisasi. Hasil pengujian menunjukkan berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO, tanah lempung Bobonaro termasuk kelompok A-7-6 (48) yang dikategorikan jelek sebagai *subgrade*. Setelah penambahan bahan stabilisasi menunjukkan, nilai berat jenis, batas cair, batas plastis, indeks plastisitas, kadar air optimum, potensi dan tekanan pengembangan tanah mengalami penurunan. Sedangkan nilai batas susut dan berat volume kering tanah mengalami peningkatan. Pada pengujian CBR tanah yang distabilisasi pada variasi 2 dan variasi 3 memenuhi syarat sebagai *subgrade* jalan berdasarkan SNI 03-1732-1989. Berdasarkan hasil pengujian, penambahan bahan stabilisasi kapur, *fly ash* dan *bottom ash* dapat memperbaiki *subgrade* jalan, sehingga kerusakan jalan yang terjadi dapat diminimalisir.

Kata kunci: *Subgrade*, kapur, *fly ash*¸*bottom ash*, CBR

1. PENDAHULUAN

Tanah dasar (*subgrade*) merupakan bagian penting dari sebuah struktur perkerasan. Tanah dasar harus memiliki daya dukung yang baik dan kondisi yang stabil. Namun tidak semua jenis tanah dasar demikian, terdapat jenis tanah dasar yang memiliki daya dukung lemah, dan tidak stabil sehingga terjadi kerusakan jalan. Kerusakan jalan dapat menghambat kegiatan perekonomian,hubungan sosial, dan budaya antarwilayah. Tanah dasar (*subgrade*) lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah dasar yang sering menimbulkan kerusakan perkerasan jalan, hal ini disebabkan lempung ekspansif yang mempunyai sifat kembang susut yang tinggi dipengaruhi oleh perubahan kadar air dalam tanah tersebut.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Bella dkk, 2015), (Hangge, 2017), (Fernandez, 2017), (Hangge dkk, 2020), (Hangge dkk, 2021) dan (Hangge, 2022), tanah lempung Bobonaro termasuk tanah lempung ekspansif dengan derajat ekspansif tinggi sampai sangat tinggi berdasarkan nilai indeks plastisitas (PI) yang diperoleh berkisar 30,13% - 46,53%. Untuk mengatasi masalah tanah ekspansif yang mempunyai sifat kembang susut yang tinggi tersebut dengan cara stabilisasi tanah.
Stabilisasi tanah adalah suatu metode yang digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah dasar supaya daya dukung tanahnya menjadi lebih baik sehingga tanah tersebut menjadi stabil dan mampu memikul beban yang bekerja terhadap konstruksi diatasnya (Apriyanti, 2014). Salah satu stabilisasi yang dapat dilakukan yaitu stabilisasi kimiawi dengan menambah beberapa jenis material kimiawi seperti kapur, *fly ash* dan *bottom ash* sebagai bahan stabilisasinya.

Kapur merupakan bahan stabilisasi secara kimiawi yang bersifat basa. Prinsip stabilisasi tanah dengan kapur adalah mencampurkan kapur untuk memanfaatkan keunggulan sifat-sifat teknis dari bahan kapur, dengan tanah yang memiliki karakteristik yang kurang baik, seperti tanah dengan plastisitas yang tinggi, potensi ekspansif yang tinggi dan lain sebagainya(Darwis, 2017). Kapur dapat menimbulkan pertukaran ion lemah sodium oleh ion kalsium yang berada pada permukaan tanah lempung, sehingga persentase partikel halus cenderung menjadi partikel yang lebih

kasar. Banyaknya bahan kapur yang digunakan untuk keperluan stabilisasi tanah ekspansif berkisar antara 2-10% dari berat kering tanah lempung (Pd T-20-2005-B, 2005). *Fly ash* (abu terbang) merupakan sisa pembakaran batu bara yang berbentuk partikel halus. *Fly ash* mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), fosfor oksida (P_2O_5) dan karbon (Apriyanti, 2014). Penambahan kapur dan *fly ash* pada tanah lempung ekspansif, struktur mikro tanah ekspansif (terutama *montmorillonite*) sangat berubah dikarenakan kapur dan *fly ash* membentuk Ca^{2+}. Ca^{2+} bervalensi tinggi menggantikan K^+ dan Na^+ dalam tanah ekspansif melalui pertukaran ion untuk mengurangi ketebalan lapisan partikel tanah (Zhou dkk, 2019). *Bottom ash* adalah limbah hasil pembakaran batu bara yang ukurannya lebih besar dari pada *fly ash*, sehingga *bottom ash* akan jatuh pada dasar tungku pembakaran (*boiler*). Beberapa kandungan kimia pada *bottom ash* seperti Si, Al, Ti, Ca dan Fe memiliki peranan dalam mengikat partikel-partikel negatif yang ada pada permukaan tanah (Purnama, 2017).

Dari uraian diatas, untuk memperbaiki *subgrade* jalan, dilakukan penambahan bahan stabilisasi yakni kapur, *fly ash* dan *bottom ash*. Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan bahan stabilisasi terhadap sifat fisik dan mekanik *subgrade* jalan khususnya kepadatan tanah, daya dukung tanah, potensi pengembangan dan tekanan pengembangan tanah.

2. METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan yang digunakan yaitu tanah lempung Bobonaro dan bahan stabilisasi yakni kapur, *fly ash* dan *bottom ash*. Sampel tanah lempung Bobonaro yang digunakan diambil dari Desa Oebelo, Kabupaten Kupang, Indonesia. Parameter sifat fisik dan mekanik tanah lempung Desa Oebelo tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Sifat Fisik dan Mekanik Tanah

Parameter	Hasil
Kadar air	29,19 %
Berat jenis spesifik	2,66
Batas cair	70,22 %
Batas plastis	29,44 %
Batas susut	9,47 %
Indeks plastisitas	40,78 %
Butiran tertahan saringan No. 200	1,40%
Butiran lolos saringan No. 200	98,60%
Kadar air optimum	32,60 %
Berat volume kering maksimum	1,28g/cm³
Potensi pengembangan tanah	6,10 %
Tekanan pengembangan tanah	355,08 kPa
CBR terendam (*soaked*)	1,14 %
CBR tak terendam (unsoaked)	1,41 %

Berdasarkan Tabel 1, menurut sistem USCS maka tanah Desa Oebelo tergolong dalam lempung anorganik dengan plastisitas tinggi (CH). Sedangkan, menurut sistem klasifikasi AASHTO tanah Desa Oebelo termasuk dalam kelompok A-7-6 (48) dengan tipe material yang paling dominan, yakni tanah berlempung dengan penilaian sebagai tanah dasar yang jelek. Berdasarkan nilai potensi pengembangan tanah, tanah lempung Bobonaro masuk kedalam potensi pengembangan tinggi, karena nilai potensi pengembangan berada dalam *range* 5-25% (Hardiyatmo, 2017). Hasil pengujian CBR tanah lempung Bobonaro menunjukkan nilai CBR dalam kondisi terendam < 3% dan dalam kondisi kering < 6%. Menurut SNI 03- 1732-1989 nilai tersebut tidak memenuhi syarat nilai kekuatan CBR untuk *subgrade* konstruksi perkerasan jalan. Oleh karena itu, untuk memperbaiki *subgrade* jalan dilakukan stabilisasi tanah dengan menggunakan kapur,*fly ash*,dan *bottom ash.*

Kapur sebagai bahan stabilisasi yang dibeli di Jl. Timor Raya No. 9, Oesapa Barat, Kelapa Lima, Kota Kupang yang memiliki kadar CaO sebesar 62,94 % (Hangge dkk, 2020). Sedangkan *fly ash* dan *bottom ash* diambil dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Bolok, Kabupaten Kupang, dengan kadar CaO pada *bottom ash* sebesar 13,92% (Hangge dkk, 2022). Kadar CaO yang dimiliki sampel *fly ash* sebesar 10,64% (Hangge dkk, 2021), tergolong kedalam *fly ash* tipe CI sehingga penggunaannya dapat dicampurkan dengan sedikit kapur agar dapat memberikan ikatan yang kuat pada tanah.

Prosedur

Dalam penelitian dilakukan serangkaian pengujian sifat fisik dan mekanik tanah. Pada pengujian sifat fisik dan mekanik tanah dilakukan pada 4 sampel yaitu sampel tanah asli dan tanah yang distabilisasi dengan variasi benda uji ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Variasi Benda Uji Pengujian Sifat Fisik Mekanik

Jenis Sampel	Komposisi
Tanah Asli	100% tanah asli
Variasi I	Tanah Asli + Kapur 5% + *fly ash* 10% + *bottom ash* 20%
Variasi II	Tanah Asli + Kapur 5 % + *fly ash* 20% + *bottom ash* 20%
Variasi III	Tanah Asli + Kapur 5 % + *fly ash* 30% + *bottom ash* 20%

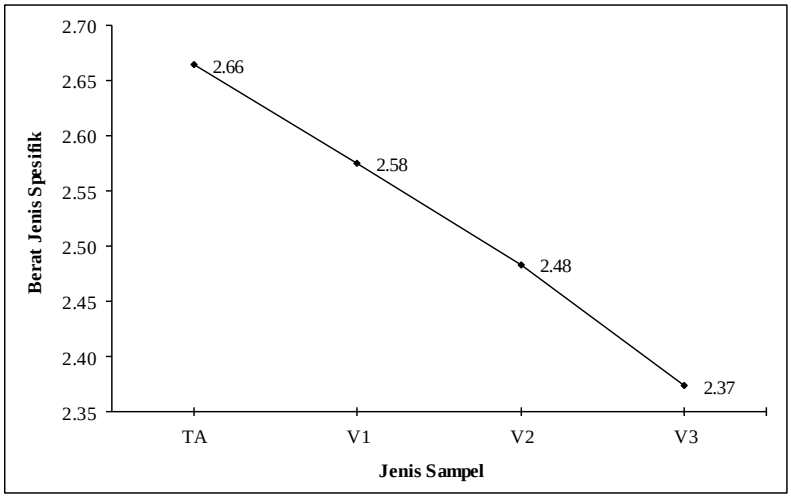
Pengujian sifat fisik yang dilakukan yaitu uji berat jenis spesifik, batas-batas atterberg dan distribusi ukuran butir. Sedangkan pengujian sifat mekanik yang dilakukan yaitu uji pemadatan standar proctor, uji potensi dan tekanan pengembangan tanah serta uji CBR tanah. Pengujian potensi pengembangan tanah menggunakan aplikasi tekanan tetap yaitu 6,9 kPa dengan metode Seed dkk 1962. Pengujian potensi dan tekanan pengembangan tanah dilakukan menggunakan alat oedometer. Pada pengujian potensi, tekanan pengembangan tanah dan CBR, dilakukan dengan dengan perlakuan pemeraman selama 7 hari pada sampel tanah yang distabilisasi agar memberikan waktu untuk tanah dan bahan stabilisasi saling berikatan.pengujian CBR dilakukan dalam kondisi terendam dan tak terendam.

3. HASIL

Hasil pengujian sifat fisik dan mekanik tanah yang distabilisasi menggunakan kapur, *fly ash bottom ash* yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Universitas Nusa Cendana sebagai berikut.

Berat Jenis Spesifik

Hasil pengujian berat spesifik tanah asli dan tanah distabilisasi menggunakan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan *fly ash* dengan variasi 10%, 20% dan 30% terhadap berat kering tanah ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan *Fly Ash* 10%, 20% dan 30% Terhadap Nilai Berat Jenis Spesifik

Berdasarkan Gambar 1, penambahan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan peningkatan persentase *fly ash* menyebabkan penurunan nilai berat jenis spesifik tanah. Penurunan terjadi akibat perbedaan berat spesifik bahan stabilisator dibandingkan dengan tanah asli, karena nilai berat jenis spesifik dari bahan-bahan stabilisator yaitu kapur, *fly ash* dan *bottom ash* lebih kecil dibanding dengan nilai berat jenis spesifik tanah asli.

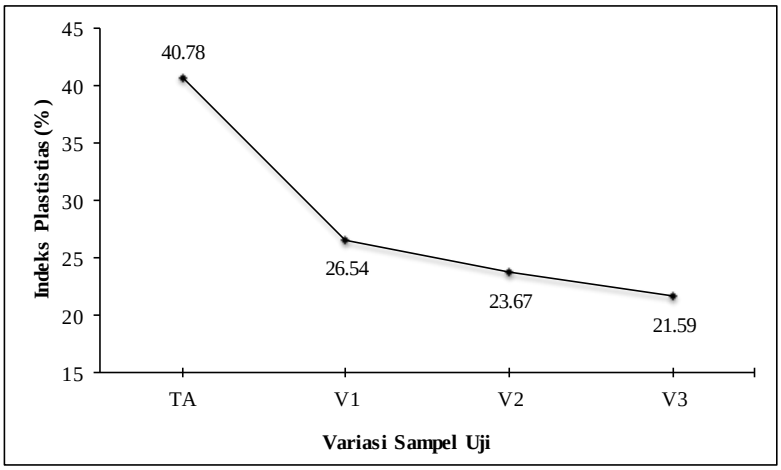
Batas-batas Atterberg

Hasil pengujian batas-batas atterberg tanah yang distabilisasi menggunakan kapur, *fly ash* dan *bottom ash* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Batas-batas Atterberg Tanah yang Distabilisasi

Variasi Benda Uji	LL (%)	PL (%)	SL (%)	PI (%)
Variasi 1	53,66	27,13	33,91	26,54
Variasi 2	49,77	25,79	44,23	23,67
Variasi 3	45,23	23,64	53,13	21,59

Nilai indeks plastisitas tanah merupakan selisih nilai batas cair dikurang nilai batas plastis. Berdasarkan Tabel 3, nilai indeks plastisitas tanah distabilisasi semakin menurun yang ditunjukkan pada Gambar 2.

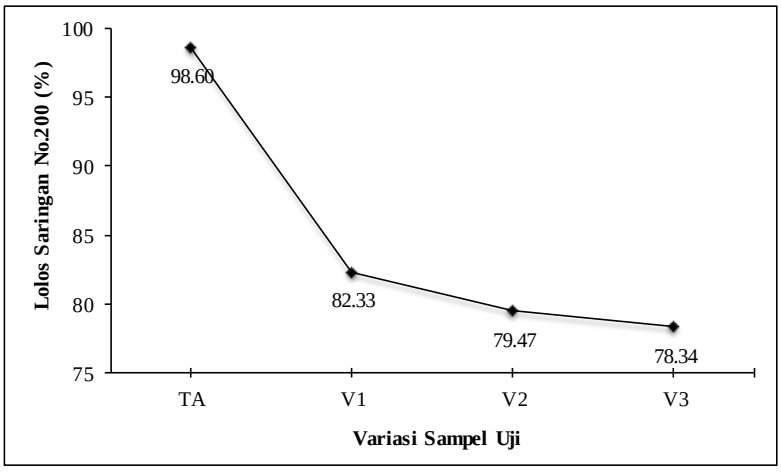


Gambar 2. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% Dan *Fly Ash* 10%, 20% dan 30% Terhadap Nilai Indeks Plastisitas Tanah

Penambahan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan peningkatan persentase *fly ash* menyebabkan penurunan nilai indeks plastisitas dari tanah. Persentase penurunan tersebut berturut-turut yaitu 34,92%, 41,95%, dan 47,06% terhadap nilai indeks plastisitas tanah asli sebesar 40,78%. Hal ini dikarenakan nilai batas cair dan batas plastis tanah mengalami penurunan, sehingga nilai indeks plastisitas tanah juga semakin mengalami penurunan.

Distribusi Ukuran Butir

Hasil pengujian berat jenis spesifik tanah yang distabilisasi menggunakan kapur, *fly ash* dan *bottom ash* ditunjukkan pada Gambar 3.

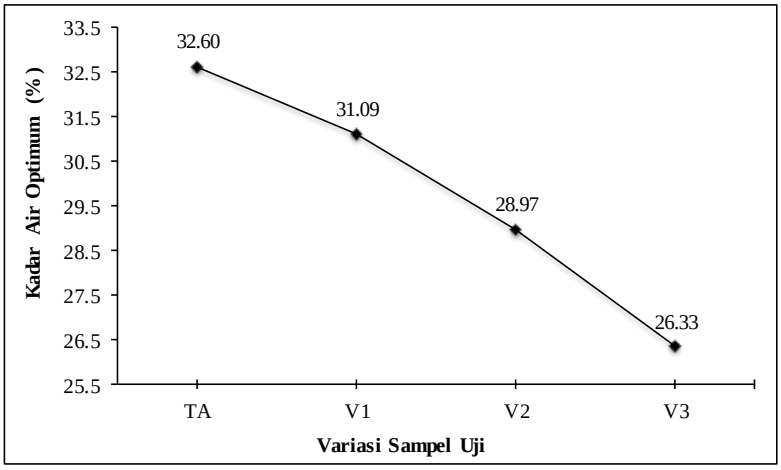


Gambar 3. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan *Fly Ash* 10%, 20% dan 30% Terhadap Persentase Butir Lolos Saringan No. 200

Penambahan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan peningkatan persentase *fly ash* menyebabkan penurunan persentase tanah yang lolos saringan No. 200. Besarnya penurunan persentase yang terjadi berturut-turut 16,50%, 19,40% dan 20,54% terhadap nilai nilai persentase lolos saringan No. 200 tanah asli sebesar 98,60%. Penurunan persentase tanah lolos saringan No. 200 disebabkan oleh bahan stabilisasi yang memiliki persentase lolos saringan No. 200 yang lebih kecil dibanding tanah asli.

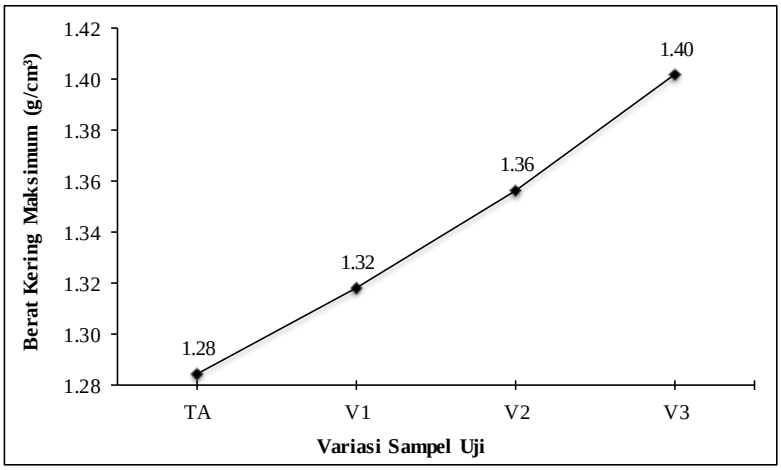
Pemadatan Standar Proctor

Hasil pengujian pemadatan standar Proctor yaitu kadar air optimum dan berat kering maksimum tanah. Hasil pengujian kadar air optimum tanah yang distabilisasi ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan hasil pengujian berat volume kering maksimum ditunjukkan Gambar 5.



Gambar 4. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan *Fly Ash* 10%, 20% Dan 30% Terhadap Kadar Air Optimum Tanah

Penambahan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan peningkatan persentase *fly ash* menyebabkan penurunan nilai kadar air optimum tanah. Besarnya penurunan kadar air optimum tanah yang distabilisasi berturut-turut yakni 4,63%, 11,13% dan 19,23% terhadap nilai kadar air optimum tanah asli sebesar 32,60%. Hal ini disebabkan kation pada bahan stabilisasi yang mengikat air sehingga tanah akan lebih sedikit mengikat air dengan demikian kadar air optimum semakin kecil.

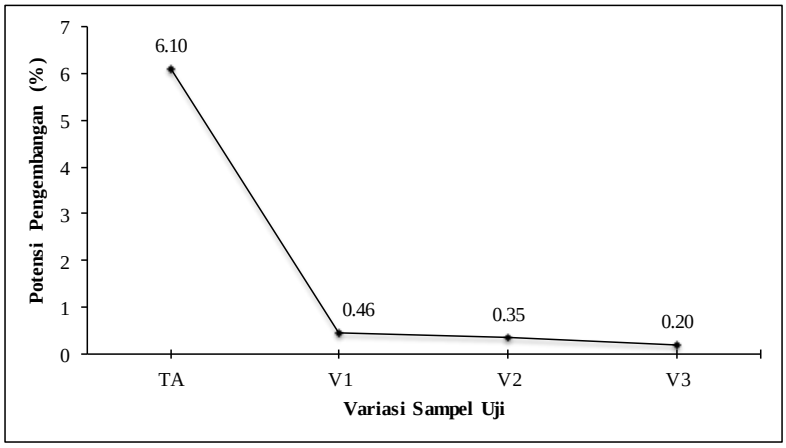


Gambar 5. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan *Fly Ash* 10%, 20% Dan 30% Terhadap Berat Volume Kering Tanah

Peningkatan persentase *fly ash* mengakibatkan berat volume kering tanah yang distabilisasi mengalami peningkatan. Besarnya peningkatan nilai berat volume kering tanah maksimum yang terjadi berturut-turut yakni 1,03, 1,06 dan 1,09 kali dari nilai pendekatan berat volume kering maksimum tanah asli sebesar 1,28 g/cm^3. Hal ini diakibatkan dari reaksi antara tanah dengan bahan stabilisasi yang membentuk gumpalan dan mengisi rongga pori pada tanah sehingga membentuk struktur tanah yang semakin padat dan berat kering maksimumnya juga ikut meningkat.

Potensi Pengembangan Tanah

Hasil pengujian potensi pengembangan tanah yang distabilisasi menggunakan kapur, *fly ash*, dan *bottom ash* ditunjukkan pada Gambar 6.

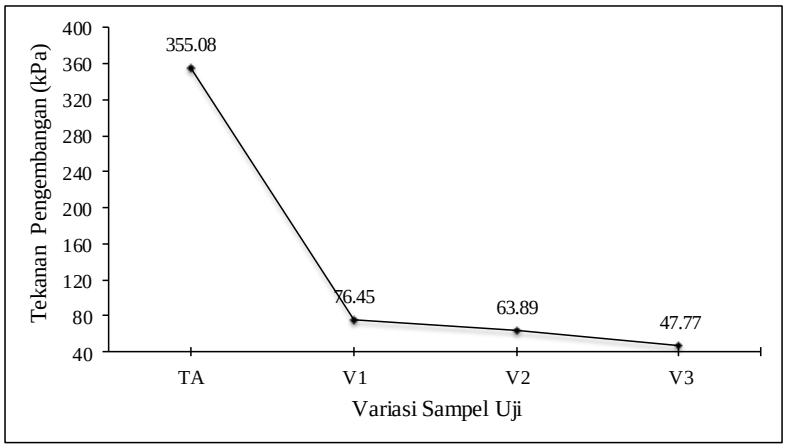


Gambar 6. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan *Fly Ash* 10%, 20% Dan 30% Terhadap Nilai Potensi Pengembangan Tanah

Penambahan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan peningkatan persentase *fly ash* menyebabkan penurunan nilai potensi pengembangan tanah. Besarnya penurunan yang terjadi berturut-turut yaitu 92,54%, 94,26% dan 96,77% terhadap terhadap nilai potensi pengembangan tanah asli. Penurunan potensi pengembangan tanah disebabkan karena adanya reaksi akibat campuran bahan stabilisasi yang memperkuat ikatan antar butiran tanah, sehingga penyerapan air menjadi lebih sedikit.

Tekanan pengembangan tanah

Hasil pengujian tekanan pengembangan tanah yang distabilisasi menggunakan kapur, *fly ash* dan *bottom ash* ditunjukkan pada Gambar 7.

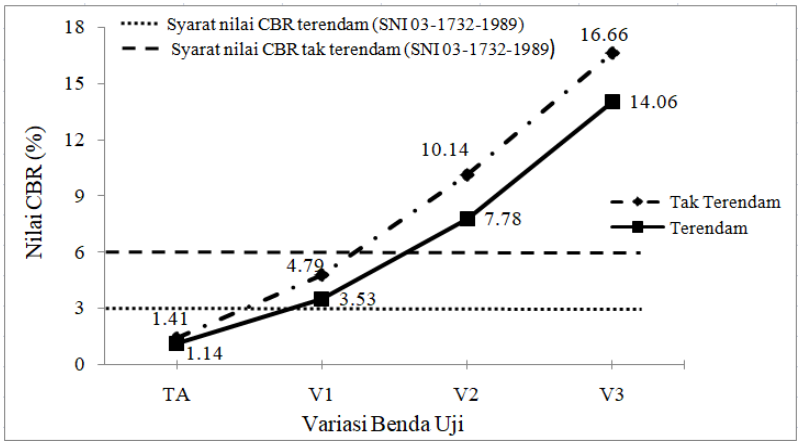


Gambar 7. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan *Fly Ash* 10%, 20% Dan 30% Terhadap Nilai Tekanan Pengembangan Tanah

Penambahan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan peningkatan persentase *fly ash*, menyebabkan penurunan nilai tekanan pengembangan tanah. Besarnya penurunan nilai tekanan pengembangan tanah yaitu 78,47%, 82,01% dan 86,55% terhadap terhadap nilai tekanan pengembangan tanah asli. Penurunan nilai tekanan pengembangan tanah dikarenakan seiring dengan penambahan bahan stabilisasi terjadi peningkatan nilai berat volume kering maksimum tanah.

CBR (*California Bearing Ratio*)

Pengujian CBR dilakukan dengan 2 jenis perlakuan terhadap benda uji CBR, yakni CBR terendam (soaked) dan tak terendam (unsoaked). Pada tanah yang distabilisasi dilakukan pemeraman selama 7 hari di dalam mould dengan tujuan memberikan waktu untuk bahan stabilisasi berikatan dengan tanah. Hasil pengujian CBR tanah asli dan tanah distabilisasi menggunakan kapur 5%, *bottom ash* 20% dan *fly ash* dengan variasi 10%, 20% dan 30% terhadap berat kering tanah ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Pengaruh Penambahan Kapur 5%, *Bottom Ash* 20% dan *Fly Ash* 10%, 20% dan 30% Terhadap Nilai CBR Tanah

Berdasarkan hasil pengujian CBR, seiring dengan penambahan bahan stabilisasi dapat meningkatkan nilai CBR tanah. Menurut SNI 03-1732-1989 syarat nilai kekuatan CBR untuk tanah dasar yaitu nilai CBR dalam kondisi terendam adalah >3% dan dalam kondisi kering adalah >6%. Berdasarkan syarat batas tersebut, tanah yang distabilisasi pada variasi 2 dan variasi 3 memenuhi syarat sebagai *subgrade* jalan.

KESIMPULAN

Tanah lempung Bobonaro, yang dikenal sebagai tanah ekspansif dengan karakteristik kembang susut, diklasifikasikan sebagai tanah lempung anorganik dengan plastisitas tinggi (CH) menurut sistem USCS. Menurut AASHTO tergolong dalam kelompok A-7-6 dengan nilai GI sebesar 48. Seiring penambahan bahan stabilisasi dapat memperbaiki sifat fisik dan mekanik dari lempung Bobonaro. Khususnya potensi dan tekanan pengembangan tanah mengalami penurunan dan daya dukung tanah mengalami peningkatan. Berdasarkan SNI 03-1732-1989, nilai syarat CBR terendam dan tak terendam untuk *subgrade* jalan maka yang memenuhi sebagai subgrade jalan adalah pada variasi 2 (tanah lempung Bobonaro yang distabilisasi menggunakan kapur 5%, *fly ash* 20% dan *bottom ash* 20%) dan variasi 3 (tanah lempung Bobonaro yang distabilisasi menggunakan kapur 5%, *fly ash* 30% dan *bottom ash* 20%).

DAFTAR PUSTAKA

Apriyanti, Y. (2014). "Pemanfaatan *Fly Ash* untuk Peningkatan Nilai CBR Tanah Dasar". Jurnal Forum Profesional Teknik Sipil Vol.2 No.2.

ASTM, 1980. *Annual Books of ASTM Standards*. *American Society for Testing Material, Philadelpia.*

Bella, R. A., Bunganaen, W., & Sogen, P. M. (2015). "Identifikasi Kerusakan Konstruksi Akibat Potensi Pengembangan Tanah Lempung Ekspansif di Desa Oebelo". *Jurnal Teknik Sipil* Volume 4 (2): 195-208

Darwis, H. (2017). "Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah.". Pustaka AQ. Nyutran MG II, Yogyakarta.

Das, Braja M. (1995). "Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) (Jilid 2)". Penerbit Erlangga, Jakarta

Fernandez, G. J.W. (2017). "Kajian Karakteristik Lempung Bobonaro di Provinsi Nusa Tenggara Timur". *Jurnal Jalan dan Jembatan.* 24(1) :1-17

Hangge, E. E.. 2017. Pengaruh Perubahan Kadar Air Pada Potensi Pengembangan Lempung Oebelo Kabupaten. *Prosiding Seminar Nasional Teknik. FST Undana.*04-05 november 2017, Kupang Indonesia. 415-422.

Hangge, E. E., Bella, R. A., & Ullu, M. C. (2020). "Pemanfaatan *Fly Ash* untuk Stabilisasi Tanah Dasar Lempung Ekspansif." Jurnal Teknik Sipil, Vol 10, pp. 1-14.

Hangge, E. E., Cornelis, R., & Dom, A. Y. (2021). "Pengaruh *Fly Ash* pada Stabilisasi Lempung Ekspansif terhadap Nilai Tegangan Geser dan CBR." Jurnal Forum Teknik Sipil, Vol. 2, pp. 1-11.

Hangge, E. E., Bella, R. A., & Manek A.Q.S., (2022). "Pengaruh Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Menggunakan Kapur, *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Terhadap Kapasitas Dukung Tanah." Jurnal Forum Teknik Sipil, Vol 2, pp. 33-44.

Hardiyatmo, C. H. (2017). "Mekanika Tanah I(Edisi 7)". Gadjah Mada University. Yogyakarta.

Pd T-10-2005-B. (2005). "Penanganan Tanah Ekspansif Untuk Konstruksi Jalan''. Departemen Pekerjaan Umum.

Jakarta.

Purnama, Y. (2017). “Pengaruh Penambahan Bottom Ash Pada Tanah Lempung Ekspansif Di Daerah Lakarsantri Surabaya Terhadap Nilai Daya Dukung Pondasi Dangkal.” Ejournal Unesa, Vol 2, pp. 1-9.

Zhou, Sheng-quan., Zhou, Da-wei., Zhang, Young-fei., & Wang, Wei-jian. (2019). “Study on Physical-Mechanical properties And Microstructure of Expansive Soil Stabilized with Fly Ash and Lime”. Advances in Civil Engineering.

PENGARUH ALIRAN AIR PADA KESTABILAN LERENG

Aazokhi Waruwu[1*], Jack Widjajakusuma[2], Josua Sigalingging[3]

[1,2]Program Studi Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan, [3]PT. Tiber Jaya Group
*[*1)]e-mail: aazokhi.waruwu@uph.edu, [1)]jack.widjajakusuma@uph.edu*
[3)]josuasigalingging1@gmail.com

ABSTRACT

Bahaya longsor pada suatu lereng dapat dipicu oleh berbagai faktor, termasuk akibat air hujan yang turun di atas permukaan lereng. Pemicu longsor akibat air hujan dapat terjadi sewaktu-waktu. Air hujan yang turun di permukaan dapat mengalir sebagian di dalam tanah dan mengisi rongga-rongga pori tanah. Akibatnya tanah semakin berat dengan kadar air tanah yang semakin tinggi. Selain kadar air, tinggi muka air tanah juga semakin tinggi. Analisis stabilitas lereng perlu dilakukan untuk mendapatkan gambaran pengaruh aliran air terhadap perubahan parameter kuat geser dan faktor keamanan lereng. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data-data dari suatu lereng yang longsor, baik data tanah maupun ukuran eksisting dari lereng. Beberapa uji dilakukan untuk mendapatkan sifat fisis tanah dan kuat geser tanah. Berdasarkan data yang ada dilakukan simulasi numeris untuk memodelkan kondisi tanah yang dibedakan berdasarkan tinggi muka air dan variasi nilai sudut gesek dalam tanah dan kohesi tanah. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai sudut gesek dalam tanah dan kohesi tanah mengalami penurunan akibat peningkatan kadar air tanah. Pengurangan kedua parameter kuat geser tanah diikuti dengan penurunan faktor keamanan lereng yang dapat memicu terjadinya bahaya longsor. Peningkatan faktor keamanan yang signifikan didapatkan apabila nilai kohesi tanah semakin meningkat. Peningkatan kohesi tanah memberikan pengaruh yang baik pada peningkatan faktor keamanan dibandingkan peningkatan sudut gesek dalam tanah.

Kata kunci: Aliran air, lereng, faktor keamanan, longsor, kuat geser

1. PENDAHULUAN

Lereng pada dasarnya merupakan struktur geoteknik yang dapat terjadi oleh alam maupun buatan manusia. Lereng merupakan struktur material geoteknik berupa tanah dan batuan. Analisis kestabilan lereng mengikuti ketentuan-ketentuan yang berlaku dalam rekayasa geoteknik baik bidang mekanika tanah maupun mekanika batuan. Lereng yang mengalami keruntuhan, secara teknis dikatakan telah kehilangan kestabilannya. Sebelum mengalami keruntuhan, lereng tersebut dapat dipastikan mempunyai faktor keamanan yang rendah. Sedangkan lereng yang dalam kondisi stabil dianggap relatif tidak mengalami pergerakan baik ke arah bawah maupun ke atas lereng. Namun lereng yang stabil juga dapat mempunyai faktor keamanan yang relatif kecil, sehingga pada tertentu dapat mengalami keruntuhan (Julianto et al., 2020).

Permasalahan longsor sering dijumpai pada fasilitas transportasi seperti jalan raya, pelabuhan udara, terowongan, dan bendungan. Bahaya longsor juga dapat terjadi pada pekerjaan pengembangan sumber alam seperti tambang. Faktor-faktor yang menyebabkan gangguan pada lereng dapat berupa faktor alami seperti panas matahari, air hujan, kelembaban maupun faktor akibat aktivitas manusia seperti getaran kendaraan, ledakan, dan beban bangunan. Faktor-faktor seperti ini dapat mengganggu lereng, sehingga mengakibatkan keruntuhan (Julianto et al., 2020).

Longsor dalam proses alami yang mengalami perubahan struktur lapisan tanah dapat terjadi akibat adanya gangguan kestabilan pada tanah atau batuan penyusun lereng. Gangguan kestabilan lereng ini dipengaruhi oleh kondisi geomorfologi terutama faktor kemiringan lereng, kondisi batuan ataupun tanah penyusun lereng, dan kondisi hidrologi atau tata air pada lereng (DPU, 2007). Tanah yang mengalami infiltrasi akibat hujan dapat menyebabkan stabilitas lereng menjadi terganggu hingga memicu terjadi bencana longsor pada lereng yang tidak stabil (Hidayat et al., 2023). Curah hujan yang tinggi merupakan salah satu parameter untuk menentukan potensi longsor, selain kemiringan, tekstur tanah, dan kerapatan sungai (Sobirin et al., 2017).

Kelongsoran dapat terjadi karena banyak faktor, seperti halnya infiltrasi curah hujan, gempa bumi, topografi daerah setempat, kemiringan lereng, dan sifat tanah (DPU, 2007). Longsor terjadi pada lereng apabila gaya yang mendorong lebih tinggi dibandingkan dengan gaya yang menahan, hal ini dapat diakibatkan adanya peningkatan intensitas hujan, kemiringan tebing lereng, tebal lapisan tanah, dan jenis tanah (Priyono et al., 2023). Keruntuhan lereng dapat dianalogikan dengan mekanisme gerakan benda pada bidang miring. Gaya yang menyebabkan longsor gaya inilah yang dikatakan sebagai tegangan geser. Sementara gaya yang menahan longsoran disebut sebagai kuat geser tanah. Longsoran akan terjadi apabila tegangan geser yang bekerja lebih besar dari kuat geser tanah. Tingkat keamanan atau kestabilan dari sebuah lereng dilihat dari nilai faktor keamanan yang dimiliki oleh lereng tersebut. Faktor keamanan dipengaruhi oleh nilai tegangan geser dan kuat geser tanah. Tegangan geser pada lereng bekerja sebagai gaya

pendorong sementara kuat geser bekerja sebagai gaya penahan. Faktor keamanan pada lereng didapat dari perbandingan antara gaya penahan dengan gaya penyebab longsor (Arif, 2016).

Analisis stabilitas lereng mempunyai peran yang sangat penting pada perencanaan konstruksi-konstruksi sipil. Lereng yang tidak stabil sangatlah berbahaya terhadap lingkungan sekitarnya, oleh sebab itu analisis stabilitas lereng sangat diperlukan (Pangemanan et al., 2014). Tanah longsor memberikan ancaman besar bagi kehidupan dan harta benda manusia, untuk itu perlu dilakukan penelitian terkait kestabilan lereng dengan menghitung nilai faktor keamanan lereng tersebut, sehingga dapat dilakukan pencegahan awal untuk mengurangi resiko atau kerugian akibat bahaya tanah longsor. Analisis kestabilan lereng dilakukan untuk menilai tingkat kestabilan suatu lereng. Analisis yang digunakan pada penelitian ini fokus pada pengaruh aliran air dalam lapisan tanah yang memberikan pengaruh pada peningkatan kadar air tanah dan tinggi muka air tanah. Analisis kestabilan lereng menggunakan metode numeris dengan harapan dapat memberikan gambaran perubahan faktor keamanan pada lereng yang diteliti melalui simulasi perubahan parameter kuat geser akibat perubahan kadar air tanah dan peningkatan muka air tanah.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dilakukan dengan mengambil contoh kasus lereng yang mengalami longsor di lapangan (Gambar 1). Penelitian diawali dengan pengambilan sampel tanah di lapangan menggunakan bor tangan. Selain pengambilan sampel tanah, juga dilakukan pengukuran kondisi eksisting dari bidang longsor di lapangan, termasuk tinggi tebing dan kemiringan lereng yang ada.



(a) (b)

Gambar 1. Kondisi longsor di lokasi: (a) Lapisan tanah; (b) Pengukuran bidang longsor

Sampel tanah dari lapangan diuji menggunakan uji *density*, kadar air, berat jenis, permeabilitas, analisa saringan, dan batas-batas konsistensi (*Atterberg Limit*). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan parameter sifat fisik tanah di lapangan. Pengujian pemadatan standard dilakukan untuk mendapatkan kondisi kepadatan maksimum dan kadar air optimum tanah yang diteliti. Uji utama dilakukan dengan alat uji geser langsung untuk mendapatkan parameter kuat geser tanah sebagai parameter utama dalam menganalisis stabilitas lereng.

Uji kuat geser dilakukan dalam berbagai kondisi tanah yang dibedakan berdasarkan kadar air tanah. Hal ini diperlukan untuk mengetahui perubahan parameter geser tanah akibat perubahan kandungan air dalam tanah. Nilai-nilai parameter geser baik kohesi maupun sudut geser dalam tanah digunakan sebagai dasar dalam menganalisis stabilitas lereng.

Selain pengaruh perubahan kandungan air dalam tanah, variasi muka air tanah juga dimodelkan dalam menentukan faktor keamanan dari lereng yang diteliti. Model muka air tanah dibedakan masing-masing setinggi muka tanah, setengah tebal lapisan tanah yang mengalami longsor, dan tanpa muka air tanah. Hal ini digunakan untuk memodelkan kondisi tanah dalam keadaan jenuh, jenuh sebagian, dan tidak jenuh.

Metode-metode yang dapat digunakan untuk menganalisis kestabilan lereng sangat beragam. Penggunaan metode ini

tergantung pada data yang tersedia, program komputer yang tersedia, tingkat ketelitian perhitungan yang diperlukan, dan luaran yang diperlukan. Semakin teliti data yang digunakan untuk perhitungan kestabilan lereng ini, hasil yang diperoleh akan semakin mendekati kenyataan sebenarnya. Metode-metode yang digunakan antara lain metode perhitungan analitis, metode grafik, dan metode numeris yang diselesaikan dengan bantuan program komputer (Arif, 2016). Analisis stabilitas lereng yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan metode numeris untuk mendapatkan pengaruh perubahan parameter geser tanah akibat perubahan kadar air dan pengaruh perubahan muka air tanah terhadap faktor keamanan lereng.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji pendahuluan dari sampel tanah di lokasi penelitian ditunjukkan dalam **Tabel 1**. Berdasarkan hasil analisis saringan, batas cair (*LL*), dan indeks plastisitas (*PI*), maka tanah dapat diklasifikasikan menggunakan metode klasifikasi USCS. Jumlah lolos saringan No. 200 < 50% dan lolos saringan No. 5 > 50%, maka tanah termasuk sebagai pasir (S). Indeks plastisitas tanah sebesar 1,68% < 4% maka tanah dapat termasuk sebagai pasir berlanau (SM), namun oleh karena lolos saringan No. 200 berada di antara 5-12% maka jenis tanah dapat berupa SW-SM atau SP-SM tergantung dari gradasi tanah, jenis SW-SM untuk tanah pasir berlanau bergradasi baik dan SP-SM untuk tanah pasir berlanan bergradasi buruk.

Tabel 1. Sifat fisik tanah yang diteliti

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Berat isi kering (γ_d)	16,390	kN/m^3
2	Berat isi basah (γ_b)	19,400	kN/m^3
3	Kadar air (w)	18,44	%
4	Berat jenis (G_s)	2,61	-
5	Koefisien permeabilitas	0,0003	m/hari
6	Analisa saringan	1. Tertahan saringan No 200 = 94,23% 2. Lolos saringan No.200 = 5,77% 3. Lolos saringan No.4 = 98,87%	
7	*Atterberg limit*	*LL*= 24,36%, *PL*= 22,68%, *PI* = 1,68%	

Uji pemadatan dilakukan pada sampel tanah dari lokasi longsor untuk mendapatkan parameter kepadatan dan kadar air optimum. Hasil uji pemadatan tanah didapatkan kadar air optimum sebesar 18,75% dan berat isi kering maksimum sebesar 1,63 kg/cm^3. Simulasi berikutnya dilakukan perubahan kadar air untuk pembuatan sampel uji kuat geser tanah. Berdasarkan hasil uji kuat geser langsung didapatkan parameter kuat geser seperti terlihat pada **Tabel 2**. Tanah dibedakan dalam 3 (tiga) variasi masing-masing mewakili kondisi basah sebagai variasi 1, mewakili kondisi sedang sebagai variasi 2, dan mewakili kondisi kering sebagai variasi 3. Hasil uji kuat geser menunjukkan bahwa kadar air tanah memberikan pengaruh pada parameter kuat geser baik kohesi maupun sudut gesek dalam tanah. Kedua parameter ini semakin berkurang pada tanah-tanah yang lebih basah.

Simulasi numeris dilakukan untuk mendapatkan faktor keamanan pada lereng yang diteliti. Kuat geser tanah dibagi dalam 3 (tiga) kelompok dengan mengambil nilai rata-rata dari masing-masing kelompok baik nilai kohesi maupun nilai sudut geser dalam tanah. Hasil parameter kuat geser tanah rata-rata yang dianalisis seperti terlihat dalam **Tabel 3**. Kedua parameter geser tanah semakin tinggi seiring dengan semakin rendahnya kadar air tanah.

Faktor keamanan dari lereng yang diteliti dianalisis menggunakan metode numeris. Tahapan utama dalam menghitung nilai faktor keamanan diawali dengan pemodelan lereng, input parameter, kondisi batas, kondisi awal, dan keluaran faktor keamanan. Input data-data material menggunakan parameter tetap seperti ditunjukkan dalam **Tabel 4**. Sedangkan untuk parameter kuat geser menggunakan data pada **Tabel 3**. Pengembangan lainnya adalah simulasi dalam perubahan tinggi muka air seperti yang telah dijelaskan dalam metode penelitian ini.

Tabel 2. Hasil analisis uji geser langsung

Sampel	Kadar Air (%)	Parameter kuat geser	
		Kohesi (kN/m^2)	Sudut Gesek

			(°)
Variasi 1	18,454	2,972	21,95
	21,407	2,246	18,18
	24,359	0,991	15,78
	27,312	0,716	15,34
Variasi 2	17,531	3,168	23,38
	20,336	3,06	19,56
	23,141	1,981	16,00
	25,946	0,363	14,67
Variasi 3	16,609	3,148	24,18
	19,266	3,06	21,34
	21,923	1,981	18,39
	24,581	1,265	16,44

Tabel 3. Nilai parameter kuat geser tanah rata-rata yang dianalisis

No	Variasi kadar air	Kohesi ($c_{rata\text{-}rata}$)	Sudut geser ($\varphi_{rata\text{-}rata}$)
1	Variasi 1	1,730 kN/m^2	17,8125^o
2	Variasi 2	2,143 kN/m^2	18,4025^o
3	Variasi 3	2,363 kN/m^2	20,0875^o

Tabel 4. Input parameter tanah yang dianalisis

Parameter	Nama	Nilai	Satuan
Model material	*Model*	Mohr-Coulomb	-
Jenis perilaku material	*Jenis*	Terdrainase	-
Berat isi jenuh	γ_{unsat}	19,400	kN/m^3
Berat isi tanah tidak jenuh	γ_{sat}	16,390	kN/m^3
Permeabilitas arah horizontal	k_x	0,0003	m/hari
Permeabilitas arah vertikal	k_y	0,0003	mm/hari
Modulus Young	E_{ref}	2943,000	kN/m^2
Angka pori	V	0,333	-

Hasil analisis faktor keamanan dengan tinggi muka air yang berbeda-beda ditunjukkan pada **Tabel 5**. Faktor keamanan untuk tinggi muka air yang sama terlihat berbeda-beda pada parameter kuat geser tanah yang berbeda-beda. Parameter kuat geser tanah yang lebih tinggi memperlihatkan faktor keamanan yang lebih tinggi juga. Ini dapat diartikan bahwa akibat kandungan air yang semakin tinggi dalam butiran tanah, kuat geser tanah semakin berkurang sehingga lereng semakin kurang stabil. Dengan demikian aliran air yang semakin tinggi dalam butiran-butiran tanah dapat memicu bahaya longsor.

Tinggi muka air tanah dapat semakin tinggi sesaat setelah hujan turun. Perubahan tinggi muka air tanah dapat dimodelkan menggunakan analisis simulasi numeris untuk mendapatkan perubahan faktor keamanan lereng. Hasil simulasi dapat dilihat pada **Gambar *2***. Tinggi muka air tanah dapat menjadi pemicu bahaya longsor, hal ini dapat dilihat dari simulasi numeris yang dilakukan didapatkan bahwa peningkatan muka air tanah sampai di permukaan tanah dapat mengurangi faktor keamanan sekitar 22% dan peningkatan muka air tanah sampai setengah dari tebal lapisan tanah mengurangi faktor keamanan sekitar 17%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi muka air tanah memberikan pengaruh yang signifikan pada penurunan faktor keamanan lereng.

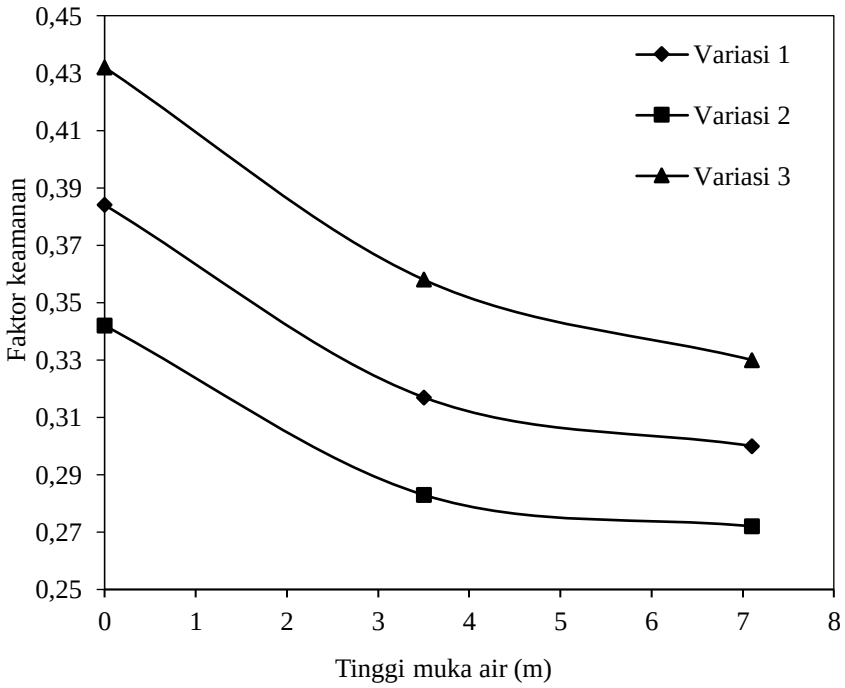
Tabel 5. Hasil analisis lereng akibat perubahan muka air tanah

Variasi Parameter Sifat Mekanis Tanah	Faktor Keamanan	Tinggi muka air (m)
Variasi 1	0,272	7,1

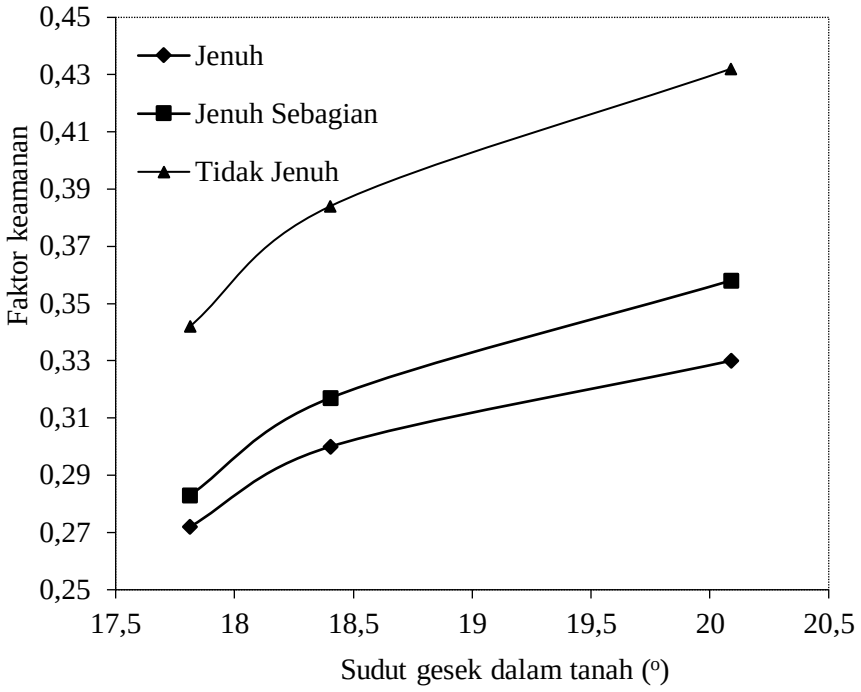
	0,283	3,5
	0,342	0
Variasi 2	0,300	7,1
	0,317	3,5
	0,384	0
Variasi 3	0,330	7,1
	0,358	3,5
	0,432	0

Kuat geser tanah yang menahan tegangan geser tanah dipengaruhi oleh parameter kuat geser, baik kohesi tanah maupun sudut gesek dalam tanah. Perubahan kadar air tanah ikut mempengaruhi perubahan kedua parameter kuat geser tanah. Berdasarkan simulasi perubahan kedua parameter kuat geser didapatkan nilai faktor keamanan pada lereng yang dianalisis. Hubungan antara sudut gesek dalam tanah dengan faktor keamanan dapat dilihat pada Gambar 3, sedangkan hubungan nilai kohesi dengan faktor keamanan ditunjukkan dalam **Gambar 4**. Peningkatan kedua parameter kuat geser sama-sama memberikan pengaruh yang positif dalam meningkatkan faktor keamanan lereng. Pola grafik kedua parameter kuat menunjukkan perbedaan satu sama lainnya. Akibat peningkatan sudut gesek dalam tanah terlihat grafik polinomial yang melengkung ke bawah, sedangkan peningkatan kohesi memperlihatkan pola lengkung ke atas.

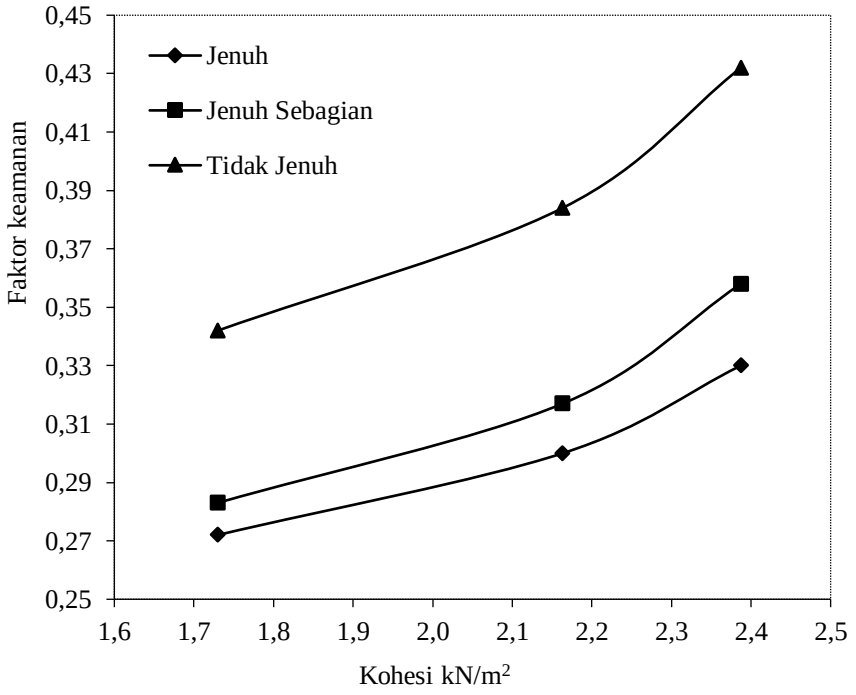
Peningkatan faktor keamanan untuk peningkatan sudut gesek dalam tanah didapatkan tidak setinggi untuk peningkatan kohesi. Ini dapat diartikan bahwa peningkatan nilai kohesi tanah memberikan pengaruh yang sangat berarti dalam peningkatan faktor keamanan. Kohesi tanah berhubungan dengan ketahanan tanah dalam memberikan lekatan antar partikel tanah, semakin tinggi kohesi maka lekatan antar partikel semakin tinggi. Akibatnya kuat geser lereng semakin tinggi, faktor keamanan semakin tinggi, dan kemungkinan terjadinya longsor semakin kecil.



Gambar 2. Hasil hubungan faktor keamanan dengan tinggi muka air tanah



Gambar 3. Hubungan antara faktor keamanan dengan sudut gesek dalam tanah



Gambar 4. Hubungan antara faktor keamanan dengan nilai kohesi

4. KESIMPULAN

Aliran air dalam tanah dapat berbentuk infiltrasi akibat hujan yang terjadi di permukaan. Aliran air ini dapat meningkatkan kadar air tanah dan tinggi muka air tanah sesaat setelah terjadinya hujan. Peningkatan kadar air dalam tanah dapat mengurangi kuat geser tanah yang ditandai dengan pengurangan nilai kohesi dan sudut gesek dalam tanah. Berdasarkan simulasi numeris untuk perubahan parameter kuat geser tanah dan muka air tanah didapatkan beberapa

kesimpulan. Kandungan air yang semakin tinggi dalam butiran tanah mengakibatkan kuat geser tanah semakin berkurang sehingga lereng semakin kurang stabil. Dengan demikian aliran air yang semakin tinggi dalam butiran-butiran tanah dapat memicu bahaya longsor. Peningkatan muka air tanah sampai di permukaan tanah dapat mengurangi faktor keamanan sekitar 22% dan peningkatan muka air tanah sampai setengah dari tebal lapisan tanah mengurangi faktor keamanan sekitar 17%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tinggi muka air tanah memberikan pengaruh yang signifikan pada penurunan faktor keamanan lereng. Peningkatan nilai kohesi tanah memberikan pengaruh yang sangat berarti dalam peningkatan faktor keamanan pada suatu lereng dibandingkan dengan peningkatan sudut gesek dalam tanah. Kohesi tanah berhubungan dengan ketahanan tanah dalam memberikan lekatan antar partikel tanah, semakin tinggi kohesi tanah, maka lekatan antar partikel semakin tinggi. Akibatnya kuat geser lereng semakin tinggi, faktor keamanan semakin tinggi, dan kemungkinan terjadinya longsor semakin kecil. Berdasarkan hasil dan kesimpulan, maka disarankan untuk melakukan penelitian dengan model skala laboratorium untuk mengamati perilaku lereng yang tergenang air dan upaya perbaikan dengan sistem drainase sehingga parameter kuat geser tanah pada lereng menjadi naik dan memungkinkan faktor keamanan lereng semakin meningkat.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyediaan data-data dalam penelitian ini. Penulis juga berterima kasih kepada Universitas Pelita Harapan yang memberikan dukungan dalam penyusunan artikel hingga dapat dipublikasikan pada seminar nasional.

6. DAFTAR PUSTAKA

Arif, I. (2016). *Geoteknik Tambang*. Gramedia Pustaka Utama.

DPU. (2007). Pedoman Penataan Ruang Kawasan Rawan Bencana Longsor. In *Dinas Pekerjaan Umum* (Vol. 53, Issue 9). Departemen Pekerjaan Umum.

Hidayat, R., Wijaya, I. P. E. P., & Munir, M. D. (2023). Mekanisme Longsor Akibat Infiltrasi dari Genangan Air (Studi Kasus Longsor di Lahat, Sumatera Selatan). *Jurnal Teknik Hidraulik*, *14*(1), 1–12. https://doi.org/10.32679/jth.v14i1.701

Julianto, Y., Hakam, A., & Yuliet, R. (2020). Analisa Stabilitas Lereng dan Perencanaan Penstabilan Lereng (Studi Kasus POLRES Arosuka Kabupaten Solok). *Jurnal Teknik Sipil ITP*, *7*(1), 34–42. https://doi.org/10.21063/jts.2019.v701.05

Pangemanan, V. G. M., Turangan, A. E., & Sompie, O. B. A. (2014). Analisis Kestabilan Lereng Dengan Metode Fellenius (Studi Kasus: Kawasan Citraland). *Jurnal Sipil Statik*, *2*(1), 37–46. http://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jss/article/view/3920

Priyono, Triatmojo, S., & Rahayu. (2023). Mitigation of Landslide Prone Areas in Anticipation of Climate Change Impacts. *Journal of Multidisciplinary Research*, *2*(1), 32–46. https://doi.org/10.56943/jmr.v2i1.277

Sobirin, Sitanala, F. T. R., & Ramadhan, M. (2017). Analisis Potensi dan Bahaya Bencana Longsor Menggunakan Modifikasi Metode Indeks Storie di Kabupaten Kebumen Jawa Tengah. *Industri Research Workshop and National Seminar Politeknik Negeri Bandung*, *8*, 59–64.

KARAKTERISTIK KUAT TEKAN BEBAS CAMPURAN ABU SEKAM PADI DAN *RENOLITH* SEBAGAI BAHAN STABILISASI TANAH LEMPUNG

Made Dodiek Wirya Ardana[1], Anissa Maria Hidayati[1], dan Khairuman Nawawi[2]

[1]*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Kampus UNUD Bukit Jimbaran, Badung, Bali*
***e-mail**: madedodiek@unud.ac.id*
[2]*Alumni Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Kampus UNUD Bukit Jimbaran, Badung, Bali*

ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah yang memerlukan tindakan khusus agar dapat dijadikan sebagai tanah dasar konstruksi. Beberapa ruas jalan di daerah Ubung Kaja, Denpasar Utara, Bali mengalami keretakan diduga akibat dari karakteristik tanah lempung ekspansif. Salah satu upaya memperbaiki karakteristik tanah lempung ekspansif adalah melakukan stabilisasi dengan menggunakan abu sekam padi dan *renolith*. *Renolith* adalah bahan kimia (*inorganic stabilizer*) berbasis cairan sebagai bahan stabilisasi. Studi dilakukan untuk mengetahui sifat fisik tanah dan campuran tanah distabilisasi, batas-batas *Atterberg*, dan mengetahui pengaruh bahan stabilisasi terhadap nilai kuat tekan bebas (UCT). Benda uji dibuat dengan menambahkan abu sekam padi (ASP) dengan variasi (persen berat) 0%, 3%, 6%, 9%, 12% serta 5% *renolith* secara konstan pada tanah asli dengan lama pemeraman 0, 7, 14, dan 21 hari. Hasil pengujian UCT memberikan nilai q_u tertinggi dengan pemeraman, persen abu sekam padi dan nilai q_u adalah (1) 7 hari; 3% abu sekam padi; 2,713 kg/cm^2, (2) 14 hari; 5% *renolith* dan 0% abu sekam padi; 3,788 kg/cm^2, (3) 21 hari; 3% abu sekam padi: 2,847 kg/cm^2. Sementara, nilai UCT tanah asli dengan q_u sebesar 1,476 kg/cm^2. Hasil pengujian menunjukkan penambahan bahan stabilisasi abu sekam padi dan *renolith* serta lama waktu pemeraman mampu meningkatkan terhadap nilai q_u mencapai 100 %

Kata kunci: *Lempung ekspansif, Stabilisasi, Abu sekam padi, Renolith, Kuat tekan bebas*.

1. PENDAHULUAN

Tanah lempung memiliki karakteristik dengan potensi mengembang dan menyusut yang tergolong tinggi. Tanah lempung ekspansif khususnya tetap dapat diandalkan sebagai dasar suatu konstruksi namun memerlukan tindakan tertentu dalam pemanfaatanya. Penyebaran tanah lempung ekspansif cukup banyak tersebar di daerah-daerah Indonesia, secara khusus, salah satunya terletak di daerah Ubung Kaja, Denpasar Utara, Bali. Tanah lempung di daerah ini diduga menyebabkan beberapa ruas jalan mengalami kerusakan atau kegagalan tanah dasar akibat dari karakteristik tanah lempung ekspansif.

Upaya mengurangi dampak kerugian dari karakteristik tanah lempung ekspansif memerlukan metode perbaikan tanah yang mampu diaplikasikan dan dikembangkan. Metode yang dapat dilakukan untuk memperbaiki tanah lempung adalah dengan melakukan stabilisasi tanah berupa stabilisasi kimiawi yang mencampurkan bahan kimia (*inorganic stabilizer*) sebagai bahan tambahan untuk meningkatkan kekuatan atau kapasitas dukung tanah (Sudjianto, 2007; Sarapu, 2016; Pinansang, D., Sompie, O., & Jansen, F., 2016; Raswitaningrum, 2017). Proses stabilisasi tanah dilakukan dengan memberi bahan *renolith* dan abu sekam padi (ASP). Keuntungan yang diperoleh melakukan stabilisasi dengan menggunakan *renolith* ialah tingkat fleksibilitasnya yang tinggi, kemampuan tekan yang baik dan kekuatan tarik untuk memperpanjang umur konstruksi, stabilitas dalam suhu panas dan dingin, serta perawatan yang mudah (Kholis, 2014).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Tanah lempung Ekspansif

Tanah lempung ekspansif merupakan jenis tanah yang memiliki perilaku kembang susut yang tergolong cukup tinggi bila kadar air dalam tanah mengalami perubahan. Hubungan antara indeks plastisitas dan perilaku kembang susut, khususnya potensi pengembangan di tampilkan pada **Tabel 1**. Kaolinite, Illite dan Montmorillonite merupakan mineral yang umumnya terdapat pada tanah lemung ekspansif. Meskipun ketiganya merupakan bentuk dari kristal Hidros Alluminium Silikat, karakteristik dan struktur penyusunnya memiliki perbedaan yang cukup signifikan.

Tabel 1. Hubungan Indeks Plastisitas terhadap potensi pengembangan (*Swelling Potential)*, Chen (1975)

Indeks Plastisitas (%)	Potensial Pengembangan
0-15	Rendah
15-35	Sedang
20-55	Tinggi
>55	Sangat Tinggi

Stabilisasi Tanah

Upaya menggunakan unsur-unsur tambahan secara mekanik atau kimiawi dalam memperbaiki karakteristik tanah merupakan salah satu metode stabilisasi tanah. Pada umumnya dalam melakukan perbaikan tanah dilakukan dengan cara mencampur bahan-bahan tertentu pada tanah dengan tujuan karakteristik tanah bisa lebih baik. Abu Sekam Padi (ASP) didapatkan dari gabah atau kulit bulir padi yang dibakar, abu hasil pembakaran ini merupakan jenis abu dengan kandungan silika reaktif sebesar 85-90 % (Oktarianda, 2019) *Renolith* (R) adalah salah satu zat yang digunakan dalam penambahan perkerasan tanah berbasis cairan atau zat penstabil tanah yang memadatkan dan menstabilkan struktur tanah.

3. METODE PENELITIAN

Observasi dan Persiapan

Observasi lapangan dilakukan di kawasan Ubung Kaja, Denpasar Utara. Pada tahap ini dilakukan untuk menentukan dan mengamati tempat yang tepat untuk pengambilan contoh tanah. Tanah yang dijadikan sampel merupakan tanah terganggu (*disturbed soil*) dan tanah tidak terganggu (*undisturbed soil*). Tahap selanjutnya adalah tahap persiapan berupa menyediakan berbagai bahan yang perlu disediakan seperti sampel tanah (TA), abu sekam padi, dan *renolith* yang menjadi bahan utama dalam pelaksanaan penelitian ini. Pengujian-pengujian dilakukan mengikuti standar-standar seperti pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Standar ASTM Pengujian *Index Properties*

No.	Pengujian	Standar
1	Kadar Air	ASTM D 2216
2	Berat Jenis Tanah	ASTM D 854
3	Batas-Batas A*tterberg*	ASTM D 4318
4	Kuat Tekan Bebas	ASTM D 2166
5	Pemadatan Tanah	ASTM D 698

Pembuatan Benda Uji dan Pengujian

Pada tahap ini, campuran abu sekam padi (ASP) dan *renolith* (R) digunakan sebagai komposisi dasar membuat sampel benda uji untuk tanah asli dan tanah campuran. *Index properties* tanah yang telah diberikan abu sekam padi dan *renolith* diperiksa untuk mendapatkan perbandingan antara berat jenis tanah serta indeks plastisitas pada tanah campuran dan tanah asli.

Uji terhadap batas-batas *Atterberg* yang dilakukan terhadap tanah yang diberikan abu sekam padi dan *renolith*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan batas cair, batas plastis, dan indeks plastisitas tanah yang diuji. Uji pemadatan dilakukan untuk mengevaluasi hubungan antara kadar air dan kepadatan tanah sesuai prosedur yang tertera pada ASTM D 698. Setelah masa *curing* benda uji yang kemudian dilanjutkan dievaluasi menggunakan alat uji Kekuatan Tekan Bebas pada ASTM D 2166 sesuai dengan protokol pengujian. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tekan bebas pada tanah asli dan tanah campuran.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian *Index Properties* dan Batas-Batas *Atterberg* Tanah Asli (TA)

Sampel tanah yang digunakan untuk pengujian *index properties* dan batas-batas *Atterberg* diambil di Desa Ubung Kaja, Denpasar Utara, Bali. Hasil uji contoh tanah selengkapnya disajikan pada **Tabel 3.**

Sifat Fisik Tanah Campuran (TC)

Hasil pengujian sifat fisik berupa berat jenis, Indeks Plastisitas, pemadatan (berat kering maksimum dan kadar air optimum) disajikan secara berturut pada **Gambar 1**; **Gambar 2**; dan **Gambar 3**.

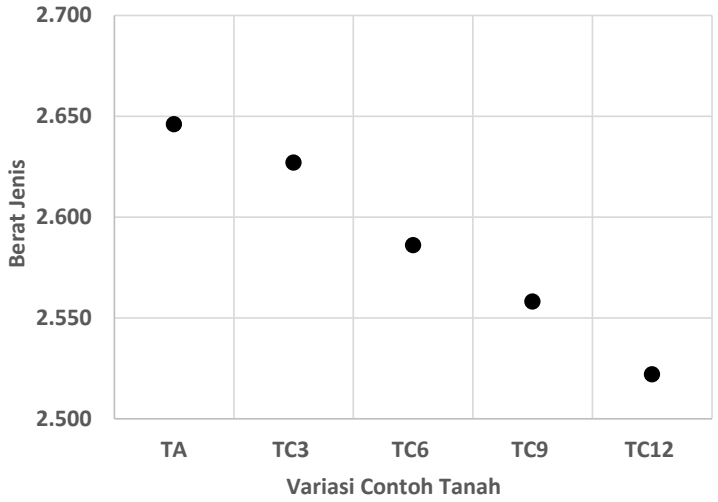
Hasil Pengujian Pemadatan Standar Tanah Campuran

Hasil Pengujian Pemadatan Standar Tanah Campuran ASP dan *Renolith* disajikan secara berturut pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**.

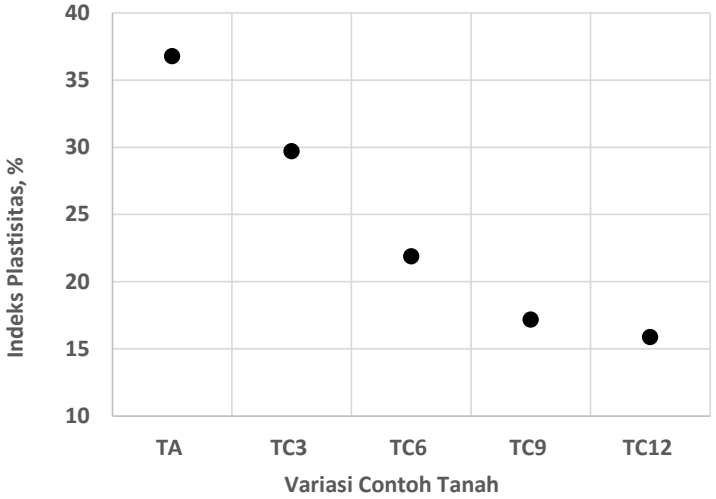
Hasil uji pemadatan standar pada tanah campuran memberikan kecenderungan penurunan berat volume kering maksimum seiring dengan peningkatan kadar ASP. Ada contoh benda uji TA dan TA+R terdapat ketidaktentuan nilai berat kering maksimum.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Index Properties* dan Batas-Batas *Atterberg* Tanah Asli (TA)

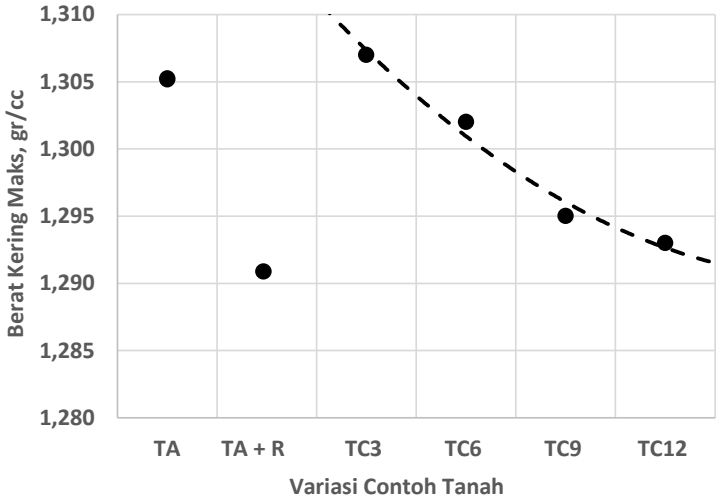
	Parameter	**Hasil**
	Specific gravity (Gs)	2,646 gr/cm^3
	Batas Plastis (PL)	26,21%
	Batas Cair (LL)	63,0%
	Indeks Plastis (IP)	36,79%
	Tanah Lolos Saringan No.40 (<0.425 mm)	97,34%
	Tanah Lolos Saringan No.200 (<0.075 mm)	76,86%
	Klasifikasi Tanah (AASHTO)	A-7-6
	Klasifikasi Tanah (USCS)	CH
	Kadar Air Optimum (OMC)	26,5%
	Berat Isi Kering Maksimum (γd maks)	1,305 gr/cm^3
	Nilai q_u (UCS)	1,476 kg/cm^2



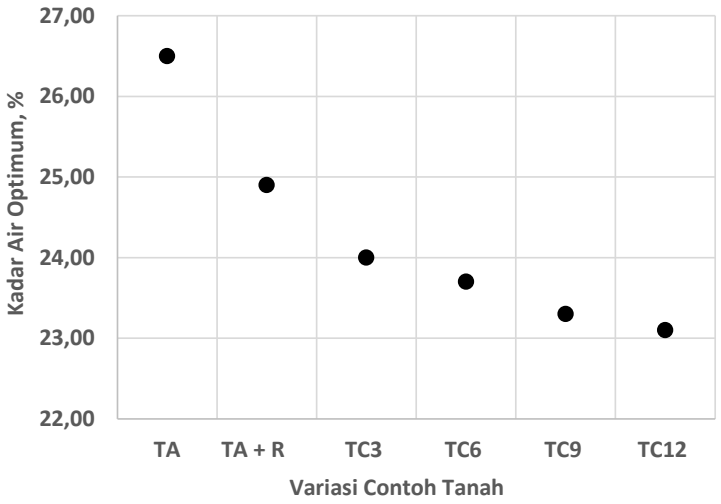
Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian Berat Jenis Tanah Asli (TA) dan Tanah Campuran (TC)



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Indeks Plastisitas Tanah Asli (TA) dan Tanah Campuran (TC)



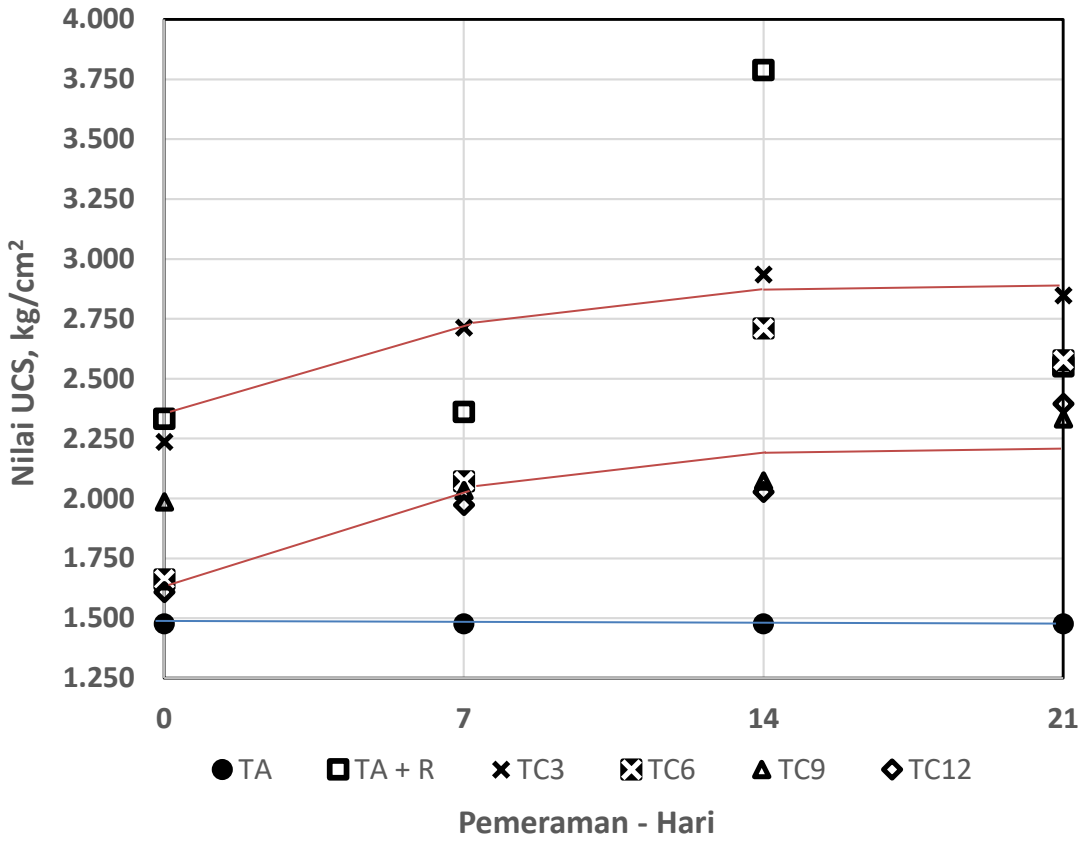
Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Pemadatan – Berat Kering Maksimum



Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Pemadatan – Kadar Air Otimum

Hasil Pengujian *Unconfined Compression Test* (UCT)

Hasil pengujian kuat tekan (UCS, qu) Tanah Asli dan Tanah Campuran disajikan pada **Gambar 5**. Nilai UCS menunjukkan kecenderungan peningkatan dengan penambahan kadar ASP. Peningkatan nilai UCS terhadap waktu pemeraman menunjukkan peningkatan signifikan terjadi pada rentang hari pemeraman 0 – 7 hari. Pada rentang waktu pemeraman 7 – 14 hari masih menunjukkan adanya peningkatan namun tidak setinggi pada rentang pada minggu pertama. Rentang waktu pemeraman 14 – 21 hari menunjukkan peningkatan nilai UCS yang kecil dan cenderung konstan.



Gambar 5. Grafik Nilai Kuat Tekan (UCS, q_u)

KESIMPULAN

Pengujian *Unconfined Compression Test* menunjukkan bahwa adanya perubahan nilai q_u setelah tanah asli diberikan tambahan ASP dan *renolith* sebagai bahan tambahan dalam melakukan stabilisasi tanah. Peningkatan nilai qu secara nyata dihasilkan dari penambahan variasi campuran dari bahan stabilisasi dan ditambah dengan lama masa *curing*. Nilai q_u tanah asli yaitu 1,476 kg/cm^2 kemudian berhasil meningkat mencapai 100% pada variasi ASP 3% dan 6% pada pemeraman 14 dan 21 hari. Hasil uji UCT, nilai q_u tertinggi pada masa *curing* 0 hari terdapat pada variasi sampel 5% *renolith* tanpa abu sekam padi dengan nilai 2,331 kg/cm^2 yang mengalami persentase kenaikan 57,97%. Kemudian, nilai q_u tertinggi pada masa *curing* 7 hari terdapat pada variasi sampel 3% ASP dengan nilai 2,731 kg/cm^2 yang dengan persentase kenaikan 83,86%. Selanjutnya, nilai q_u tertinggi pada masa *curing* 14 hari terdapat pada variasi sampel 5% *renolith* dengan 3% ASP dengan nilai 3,788 kg/cm^2 dan persentase kenaikan 156,71%. Selanjutnya, nilai q_u tertinggi pada masa *curing* 21 hari terdapat pada variasi sampel 3% abu sekam padi dengan nilai 2,847 kg/cm^2 yang mengalami persentase kenaikan 92,94%. Hasil-hasil pengujian tersebut diatas menunjukkan bahwa penambahan 3% ASP dan 5% Renolith memberikan peningkatan nilai UCS tertinggi setelah dilakukan pemeraman selama 14 dan 21 hari.

Saran

Penelitian selanjutnya dapat melakukan pemilihan variasi campuran abu sekam padi dan *renolith* dengan perbandingan persentase *renolith* yang lebih tinggi dari 5%. Kemudian menambah masa *curing* untuk memperoleh potensi perbaikan kekuatan tanah yang lebih optimal.Pemilihan abu sekam padi atau *renolith* yang akan dipakai dalam pengujian sangat perlu diperhatikan untuk mendapatkan hasil pengujian dan pemanfaatan bahan campuran tersebut menjadi lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

Chen, W.F. (1975). *Limit Analysis and Soil Plasticity.* Amsterdam: ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY.

Kholis, N. (2014). Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Semen dan Renolith. *Jurnal BENTANG*, 62-77.

Oktarianda, M. R. (2019). Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Campuran Abu Sekam Padi Dan Renolith Terhadap Uji Kuat Tekan Bebas (Unconfined Compression Test).

Pinansang, D., Sompie, O., & Jansen, F. (2016). Analisis Campuran Kapur-Fly Ash dan Kapur-Abu Sekam Padi Terhadap Lempung Ekspansif. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*.

Raswitaningrum, T. R. (2017). Penambahan Semen dan Abu Sekam Padi Untuk Peningkatan Stabilitas Tanah. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2017*, 1-9.

Sarapu, D. (2016). *Potentials Of Rice Husk Ash For Soil Stabilization*. *Department of Civil Engineering*, 1-6.

Sudjianto, A. T. (2007). Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Dengan Garam Dapur (NaCl). *Jurnal Teknik Sipil*, 53-63.

STABILISASI TANAH RAMAH LINGKUNGAN MENGGUNAKAN EGG SHELL POWDER

[1]G.Utomo, [1]A.M. Indriani, [1]N. Hidayat, [1]M. T. Rahman, [1]M. Ikhsan, [1]K.Fitri, [1]Indyra S. A.S., [1]J. C. F., [1]M. A. Akmal, [1]M. R. Langda', [1]A.Kunaivi, [1]C. H. Ivani
[1]Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan Universitas Balikpapan

ABSTRAK

Penelitian ini mengkaji stabilisasi tanah lempung menggunakan campuran cangkang telur (Egg Shell Powder, ESP) dengan metode pengujian Unconfined Compressive Strength (UCT). Karakteristik fisis tanah asli menunjukkan kelemahan dalam daya dukung yang perlu ditingkatkan. Cangkang telur, dengan komposisi kimiawi yang kaya kalsium, diolah menjadi serbuk (ESP) dan dicampurkan ke dalam tanah lempung dengan variasi persentase. Pengujian pemadatan tanah menggunakan metode Standard Proctor mengungkapkan bahwa penambahan ESP meningkatkan nilai kepadatan kering maksimum (MDD) dan menurunkan kadar air optimum (OMC). Hasil pengujian UCT menunjukkan peningkatan signifikan pada kekuatan tekan bebas tanah dengan penambahan ESP. Penambahan 8% ESP memberikan hasil optimal dengan peningkatan kekuatan tekan bebas hingga 420.08 kg/cm² pada pemeraman hari ke-21. Studi ini menyimpulkan bahwa ESP efektif sebagai bahan stabilisasi dapat meningkatkan sifat mekanis tanah lempung.

Kata kunci: Stabilitas tanah, cangkang telur, UCT, tanah lempung

1. PENDAHULUAN

Stabilisasi tanah adalah proses penting dalam rekayasa geoteknik yang bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat tanah sehingga memenuhi persyaratan teknis untuk berbagai proyek konstruksi (Kusuma et al. 2022,Indriani et al, 2023). Tanah lempung, dengan sifat fisik dan mekanik yang kompleks, sering kali menjadi tantangan besar dalam proyek-proyek ini karena sifatnya yang kohesif, tingkat permeabilitas yang rendah, serta perubahan volume yang signifikan ketika terjadi perubahan kadar air (Ridwan & Roesyanto, n.d, Indriani, et al, 2022). Oleh karena itu, penelitian untuk menemukan metode stabilisasi tanah yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan sangat diperlukan(Indriani et al, 2023).

Penggunaan bahan aditif dalam stabilisasi tanah bukanlah hal baru(Indriani & Utomo, 2023). Berbagai bahan seperti semen, kapur, dan abu terbang telah lama digunakan untuk tujuan ini(Marini et al., 2021). Namun, seiring dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan dan keberlanjutan, penelitian mulai beralih ke bahan-bahan alami dan limbah yang dapat didaur ulang (Mindiastiwi et al, 2023). Salah satu bahan yang menarik perhatian adalah cangkang telur, yang merupakan limbah dari industri pangan (Harahap et al, 2023). Cangkang telur mengandung kalsium karbonat yang tinggi, yang dapat berfungsi sebagai bahan stabilisasi efektif ketika dicampurkan dengan tanah lempung (Maulana, 2021).

Indonesia, sebagai negara dengan konsumsi telur yang tinggi, menghasilkan limbah cangkang telur dalam jumlah besar setiap tahunnya. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah ini dapat menimbulkan masalah lingkungan. Di Tempat pembuangan akhir sampah, setiap tahunnya ada 150.000 ton limbah cangkang telur dibuang yang dihasilkan dari berbagai kegiatan (Tiong et al., 2020). Padahal cangkang telur merupakan salah satu sumber kapur yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan stabilisasi pada tanah dengan terlebih dahulu merubahnya menjadi *Egg Shell Powder* (EPS). Menurut (Tiong et al., 2020) menyebutkan bahwa EPS dapat meningkatkan daya

dukung tanah jika ditambahkan pada komposisi yang sesuai. Bahkan penggunaan kapur yang berasal dari cangkang telur meningkatkan kuat tekan tanah lebih baik dari pada menggunakan kapur tohor(Consoli et al., 2020). Penelitian yang dilakukan oleh (Abdulrahman et al., 2023) menunjukkan bahwa penambahan ESP meningkatkan nilai UCS tanah lempung lunak hingga dua kali lipat.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah limbah cangkang telur dengan memanfaatkannya sebagai bahan stabilisasi tanah. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan teknik stabilisasi tanah, tetapi juga pada upaya pengelolaan limbah dan perlindungan lingkungan. Hasil penelitian diharapkan dapat menunjukkan bahwa penambahan ESP pada tanah lempung meningkatkan nilai kuat tekan bebas, menurunkan kadar air optimum, dan memperbaiki sifat-sifat fisik tanah lainnya. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan solusi yang praktis dan ramah lingkungan untuk masalah stabilisasi tanah lempung yang sering dihadapi dalam proyek konstruksi. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat membuka peluang untuk pemanfaatan limbah cangkang telur dalam skala yang lebih besar, mengurangi dampak lingkungan, dan mendukung praktik-praktik pembangunan berkelanjutan.

2. Material dan Metode

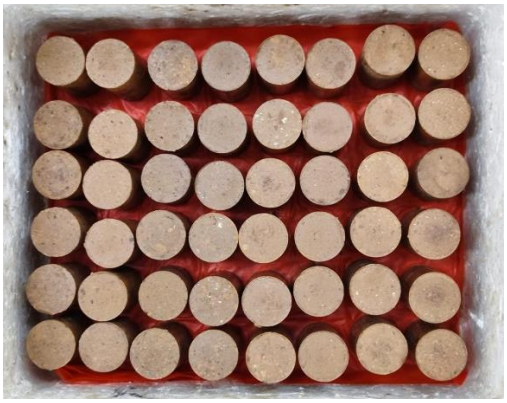
Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap utama. Pertama, dilakukan pengumpulan dan persiapan cangkang telur serta tanah lempung. Cangkang telur dikeringkan dan dihaluskan menjadi serbuk halus, sementara tanah lempung diuji untuk menentukan sifat-sifat fisiknya sebelum dilakukan pencampuran. Kedua, dilakukan proses pencampuran tanah lempung dengan variasi persentase ESP, serta penambahan air yang sesuai dengan nilai Atterberg. Ketiga, dilakukan pengujian UCT pada sampel tanah yang telah dicampur dengan ESP untuk mengukur perubahan sifat mekaniknya. Keempat, data hasil pengujian dianalisis untuk menentukan pengaruh penambahan ESP terhadap stabilitas tanah lempung.



(a) (b)

Gambar 1 (a) Cangkang telur
(b) Egg shell powder

Cangkang telur selanjutnya dibersihkan dan dijemur hingga kering. Lalu cangkang telur dihaluskan dengan cara penumbukan agar menjadi serbuk cangkang telur (ESP) yang lolos saringan nomor 200. ESP dicampurkan kedalam tanah dengan dibuat dalam 3 variasi komposisi untuk pengetahui pengaruh penambahan EPS terhadap peningkatan nilai UCS tanah asli. Variasi yang dibuat adalah 4%, 8% dan 12% terhadap berat tanah kering (MDD). Untuk menetahui pengaruh waktu pemeraman terhadap nilai USC maka dalam penelitian ini sample yang telah dibuat diperam dengan masa peram selama 7 , 12, 21 dan 28 hari.



(a)



(b)

Gambar 2 (a) Sampel yang diperam
(b) Pengujian UCT

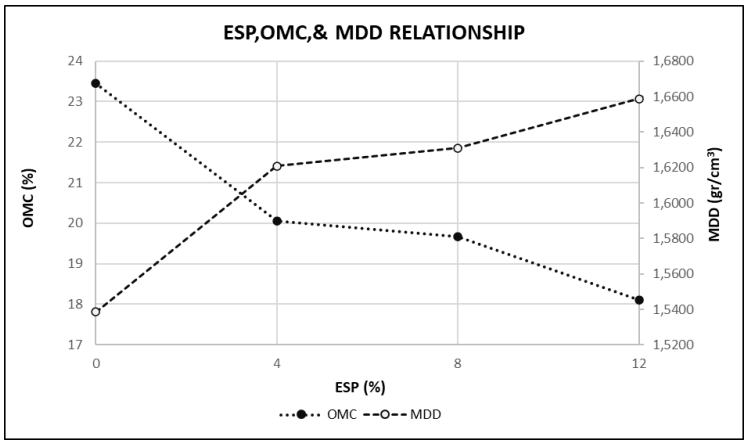
3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil mengenai sifat – sifat fisis dari tanah yang diuji, didapatkan karakteristik tanah asli yang dilihat pada Tabel 1 dibawah ini :

Tabel 1 Hasil Pengujian Sifat Fisis Tanah Asli Dilaboratorium

Parameter Pengujian	Hasil
Natural Moisture Content NMC (%)	28.96
Specific Gravity (Gs)	2.614
Liquid Limit (%)	34.55
Plastis Limit (%)	20.65
Plastis Indeks (%)	13.90

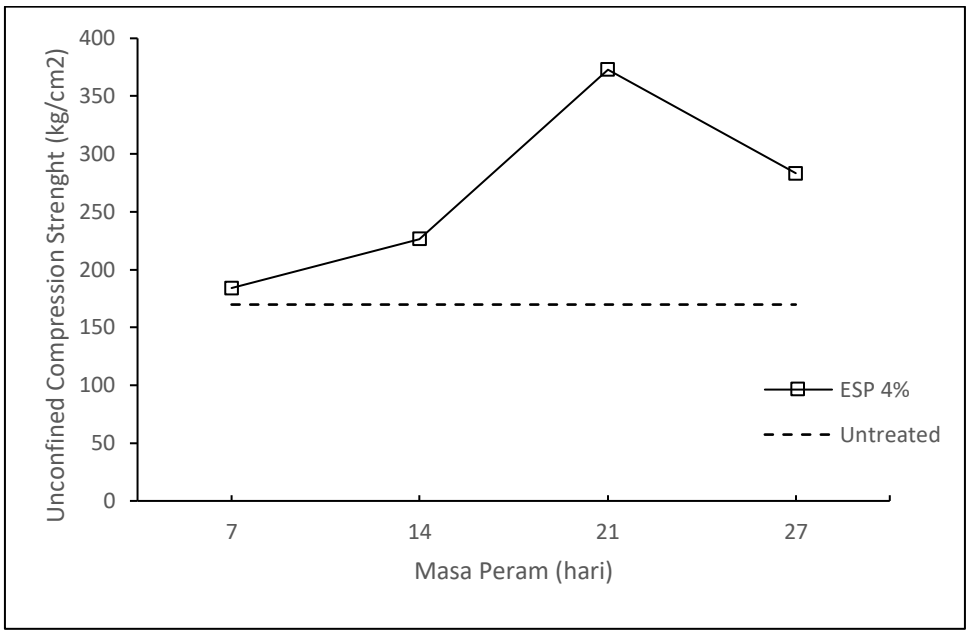
Hasil pengujian proktor menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap kadar air optimum (OMC) dan MDD seiring dengan penambahan ESP. Dimana semakin tinggi prosentase ESP yang ditambahkan nilai OMC mengalami penurunan dan berbanding terbalik dengan nilai MDD yang terus meningkat seiring penambahan ESP seperti ditunjukkan pada Gambar 3



Gambar 3 Grafik Hubungan Pertambahan ESP dengan Kadar Air Optimum (%) dan Maksimum Dry Dentity (gr/cm^3) .

Penurunan nilai OMC ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Harikaran et al., 2023) dimana nilai plastisitas tanah terus mengalami penurunan seiring dengan penambahan persentase ESP hal ini disebabkan karena kation di permukaan tanah ditemukan digantikan oleh kalsium, hal ini pada akhirnya meningkatkan flokulasi dan agregasi sehingga tanah ekspansif yang diolah menjadi kurang plastis (Sathiparan, 2021).

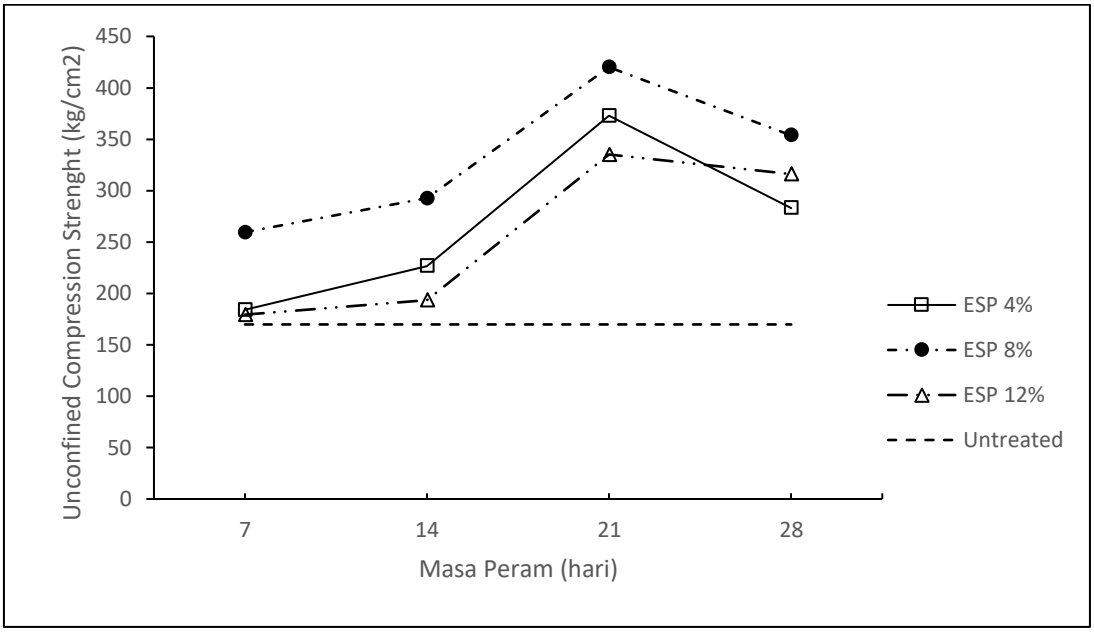
Hasil pengujian kuat tekan bebas penambahan cangkang telur sebanyak 4% menunjukkan bahwa terjadi pengkatan nilai UCS dibandingkan tanah asli seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Hubungan Nilai Kuat Tekan Bebas Terhadap Masa Peram Penambahan ESP 4%

Berdasarkan Gambar 4 dapat terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai UCS tanah dibandingkan dengan tanah asli. Pada masa peram 7 hari hingga 28 hari nilai UCS meningkat signifikan dibandingkan dengan tanah asli. Hal ini juga terjadi pada penambahan ESP 8% dan12% dimana terjadi peningkatan nilai UCS seiring penambahan masa peram seperti yang terlihat pada Gambar 5. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa penambahan ESP dengan semua variasi yang di tambahkan meningkatkan nilai UCS dibandingkan dengan nilai UCS tanah asli dan terus meningkat seiring dengan penambahan masa peram. Dan peningkatan tertinggi terjadi pada penambahan 8% ESP dengan masa peram 21 hari. Nilai UCS meningkat hingga dua kali lipat dari tanah asli. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian (Al-Safy, 2015)(Jaber et al., 2020) yang menunjukkan bahwa semakin lama masa peram maka kuat tekan juga semakin meningkat.

Tetapi dari 3 variasi yang digunakan penambahan 8% ESP memberikan peningkatan yang paling baik dibandingkan dengan variasi persentase yang lain. Pada penambahan ESP 12% justru menunjukkan peningkatan nilai UCS yang paling rendah hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Tiong yang menyatakan bahwa ESP dapat membantu meningkatkan nilai UCS dengan sangat baik jika persentasi yang ditambahkan berada pada kondisi yang optimum (Tiong et al., 2020) .



Gambar 6 Grafik Hubungan Nilai Kuat Tekan Bebas Untuk Tiap Variasi Campuran ESP

Tetapi dalam hasil percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini pada masa peram 28 hari kuat tekan semua sampel dari 3 variasi ESP yang ada mengalami penurunan kuat tekan. Dan penurunan yang terjadi cukup signifikan dibandingkan dengan nilai kuat tekan umur 21 hari hal ini terjadi karena pada umur 28 hari sampel terlihat sangat kaku dan rapuh sehingga ketika diberikan penekanan sampel cepat sekali runtuh. Hal ini terjadi karena pengurangan air yang signifikan setelah umur 28 hari sehingga sampel menjadi terlalu kaku. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh(Sathiparan, 2021) bahwa semakin tinggi prentase ESP kelenturan material juga semakin menurun dan penyerapan air juga semakin kecil.

3. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa penambahan ESP pada semua variasi konsentrasi meningkatkan nilai UCS dibandingkan dengan tanah tanpa perlakuan (*untreated*) tetapi konsentrasi yang paling optimum adalah di 8% karena dapat meningkatkan hingga lebig dari dua kali lipat. Tetapi dari semua sampel yang dibuat mengalami penurunan kekuatan setelah di 28 hari masa perawatan hal ini terjadi karena sampel semakin kaku. Terhadap sifat fisik tanah juga mengalami perubahan dimana penambahan ESP menyebabkan peningkatan berat isi tanah kering dan mengurangi kadar air karena sifat tanah lempung yang mudah menyerap air akan ditutupi oleh ESP yang mengandung kalsium.

DAFTAR PUSTAKA

Abdulrahman, S. M., Al-gharbawi, A. S. A., & Al-sultan, A. A. (2023). Effect of Engineering Properties of Soft Clay Soil Stabilized with Limestone, Eggshells Powder and Eggshells Ash. *Water and Environmental Sustainability*. https://doi.org/10.52293/wes.3.2.6875

Al-Safy, R. A. (2015). Experimental Investigation on Properties of Cement Mortar Incorporating Eggshell Powder. *Journal of Engineering and Development*, *19*(06), 1999–8716. www.jead.org

Consoli, N. C., Caicedo, A. M. L., Beck Saldanha, R., Filho, H. C. S., & Acosta, C. J. M. (2020). Eggshell Produced Limes: Innovative Materials for Soil Stabilization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *32*(11), 1–7. https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003418

Harahap, M. P. S., Nasution, D. W., Hastuty, I. P., Roesyanto, R., & Nuraliman, A. (2023). Pengaruh

Penambahan Abu Tandan Sawit dan 12% Serbuk Cangkang Telur Terhadap Stabilisasi Tanah Lempung Ditinjau Dari Nilai CBR dan UCT. *Blend Sains Jurnal Teknik*, *2*(2), 156–167. https://doi.org/10.56211/blendsains.v2i2.328

Harikaran, M., Kulanthaivel, P., Gokulakannan, S., & Vinodhkumar, S. (2023). Eco-friendly soil stabilization: a combined approach using lime and waste eggshell powder. *Global Nest Journal*, *25*(7), 120–130. https://doi.org/10.30955/gnj.005077

Indriani, A. M., & Utomo, G. (2023). Pengaruh Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) terhadap Perilaku Kuat Geser Tanah Terkontaminasi Batubara. *Cived*, *10*(1), 53. https://doi.org/10.24036/cived.v10i1.122318

Indriani, A. M., Utomo, G., Ryka, H., & Kalimantan, E. (2022). *The Effect Of Microbially Induced Calcite Precipitation (Micp) On Shear Strength Of*. 28–32.

Jaber, H. A., Mahdi, R. S., & Hassan, A. K. (2020). Influence of eggshell powder on the Portland cement mortar properties. *Materials Today: Proceedings*, *20*(xxxx), 391–396. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.153

Kusuma, R. I., Mina, E., Fathonah, W., & Yasin, Z. I. (2022). Pemanfaatan Limbah Serbuk Bata Merah Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Sipil*, *19*(2), 119–126. https://doi.org/10.30630/jirs.v19i2.878

Kusuma, R. I., Mina, E., & O M, B. R. (2015). Stabilisasi Tanah Lempung dengan Menggunakan Abu Sawit terhadap Nilai Kuat Tekan Bebas (Studi Kasus Jalan Desa Cibeulah, Pandeglang). *Fondasi*, *4*, 69–80.

Marini, A., Utomo, G., & Nur Fadhillah, M. (2021). Pengaruh Semen Pada Tanah Lempung Plastisitas Rendah Terhadap Nilai Cbr. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil TRANSUKMA*, *4*(1), 23–32. https://doi.org/10.36277/transukma.v4i1.107

Maulana, I. (2021). *Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Campuran Cangkang Telur Terhadap Nilai CBR*. Universitas Islam Riau.

Mina, E., Kusuma, R. I., & Ridwan, J. (2017). Stabilisasi tanah lempung menggunakan pasir laut dan pengaruhnya terhadap nilai kuat tekan bebas (Studi Kasus: Jalan Mangkualam Kecamatan Cimanggu–Banten). *Fondasi Jurnal Teknik Sipil*, *6*(2), 13–23.

Mindiastiwi, T., & Rizky Romadlon, F. (2023). Kapur Sebagai Bahan Stabilisasi Tanah Lempung Berplastisitas Tinggi dengan Uji Unconfined Compression Test (UCT). *Jurnal Teknik Sipil*, *16*(1), 64–72. https://doi.org/10.56444/jts.v16i1.200

Ridwan, M., & Roesyanto. (n.d.). Kajian Efektifitas Penggunaan Limbah Karbit Terhadap Stabilitas Tanah Lempung Dengan Pengujian CBR Dan UCT. *Universitas*, *6*(5).

Sathiparan, N. (2021). Utilization prospects of eggshell powder in sustainable construction material – A review. *Construction and Building Materials*, *293*, 123465. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123465

Syahrul, S.-. (2023). Efektifitas Penambahan Semen Pada Stabilitas Tanah Lokal Samarinda. *Borneo Engineering : Jurnal Teknik Sipil*, *1*(1), 71–80. https://doi.org/10.35334/be.v1i1.2659

Tiong, H. Y., Lim, S. K., Lee, Y. L., Ong, C. F., & Yew, M. K. (2020). Environmental impact and quality assessment of using eggshell powder incorporated in lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials*, *244*, 118341. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118341

Penelitian ini menggunakan metode pengujian kuat tekan bebas (Unconfined Compression Test/UCT) untuk mengevaluasi efektivitas campuran cangkang telur (Eggshell Powder/ESP)

dalam meningkatkan stabilitas tanah lempung (Mindiastiwi & Rizky Romadlon, 2023). UCT adalah salah satu metode yang sering digunakan untuk mengukur kekuatan tanah tanpa adanya pembebanan lateral, yang memberikan gambaran jelas mengenai peningkatan sifat mekanik tanah setelah stabilisasi (Kusuma et al., 2015).

Dalam penelitian ini, cangkang telur dikumpulkan, dibersihkan, dan dihaluskan menjadi serbuk halus yang dapat dicampurkan dengan tanah lempung (Mina et al., 2017). Variasi persentase ESP digunakan untuk menentukan campuran yang paling efektif dalam meningkatkan kekuatan tanah (Syahrul, 2023). Proses pencampuran dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan distribusi serbuk cangkang telur yang merata dalam tanah. Setelah itu, sampel tanah yang telah dicampur dengan ESP diuji menggunakan metode UCT untuk mengevaluasi perubahan sifat mekaniknya (Kusuma et al., 2015).

Secara keseluruhan, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan memvalidasi efektivitas penggunaan cangkang telur sebagai bahan stabilisasi tanah lempung. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan metode stabilisasi tanah yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan, yang dapat diterapkan dalam berbagai proyek konstruksi di masa depan. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap upaya pengelolaan limbah dan perlindungan lingkungan di Indonesia.

PENYELIDIKAN TANAH YANG EFEKTIF UNTUK KAJIAN PONDASI BANGUNAN GEDUNG SEDERHANA DALAM KONTEKS PERIZINAN SLF/PBG

I Made Kusuma Wiranata[1*], I Nengah Sinarta[2],

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong 24 Tanjung Bungkak Denpasar Bali, Indonesia*

***e-mail**: kusumawiranata@warmadewa.ac.id*

ABSTRAK

Penyelidikan tanah merupakan tahapan penting dalam proses perencanaan bangunan sipil. Penyelidikan tanah dapat memastikan kestabilan dan keamanan pondasi bangunan, khususnya dalam konteks perizinan SLF/PBG (Sertifikat Laik Fungsi/Persetujuan Bangunan Gedung). Namun, pada bangunan gedung sederhana, terutama yang berada di daerah datar dan lereng, kesadaran akan pentingnya penyelidikan tanah sering kali masih rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi metode penyelidikan tanah yang efektif dan sesuai untuk desain pondasi bangunan sederhana guna memenuhi persyaratan perizinan SLF/PBG. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi studi literatur dan Focus Group Discussion (FGD) dengan para praktisi teknis yang terlibat dalam pengurusan perizinan bangunan. Fokus penelitian adalah pada penggunaan uji CPT (*Cone Penetration Test*) dan SPT (*Standard Penetration Test*) sebagai teknik utama penyelidikan tanah, serta analisis laboratorium tambahan untuk bangunan di daerah lereng. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk bangunan di daerah datar penyelidikan tanah yang direkomendasikan yaitu kombinasi uji CPT dan SPT, kemudian untuk di daerah tebing atau lereng perlu dilakukan penyelidikan tanah laboratorium untuk memberikan data yang cukup untuk desain pondasi yang aman dan sesuai standar perizinan. Penelitian ini juga mengidentifikasi tantangan utama dalam pelaksanaan penyelidikan tanah, seperti kurangnya sumber daya dan pengetahuan teknis di lapangan. Rekomendasi yang dihasilkan mencakup standar minimal penyelidikan tanah untuk mendukung perizinan bangunan sederahan yang lebih efisien dan efektif di Indonesia.

Kata kunci: Penyelidikan Tanah, Perizinan SLF/PBG, *Cone Penetration Test, Standard Penetration Test,* Penyelidikan Tanah Laboratorium

1. PENDAHULUAN

Pasca pandemi COVID-19, pembangunan infrastruktur dan akomodasi pendukung pariwisata di Bali mengalami peningkatan yang signifikan. Seiring dengan pemulihan sektor pariwisata, permintaan akan fasilitas akomodasi seperti hotel dan vila melonjak drastis. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik Provinsi Bali, jumlah kamar hotel nonbintang meningkat dari 32.810 kamar pada tahun 2021 menjadi 36.886 kamar pada tahun 2023. Peningkatan ini menunjukkan adanya percepatan pembangunan yang signifikan di Pulau Bali, di mana sektor pariwisata tetap menjadi salah satu motor penggerak utama perekonomian lokal (Badan Pusat Statistik Provinsi Bali, 2021, 2024).

Namun, pesatnya pembangunan ini juga membawa tantangan tersendiri, terutama dalam hal perencanaan struktur bangunan yang aman dan berkelanjutan. Salah satu aspek krusial dalam proses ini adalah penyelidikan tanah. Penyelidikan tanah bertujuan untuk memahami karakteristik tanah di lokasi pembangunan, yang sangat penting dalam menentukan desain pondasi yang aman dan stabil. Keberhasilan suatu bangunan, terutama dalam menahan beban dan menghindari kerusakan struktural, sangat tergantung pada kondisi tanah di bawahnya (Sudjatmiko, 2022).

Dalam proses perencanaan pembangunan, terutama untuk memperoleh Sertifikat Laik Fungsi (SLF) dan Persetujuan Bangunan Gedung (PBG), penyelidikan tanah menjadi bagian integral yang tidak boleh diabaikan. Berbagai metode penyelidikan tanah lapangan, seperti *Cone Penetration Test* (CPT) dan *Standard Penetration Test* (SPT), sering digunakan untuk menentukan daya dukung tanah serta kestabilan pondasi (Prayogo & Saptowati, 2016). Hasil dari penyelidikan ini digunakan sebagai acuan dan dasar untuk merancang fondasi yang mampu menahan beban bangunan dan menghindari risiko penurunan tanah (settlement) yang tidak seragam, terutama di daerah rawan gempa dan longsor seperti Bali.

Namun, meskipun pentingnya penyelidikan tanah telah diakui secara luas, masih banyak pembangunan di daerah pedesaan dan kawasan pariwisata yang dilakukan tanpa kajian yang memadai. Kesadaran akan pentingnya penyelidikan tanah, khususnya untuk bangunan sederhana di daerah datar dan lereng, masih rendah. Banyak proyek pembangunan yang mengabaikan tahap ini, baik karena keterbatasan biaya, waktu, maupun pengetahuan teknis (Nugroho et al., 2019). Akibatnya, kegagalan pondasi sering kali menjadi masalah utama yang dihadapi oleh bangunan-bangunan baru. Retakan pada struktur, penurunan yang tidak merata, hingga keruntuhan bangunan adalah beberapa dampak fatal yang mungkin terjadi akibat pondasi yang tidak dirancang berdasarkan kondisi tanah yang tepat (Orlando & Sentosa, 2021).

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi berbagai metode penyelidikan tanah yang paling efektif untuk bangunan sederhana, khususnya dalam memenuhi persyaratan perizinan SLF dan PBG. Melalui pendekatan studi literatur serta diskusi kelompok terarah (Focus Group Discussion/FGD) dengan praktisi di bidang teknik sipil, diharapkan penelitian ini dapat memberikan rekomendasi mengenai standar minimal penyelidikan tanah yang dapat diterapkan di Indonesia. Rekomendasi ini bertujuan untuk menciptakan proses perizinan yang lebih efisien dan efektif, tanpa mengurangi aspek keamanan dan keberlanjutan bangunan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Perizinan Sertifikat Laik Fungsi / Persetujuan Bangunan Gedung

Persetujuan Bangunan Gedung (PBG) dan Sertifikat Lain Fungsi merupakan transformasi perizinan bangunan gedung yang dulu bernama Izin Mendirikan Bangunan (IMB) yang diatur dalam Undang-undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung serta Peraturan Pemerintah Nomor 36 Tahun 2005 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung. Nomenklatur penamaan IMB berubah menjadai PBG dengan dikeluarnya Peraturan Pemerintah Nomor 16 tahun 2021 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang – Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung(Wijaya & Syafhendry, 2023).

Perubahan ini menjadi upaya dalam penyederhanaan dan juga transformasi perizinan bangunan gedung agar lebih mudah dalam pengurusan dan pengontrolan ijin bangunan.

Penyelidikan Tanah

Penyelidikan tanah harus menyediakan informasi penting yang terkait dengan pekerjaan konstruksi dan menjadi dasar untuk menilai parameter geoteknik selama seluruh tahap proyek. Informasi ini harus memungkinkan evaluasi hal-hal berikut:

- Kesesuaian lokasi dengan pembangunan yang direncanakan serta tingkat risiko yang dapat diterima.
- Deformasi tanah yang diakibatkan oleh pembangunan dan perilakunya seiring waktu.
- Keamanan terkait kondisi batas seperti penurunan tanah, pergeseran, atau penekukan tiang pancang.
- Beban yang diteruskan dari tanah ke struktur, seperti tekanan lateral pada tiang pancang.
- Metode fondasi, seperti perbaikan tanah, kemampuan menggali, dan drainase.
- Urutan pelaksanaan pekerjaan fondasi.
- Dampak bangunan terhadap lingkungan sekitarnya.
- Langkah-langkah struktural tambahan yang diperlukan, seperti penopang atau angkur.
- Pengaruh pembangunan terhadap lingkungan.
- Tingkat dan jenis kontaminasi tanah di lokasi dan sekitarnya, serta efektivitas langkah-langkah penanganannya.

Cakupan penyelidikan tanah harus disesuaikan dengan jenis dan desain konstruksi, seperti tipe fondasi, metode perbaikan tanah, atau struktur penahan tanah (Persyaratan Perancangan Geoteknik, 2017).

Penyelidikan Tanah Lapangan

Jika penyelidikan awal tidak memberikan informasi yang cukup untuk mengevaluasi aspek yang diperlukan, maka penyelidikan tambahan harus dilakukan pada tahap perancangan. Kegiatan penyelidikan lapangan yang relevan selama tahap ini mencakup beberapa langkah, antara lain:

- Pengeboran atau galian untuk mengambil contoh tanah;
- Pengukuran muka air tanah;
- Pelaksanaan uji lapangan. Penutupan lubang bor harus dilakukan oleh kontraktor menggunakan metode grouting.

Berbagai jenis penyelidikan lapangan yang dapat dilakukan meliputi:

- Uji lapangan, seperti Cone Penetration Test (CPT), Standard Penetration Test (SPT), uji penetrasi dinamis, dan lainnya;
- Pengambilan contoh tanah dan batuan untuk analisis deskripsi dan uji laboratorium;
- Pengukuran air tanah untuk menentukan muka air dan profil tekanan air pori serta fluktuasinya;
- Penyelidikan geofisika, seperti uji seismik dan pengukuran resistivitas tanah;
- Uji skala besar untuk mengevaluasi daya dukung atau perilaku elemen struktur tertentu, seperti angkur.

Jika terdapat indikasi potensi kontaminasi tanah atau gas, informasi harus dikumpulkan dari sumber yang relevan dan diperhitungkan dalam perencanaan. Jika kontaminasi terdeteksi selama penyelidikan, hal ini wajib dilaporkan kepada

klien dan pihak berwenang (Persyaratan Perancangan Geoteknik, 2017) (Bela & Sianto, 2022)

Penyelidikan Tanah Laboratorium

Sebelum menyusun program uji laboratorium, perlu ditentukan stratigrafi setempat dan memilih lapisan relevan untuk desain berdasarkan kompleksitas geoteknik dan geologi. Inspeksi visual pada contoh tanah dari bor dan test pit, yang didukung oleh uji manual sederhana, akan membantu mengidentifikasi profil tanah awal. Jika terdapat perbedaan signifikan dalam satu lapisan, lapisan tersebut dapat dibagi lebih lanjut.

Jenis konstruksi, tanah, dan parameter geoteknik harus dipertimbangkan dalam perencanaan uji laboratorium. Program uji bergantung pada kualitas dan cakupan pengalaman sebelumnya serta pengamatan lapangan dari struktur di sekitarnya. Pengujian harus dilakukan pada benda uji yang mewakili setiap lapisan tanah.

Jumlah pengujian ditentukan oleh homogenitas tanah dan pengalaman sebelumnya. Tambahan benda uji disiapkan untuk kemungkinan masalah. Jumlah minimum benda uji mengikuti tabel rekomendasi, dan dapat dikurangi jika parameter tanah yang digunakan bersifat konservatif.

Uji klasifikasi dilakukan untuk menentukan komposisi dan sifat indeks lapisan tanah. Distribusi contoh tanah harus merata di seluruh area dan kedalaman yang relevan. Hasil uji akan digunakan untuk mengevaluasi kecukupan penyelidikan atau kebutuhan penyelidikan lebih lanjut.

Untuk uji tanah, benda uji harus mencakup rentang sifat setiap lapisan, dan material yang dibentuk ulang dapat digunakan untuk lapisan pasir atau kerikil. Sedangkan uji batuan mencakup klasifikasi geologi, kepadatan, kadar air, porositas, kuat tekan, modulus elastisitas, dan uji indeks kekuatan (Persyaratan Perancangan Geoteknik, 2017).

Model Kerusakan Bangunan

Kerusakan bangunan gedung dapat terjadi akibat kegagalan pada pondasi. Beberapa kerusakan yang terjadi dapat berupa kerusakan struktural dan juga dapat berupa kerusakan non struktural.

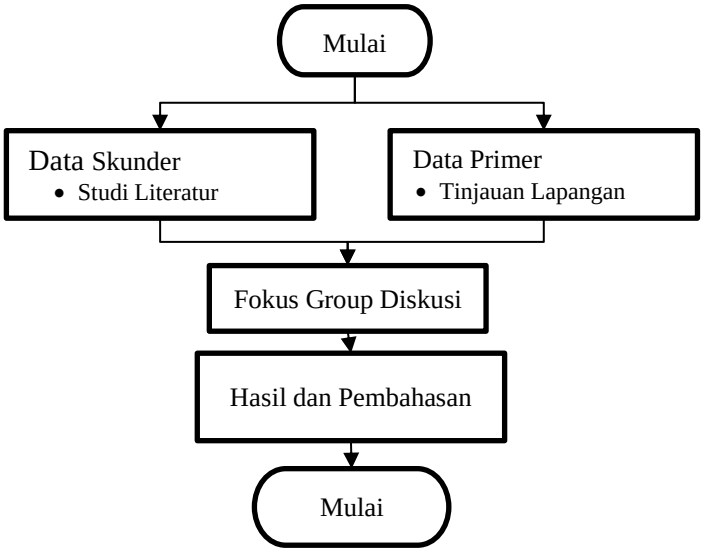


Gambar 1. Kerusakan struktur join dan retak pada tembok
sumber : (Marzuki & Alpiannor, 2016)

Gambar 1 merupakan kerusakan struktur yang diakibatkan oleh penurunan yang tidak seragam (differential settlement), karena daya dukung pondasi yang tidak cukup menahan beban yang bekerja di atas pondasi. Tidak adanya penyelidikan tanah dapat menyebabkan kesalahan pemilihan jenis pondasi sehingga dapat merusak bangunan di atasnya (Pranoto & Setiabudi, 2017).

3. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode deskriptif dengan studi literatur tentang penyelidikan – penyeldikan tanah dan juga Fokus Group Diskusi yang digunakan untuk memilih penyelidikan yang efisien untuk perencanaan dan juga perizinan pada bangunan gedung (Sugiyono, 2013)(Afiyanti, 2008).



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Data skunder diambil dari beberapa jurnal dan juga Standar Nasional Indonesia dan beberapa tinjauan lapangan langsung dilakukan untuk mendapatkan visual kegagalan pondasi bangunan. Dari data tersebut dilakukan fokus group diskusi dengan tim pengkaji teknis dokumen perijinan PBG/SLF untuk mencari penyelidikan tanah yang efektif, efesien dan cukup dalam mendesain dan mengecek kapasitas pondasi untuk perijinan SLF/PBG.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyelidikan tanah untuk bangunan sederhana sangat jarang dilakukan sebelum pembangunan terutama pada bangunan sederhana kurang dari 3 lantai. Bangunan sederhana dianggap memiliki beban yang tidak begitu besar sehingga beberapa *owner*/pemilik menganggap penyelidikan tanah tidak begitu penting. Pembangunan rumah tanpa penyelidikan tanah dapat mempercepat kerusakan bangunan baik arsitektural bahkan dalam jangka panjang dapat menyebabkan kerusakan struktural bangunan.



Gambar 3 Salah satu kerusakan aristektural yang terjadi pada bangunan yang ada pada lereng tanpa penyelidikan tanah yang cukup

Harga dari penyelidikan tanah yang lengkap dan sesuai dengan rekomendasi SNI perencanaan geoteknik cukup mahal dan terbatas di setiap daerah jika untuk pembangunan bangunan yang sederhana. Sehingga perlu dilakukan solusi untuk tidak mengurangi kualitas bangunan sederhana sehingga menjadi bangunan yang kokoh dan tangguh terhadap risiko bencana yang sering terjadi di Indonesia.

Tabel 1 Rekomendasi Penyelidikan Tanah Bangunan Sederhana

Jenis Pengujian	Lereng		Datar	
	Lantai 1	Lantai 2	Lantai 1	Lantai 2
CPT (Sondir)	✓	✓	✓	✓
SPT (Hand Boring)	✓	✓	✓	✓
Properties Tanah (Lab)	✓	✓		
Kuat Geser (Lab)	✓	✓		

Dari hasil kajian literatur yang dilakukan terdapat beberapa penyelidikan tanah yang dapat dilakukan, yaitu penyelidikan lapangan dan juga penyelidikan laboratorium. Hasil fokus group diskusi dari beberapa jenis pengujian yang dapat dilakukan untuk design atau mengkaji pondasi dilihat lagi dari lokasi di mana bangunan tersebut dibangun. Untuk bangunan yang berada di daerah yang datar tidak ada keperluan untuk mengetahui sudut geser sehingga pengujian lapangan cukup untuk mendesign pondasi, sedangkan bangunan yang ada di daerah lereng atau perbukitan perlu dilakukan penyelidikan tanah yang dapat menghasilkan sudut geser dan kohesi untuk merencanakan pondasi yang cocok untuk bangunan maupun upaya stabilitas lereng yang ada. Penyelidikan tanah ini cukup untuk mengkaji pondasi paling tidak untuk proses perijinan SLF/PBG yang akan diajukan untuk tipe bangunan sederhana.

5. KESIMPULAN

Penyelidikan tanah yang perlu dilakukan paling banyak dipengaruhi oleh lokasi bangunan tersebut akan dibangun. Bangunan sederhana kurang dari 3 lantai dengan lokasi topografi yang agak curam atau daerah perbukitan perlu melakuakan penyelidikan tanah CPT (*Sondir*), SPT (*Hand Boring*), penyelidikan laboratorium dengan mendapatkan properties tanah dan kuat geser tanah. Bangunan sederhana yang dibangun pada topografi datar bangunan lantai 1 cukup dengan melakukan pengujian kombinasi CPT (*Sondir*), dan SPT (*Hand Boring*). Rekomendasi ini merupakan penyelidikan tanah untuk bangunan sederhana dan dengan kondisi tanah yang tidak ekstream. Jika didapati tanah yang dengan kondisi yang cukup jelek perlu dilakukan penyelidikan tanah yang lebih komperhensif.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pusat Statistik Provinsi Bali. (2021). *Jumlah Akomodasi, Kamar, dan Tempat Tidur yang Tersedia pada Hotel Nonbintang dan Akomodasi Lainnya Menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Bali, 2020*.

Badan Pusat Statistik Provinsi Bali. (2024). *Jumlah Akomodasi, Kamar, dan Tempat Tidur yang Tersedia pada Hotel Nonbintang dan Akomodasi Lainnya Menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Bali, 2023*.

Bela, K., & Sianto, P. (2022). PENYELIDIKAN TANAH MENGGUNAKAN METODE UJI SONDIR. *Eternitas: Jurnal Teknik Sipil*, *2*, 50–58. https://doi.org/10.30822/eternitas.v2i1.1755

Orlando, & Sentosa, G. S. (2021). STUDI KASUS KEMIRINGAN GEDUNG 4 LANTAI AKIBAT KEGAGALAN FONDASI DI PANGKAL PINANG. *Agustus*, *4*(3), 615–622.

Marzuki, A., & Alpiannor, A. (2016). Evaluasi Kegagalan Pondasi Pada Gedung Bertingkat (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Ruko 3 Lantai – Banua Anyar Banjarmasin). *Infoteknik*, 307–316.

Nugroho, A., Adi Tirta, B., & Tazakka, M. (2019). *Pentingnya pelaksanaan penyelidikan tanah yang tepat untuk proyek geoteknik di kawasan waterfront area, Studi kasus jetty dumai Sumatera Indonesia*.

Persyaratan Perancangan Geoteknik, Pub. L. No. SNI 8460:2017 (2017). www.bsn.go.id

Pranoto, Y., & Setiabudi, R. (2017). EVALUASI PENURUNAN GEDUNG DAN METODE PERBAIKANNYA (STUDI KASUS: KANTOR POS BALIKPAPAN). In *Jurnal Teknik Mesin (JTM)* (Vol. 06).

Prayogo, K., & Saptowati, H. (2016). PENYELIDIKAN STRUKTUR DAN KARAKTERISTIK TANAH UNTUK DESAIN PONDASI IRADIATOR GAMMA KAPASITAS 2 MCi. *Jurnal Perangkat Nuklir*, *10*.

Sudjatmiko, E. T. (2022). SPT and CPT Correlation of Expansive Clay in Cikarang, Indonesia. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 245–256. https://doi.org/10.22146/jcef.3458

Sugiyono, Prof. Dr. (2013). *Metodelogi penelitian kuantitatif, kualitatif dan R&D*. Alfabeta.

Wijaya, M., & Syafhendry. (2023). Persetujuan Bangunan Gedung; Inovasi Kebijakan atau Involusi

Kebijakan? *PUBLIC POLICY (Jurnal Aplikasi Kebijakan Publik & Bisnis)*, *4*(1), 176–192. https://doi.org/10.51135/publicpolicy.v4.i1.p176-192

ANALISIS HIDROLIKA PELIMPAH TAMBAHAN PADA BENDUNGAN MANIKIN DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM HEC-RAS 6.2 Nikodemus Mbeo Prof. Dr. Ir. Denik Sri Krisnayanti, ST., MT John Hendrik Frans, ST., MT.....1

ANALISIS KAWASAN BANJIR PADA SUNGAI MENGGUNAKAN HYDRAULIC MODEL HEC-RAS 2D *(ANALYSIS FLOODPLAIN AREA IN RIVER USING HYDRAULIC MODEL HEC RAS 2D)* Budi Santosa[1], Yohanes Yuli Mulyanto[2] Naufal Aly Ramadhan[3], Ananta Christuaji W.M[4],.....13

ANALISIS KETERSEDIAAN DEBIT AIR IRIGASI TERHADAP POLA TANAM MASYARAKAT PADA DAERAH IRIGASI HAEKRIT KABUPATEN BELU Roswita Maranatha Tubani I Made Udiana Wilhelmus Bunganaen.....23

ANALISIS KETERSEDIAAN SUMBER DAYA AIR DAN UPAYA KONSERVASI SUB DAS KALI LAMONG LAMONGAN Anita Rahmawati[1*], Faradlillah Saves[2], Gilang Ramadan Kololikiye[1].....34

DETEKSI BANJIR PADA DAERAH ALIRAN SUNGAI SERAYU MENGGUNAKAN MODEL HIDROLOGI SWAT (SOIL WATER ASSESSMENT TOOL) BERDASARKAN DATA CURAH HUJAN SATELIT PERSIANN Bintang Aqshal Danendra Indrastata*[1], Suroso[2], dan Ardiansyah[3].....41

EFEKTIVITAS SALURAN PENGENDALI BANJIR DI KAWASAN EKONOMI KHUSUS (KEK) MANDALIKA: STUDI KASUS SIRKUIT INTERNASIONAL MANDALIKA LOMBOK M. Arifudin Fahmi[1*,2], Nabila H. Trisna[1].....61

EVALUASI HUJAN SATELIT GMP-IMERG DI DAS HALMAHERA SELATAN UNTUK PREDIKSI BANJIR DAN KEKERINGAN Ni Made Candra Partarini1[1*], Yayang Saputra[2], Wilhelmina Tjahyadi[1].....71

EVALUASI KAPASITAS PENAMPANG SUNGAI OESAO AKIBAT DEBIT BANJIR PADA BERBAGAI KALA ULANG Denik Sri Krisnayanti[1], Partogi H. Simatupang[2], Febrian B Perang[3] 77

EVALUASI SALURAN DRAINASE MENGGUNAKAN APLIKASI EPA SWMM 5.2 DI KELURAHAN KEFA SELATAN KOTA KEFAMENANU Carol do R. Pakaenoni[1),] Denik Sri Krisnayanti [2)], Remigildus Cornelis [3)] dan John H. Frans[4)].....90

GELOMBANG LAUT (STUDI KASUS: PULAU MAKALEHI, PROVINSI SULAWESI UTARA) Asep Irwan[1*], Muhammad Fatkhurrozi[2], Adinda Maharani[3] dan Arif Bagas Kesuma[4].....91

PERENCANAAN SISTEM AIR BERSIH TAHAN PERUBAHAN IKLIM DESA HAMBALANG Feril Hariati, Dini Aryanti, Tedi Triana.....111

PERENCANAAN SISTEM JARINGAN PERPIPAAN AIR BERSIH MENGGUNAKAN SOFTWARE EPANET 2.0 (STUDI KASUS: DUSUN I NAET DESA NEKMESE KECAMATAN AMARASI SELATAN KABUPATEN KUPANG NUSA TENGGARA TIMUR) Alfis Paulis Notti Ir. I Made Udiana, MT. Dr. Ir. Judi K. Nasjono, ST., MT.....121

ANALISIS KEBUTUHAN INFRASTRUKTUR SISTEM PEMANENAN AIR DI SUBAK BALANGAN DESA KUWUM KABUPATEN BADUNG I Gusti Agung Putu Eryani[1*], Made Widya Jayantari[2], dan I Gusti Ngurah Hesa Respati Haditama[3].....136

SISTEM DRAINASE BERKELANJUTAN PADA KOMPLEK PERUMAHAN Andung Yunianta[1*], Sigit Riswanto[2], dan Mamik Wantoro[3].....146

STABILITAS BENDUNGAN INTI ASPAL TERHADAP BEBAN GEMPA DASAR OPERASI (OPERATING BASIS EARTHQUAKE) Andrea Z. Galla[1*], Denik Sri Krisnayanti[2] dan Tri M. W. Sir[3].....157

ANALISIS DEBIT BANJIR RANCANGAN DAERAH ALIRAN SUNGAI YEH HO DENGAN METODE HSS NAKAYASU Made Widya Jayantari[1*] dan I Gusti Agung Putu Eryani[2].....163

ANALISIS HIDROLIKA PELIMPAH TAMBAHAN PADA BENDUNGAN MANIKIN DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM HEC-RAS 6.2

Nikodemus Mbeo
Prof. Dr. Ir. Denik Sri Krisnayanti, ST., MT
John Hendrik Frans, ST., MT

Civil Engineering, Nusa Cendana University, Kupang
***e-mail**: nikodemusmbeo1906@gmail.com*

ABSTRAK

Bendungan Manikin merupakan salah satu dari 7 Bendungan di Provinsi NTT. Bendungan ini memiliki Pelimpah tambahan bertipe *ogge*. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui kecepatan aliran dan profil muka air banjir pada penampang pelimpah tambahan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan analisis Program HEC-RAS 6.2. Hasil penelitian diperoleh profil muka air banjir maksimum untuk debit Q_{PMF} pada penampang persegi berada di elevasi 151,74 m dan minimum berada di elevasi 146,79 m, penampang *boxculvert* muka air di elevasi 144,51 m dan minimum di elevasi 143,14 m, penampang persegi panjang muka air di elevasi 144,30 m dan minimum di elevasi 143,95 m, penampang trapesium di elevasi 143,58 m dan minimun di elevasi 105,56 m. Sedangkan debit Q_{1000} tahun muka air maksimum pada penampang persegi di elevasi 150,18 m, dan minimun di elevasi 142,79 m, penampang *boxculvert* muka air di elevasi 141,91 m dan minimum di elevasi 141,23 m, penampang persegi panjang muka air di elevasi 141,31 m dan minimum di elevasi 140,80 m, pada penampang trapesium muka air di elevasi 140,81 m dan minimum di elevasi 103,02 m. Kecepatan rata-rata aliran untuk debit Q_{PMF} sebesar 5,00 m/s dan debit Q_{1000} tahun sebesar 1,29 m/s.

Kata kunci: Pelimpah tambahan Bendungan, Hidrolika aliran, HEC-RAS

1. PENDAHULUAN

Bendungan Manikin terletak di Desa Kuaklalo, Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur (NTT). Bendungan Manikin ini merupakan bendungan kelima dari tujuh bendungan yang di bangun di Provinsi NTT. Bendungan ini di desain dengan tipe urugan random batu gamping dengan inti tegak yang memiliki kapasitas tampungan 28,20 juta m^3 air dan luasan genangan normal 148,7 Hektar (Ha). (Balai Wilayah Nusa Tenggara II 2021. Bendungan Manikin).

Bendungan yang sumber airnya berasal dari Sungai Manikin dengan luas Daerah Aliran Sungai (DAS) 49,31 km^2 ini direncanakan dapat memenuhi kebutuhan lahan pertanian seluas 310 Ha di Kabupaten Kupang dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber air baku, sebesar 700 liter/detik. Selain dapat berfungsi sebagai pengendalian banjir, Bendungan Manikin ini juga dimanfaatkan sebagai temapat parawisata. (Balai Wilayah Nusa Tenggara II 2021. Bendungan Manikin).

Pada Bendungan Manikin ini direncanakan bangunan pelimpah yang berfungsi untuk membuang kelebihan air tampungan pada saat terjadi banjir. Pelimpah tambahan Bendungan didesain dengan tipe *Ogee.* Pelimpah tambahan bendungan digunakan untuk menambah kapasitas pelimpah utama jika pelimpah utama tidak mencukupi mengalirkan banjir desain. Pelimpah tambahan bendungan ini memiliki ukuran yang panjang dengan variasi bentuk saluran yang berbeda dari hulu ke hilir, sehingga untuk mengetahui kapasitas aliran pada penampang pelimpah tersebut, tujuan penelitian ini untuk mengetahui kecepatan aliran serta profil muka air pada penampang pelimpah tambahan. Dalam penelitian ini analisis hidrolika dilakukan menggunakan program HEC-RAS 6.2 dengan debit Q_{1000} dan debit PMF.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Kehilangan Tinggi Energi

Kehilangan tinggi energi (h_e) di antara dua penampang melintang terdiri dari dua komponen yakni kehilangan energi akibat gesekan (*friction losses*) dan kehilangan energi akibat perubahan penampang (*contraction or expantion losses*) (Martiani et al., 2020), dengan persamaan berikut :

$$h_e = C \frac{\alpha_2 v_2}{2g} - \frac{\alpha_1 v_1}{2g}$$

Dimana :
he = Kehilangan energi (m)
C = Koefisien ekspansi dan kontraksi
a2,a1 = Koefisien energi
v1,v2 = Tinggi kecepatan (m/s)
g = Percepatan gravitasi (m/s)

Persamaan Kontuinitas

Aliran di saluran atau sungai merupakan proses fisik yang mengikuti hukum kekekalan massa dan kekekalan momentum. Proses fisik ini dapat digambarkan dengan persamaan matematis, yang dikenal sebagai Persamaan St. Venant. Persamaan St. Venant terdiri dari persamaan kontinuitas (prinsip konservasi massa) dan persamaan momentum (prinsip konservasi momentum), dengan persamaan berikut :

$$Q_1 = Q_2 = A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$$

Dimana :
Q : Debit Aliran (m^3/det)
A : Luas Penampang (m^2)
V : Kecepatan Aliran (m/detik)

Bilangan Froude (Fr)

Bilangan Froude adalah angka nondimensional hubungan antara gaya inertia dan gaya gravitasi pada aliran air. Froude seorang ilmuan Inggris mengamati bahwa hambatan sebuah perahu ketika ditarik dalam air, jumlah gelombang yang terjadi akan sama jika perbandingan kecepatan perahu terhadap akar panjang gelombangnya sama. Dalam hidrolika panjang gelombang adalah sama dengan kedalaman hidrolik, dengan persamaan berikut :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.D}}$$

$$D = \frac{A}{T}$$

Dimana :
V : kecepatan aliran (m/dt)
g : gravitasi (9,8 m/dt^2)
D : kedalaman hidrolik (m)
A : luas tampang aliran (m^2)
T : lebar permukaan aliran (m)

Jagaan (Freeboard)

Jagaan atau *freeboard* dari suatu saluran adalah jarak vertikal dari puncak tanggul sampai permukaan air pada kondisi perencanaan. Tinggi jagaan direncanakan 0,75 m untuk banjir Q_{PMF} sebesar 288,63 m^3/detik sebagai debit kontrol (Konsultan Supervisi Bendungan Manikin, 2023). Tinggi jagaan Q_{PMF} > 0,75 m.

Koefisien Kekasaran Manning (n)

Nilai kekasaran manning (n) merupakan fungsi dari jenis bahan dinding saluran. Nilai koefisien manning yang digunakan dalam menentukan kekasaran dinding saluran dilakukan sesuai dengan saluran tanah (0,016-0,140), saluran pasangan (0,023-0,030), saluran beton (0,014-0,030).

HEC-RAS 6.2

Hec-Ras merupakan sebuah program perangkat lunak komputer yang dibuat oleh *Hydrologic Engineering Center* (HEC), yaitu salah satu divisi dalam *institute for Water Resources* (IWR), dibawah *US Army Corps Of Engineers*

(USACE). Hec-Ras dibuat dengan tujuan untuk dapat memodelkan aliran satu dimensi sebuah sungai atau saluran. Aliran yang dimodelkan yaitu aliran permanen *steady flow* dan aliran tak permanen *unsteady flow.*

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Bendungan Manikin yang terletak secara administratif di Sungai Manikin, diantara Desa Kuaklalo dan Desa Bokong Kecamatan Taebenu. Serta secara topografis terletak pada koordinat $10^0 12' 46''$LS dan $123^0 43' 04''$BT. Lokasi penelitian ini dapat dicapai melalui jalan beraspal dari kota Kupang kearah timur laut arah Penfui yang jarak tempuh kurang lebih 14 km menuju ke Desa Kuaklalo. Jalan masuk kelokasi penelitian sekitar 1,7 km dari Desa Kuaklalo ke Bendungan Manikin.

Jenis Data

Jenis – jenis data dalam penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang didapat dari hasil pengamatan di lapangan yaitu berupa data dokumentasi. Data sekunder adalah data yang diperoleh dari instansi terkait dan hasil studi kepustakaan seperti data penampang pelimpah tambahan dan data debit Q_{1000} dan Q_{PMF}.

Teknik Analisis Data

1. Menyiapkan data-data yang digunakan untuk analisis hidrolika
2. Data geometri dari pelimpah tambahan Bendungan Manikin
   Data geometri yang digunakan yaitu data profil melintang dan profil memanjang pelimpah tambahan Bendungan Manikin.
3. Data debit banjir
   Data debit yang digunakan yaitu data debit dengan kala ulang Q_{1000} dan Q_{PMF}.yang didapatkan dari perencanaan Bendungan Manikin
4. Melakukan analisis hidrolika aliran menggunakan Hec-Ras 6.2
5. Pembuatan *file project* pada Hec-Ras
   Pada bagian *file project* dilakukan penamaan pada *project* yang akan digunakan sebagai tempat untuk penyimpanan *file* analisis hidrolika
6. Menginput data geometri pelimpah tambahan bendungan
   Pada bagian ini dilakukan peng*inputan* data pelimpah tambahan yaitu data *cross section* dan *long section.*
7. Menyimpan data geometri pelimpah tambahan
   Setelah meng*input* data geometri pelimpah maka data tersebut di simpan pada *file* yang telah dibuat untuk di *running*.
8. Menginput data debit banjir rencana
   Meng*input* data debit banjir yang ada kedalam *entering flow data* dan *boundary data.*
9. Menyimpan data debit banjir rencana
   Pada bagian ini data debit di simpan untuk dilakukan *running data.*
10. Melakukan *running unsteady flow* data pada Hec-Ras
    Data yang sudah dimasukan dilakukan *running* untuk mengetahui hasil aliran yang terjadi pada pelimpah tersebut.
11. Menganalisis hasil *running* dan perhitungan dari tabel pada Hec-Ras
    Data-data yang sudah di *input* dilakukan *running* untuk mendapatkan hasil analisis hidrolika yang dibutuhkan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

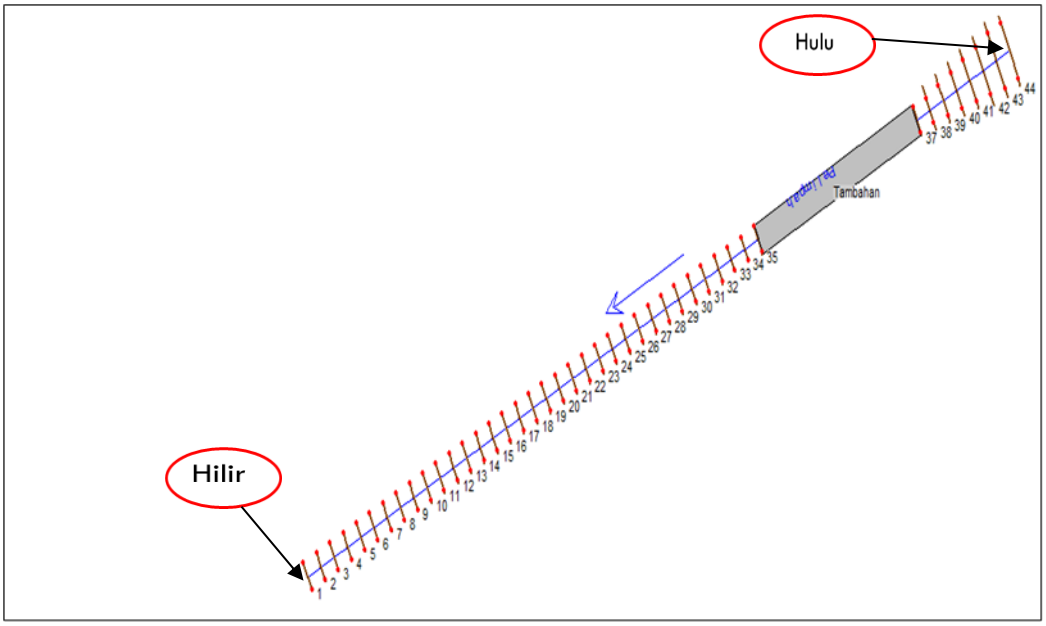
Data Debit Banjir Kala Ulang Q_{1000} Tahun dan Q_{PMF} Tahun

Berdasarkan data hasil perhitungan Konsultan Supervisi Bendungan Manikin Tahun 2023 untuk debit *inflow* dan *outflow* Q_{1000} dan Q_{PMF} hasil *routing* pelimpah Bendungan Manikin didapatkan debit *inflow* Q_{1000} sebesar 734,10 m^3/detik dan Q_{PMF} sebesar 1440,00 m^3/detik dapat dilihat pada Lampiran 4. Sedangkan debit *outflow* yang didapatkan untuk pelimpah Bendungan Manikin yaitu debit *outflow* untuk pelimpah utama dan debit *outflow* untuk pelimpah tambahan. Debit *outflow* yang keluar melalui pelimpah utama untuk Q_{1000} sebesar 343,13 m^3/detik dan debit Q_{PMF} sebesar 537,60 m^3/detik, sedangkan debit *outflow* yang keluar melalui pelimpah tambahan untuk debit Q_{1000} sebesar 4,41 m^3/detik dan debit Q_{PMF} sebesar 288,63 m^3/detik yang merupakan debit sisa dari pelimpah utama Bendungan Manikin.

Skema Alur Pelimpah Tambahan

Dalam penginputan data *cross section* dilakukan dari hilir menuju ke hulu dengan angka "1" menunjukan bagian hilir dan angka "44" menunjukan hulu dari pelimpah tambahan tersebut, dimana angka "1" merupakan Sta. 1+120

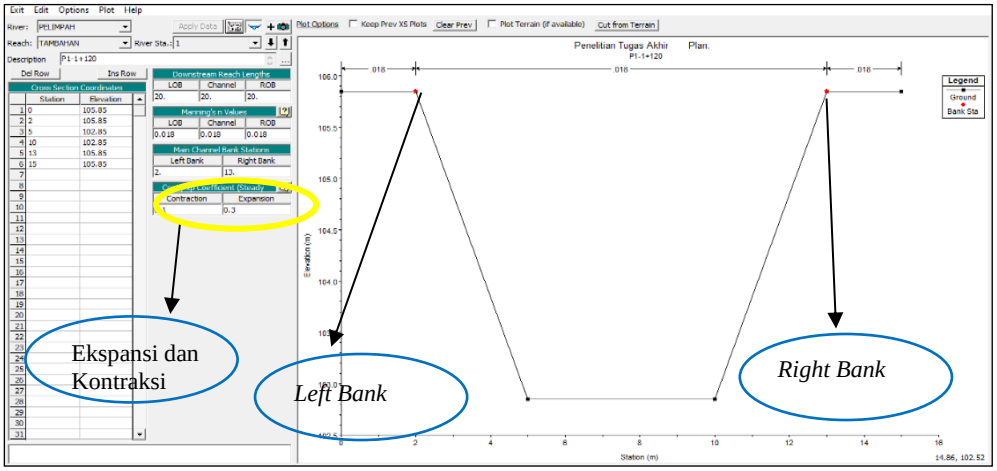
akhir atau P1-1+120 yang terdapat pada Description pada Gambar (4.3), sedangkan angka “44” merupakan Sta.0+060 awal atau P44-0+060.



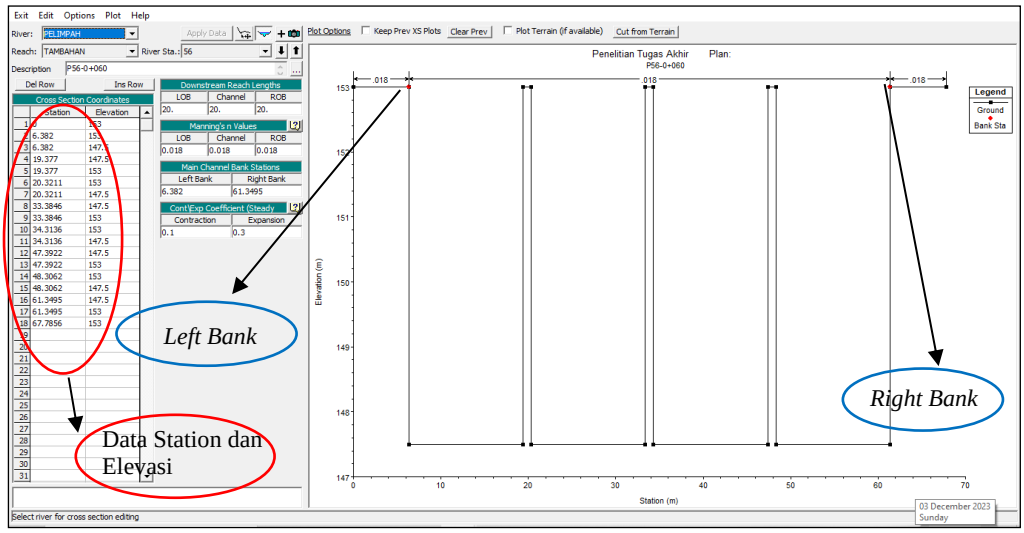
Gambar 1. Alur pelimpah tambahan bendungan manikin

Data Input Cross Section Pelimpah Tambahan

Berikut merupakan gambar data geometri penampang yang harus diinput kedalam HEC-RAS dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Input data *cross section* bagian hilir



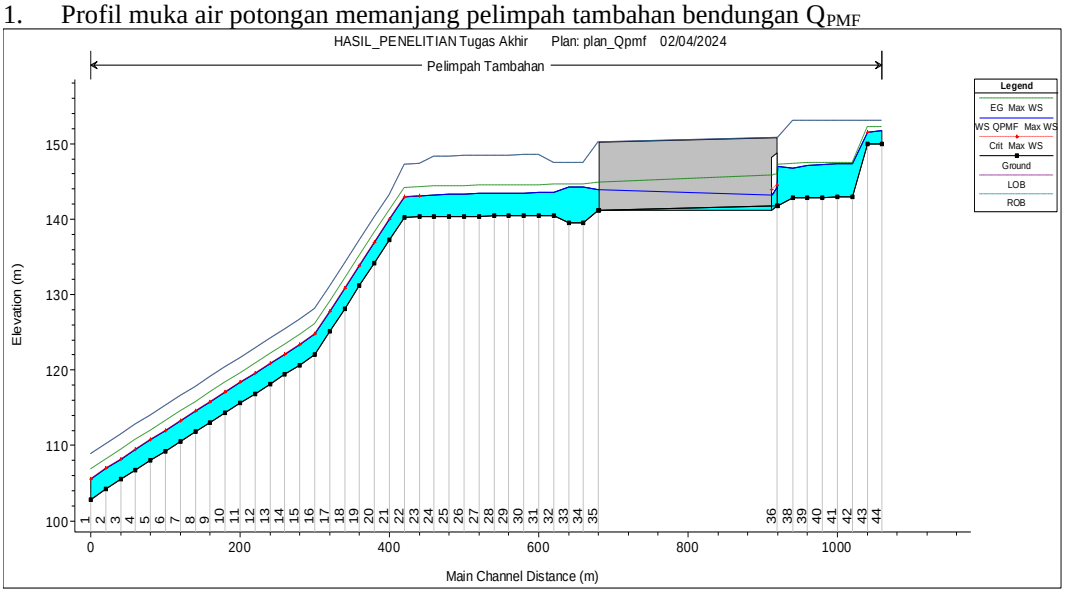
Gambar 3. Input data *cross section* bagian hulu

Data-data yang dimasukan pada input data program hec-ras :

1. *River* Sta, Nama potongan melintang, diisi dengan angka yang berurutan.
2. *Station*, Jarak kumulatif antara titik elevasi potongan dari titik dari titik paling pinggir yang bernilai 0.
3. *Elevation* = Elevasi titik pada station
4. *Doenstream reach length*, jarak tiap potongan melintang Sungai dengan potongan melintang sebelumnya.
5. *Manning's n value,* Nilai angka manning saluran
6. *Main Channel Bank Station*, Station titik saluran utama saluran
7. *Cont/Exp Coeficients*, Koefisien kontraksi dan ekspansi.

Hasil Simulasi Program HEC-RAS pada Penampang Pelimpah Tambahan Kondisi Probable Maximum Flood (PMF)

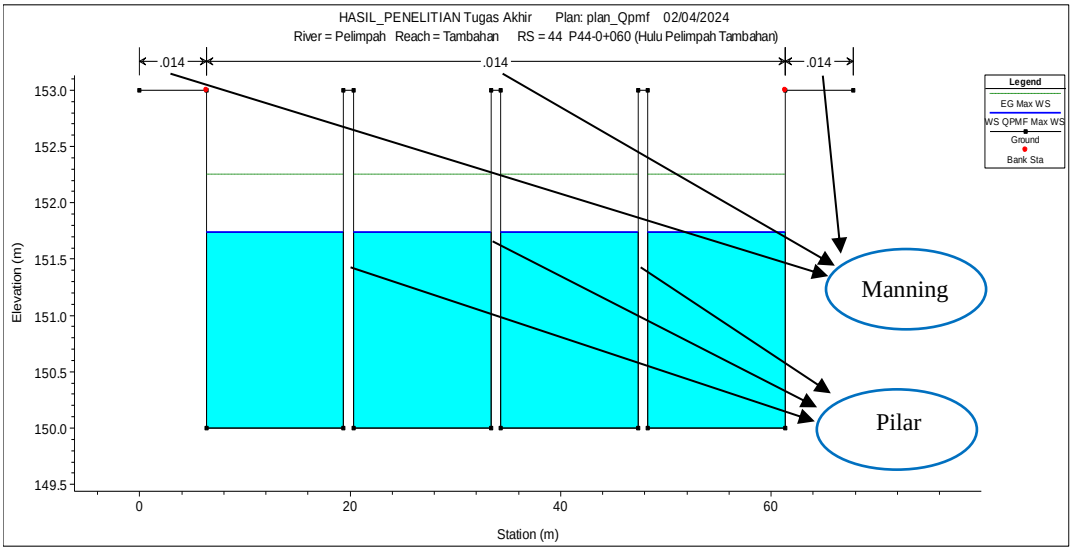
1. Profil muka air potongan memanjang pelimpah tambahan bendungan Q_{PMF}



Gambar 4. Profil memanjang muka air untuk pelimpah tambahan kondisi Q_{PMF}

2. *Cross section* P44-Sta. 0+060 (hulu)

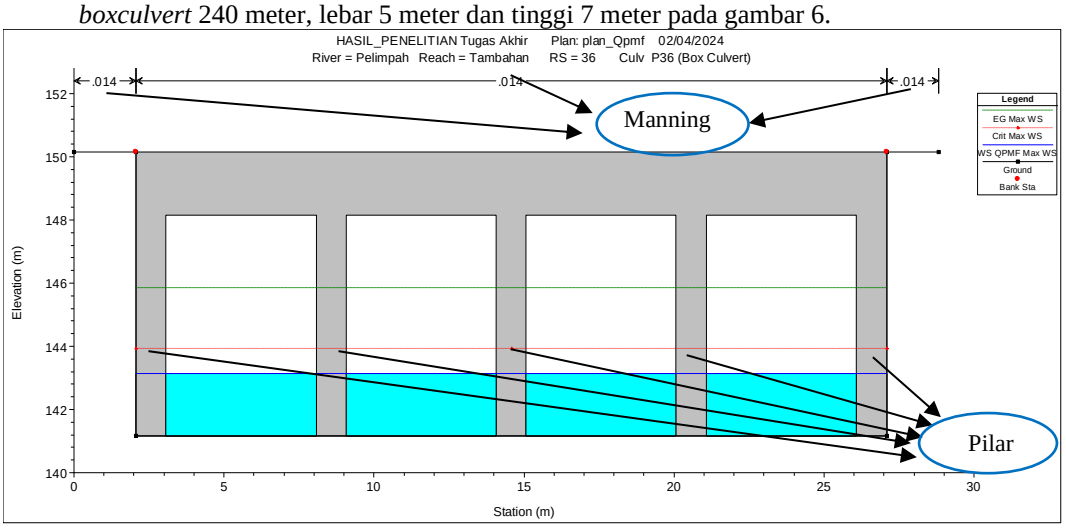
   Pada *cross section* ini memiliki bentuk penampang persegi yang terdiri dari 4 saluran yang sama dengan beberapa *cross section* yaitu pada *cross section* P43-Sta.0+080 sampai *cross section* P38-Sta.0+183.580 pada gambar 5.



Gambar 5. Profil muka air Q_{PMF} pada cross section P44-Sta. 0+060 (hulu)

3. *Cross section* P36-Sta. 0+240

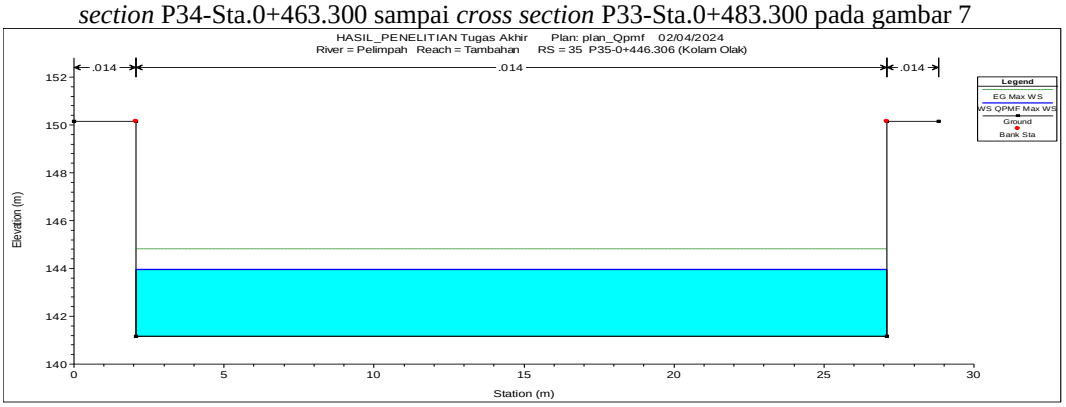
Pada *cross section* ini merupakan *boxculvert* atau saluran hantar yang terdiri dari 4 saluran, dengan panjang *boxculvert* 240 meter, lebar 5 meter dan tinggi 7 meter pada gambar 6.



Gambar 6. Profil muka air Q_{PMF} pada cross section P36-Sta. 0+240

4. *Cross section* P35-Sta. 0+446.306

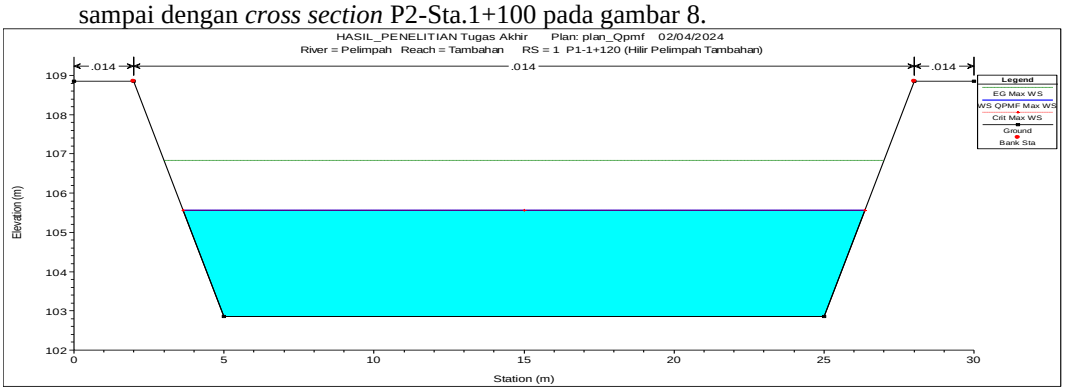
Pada bagian *cross section* ini memiliki bentuk penampang persegi panjang. Pada *cross section* ini juga merupakan kolam olak pelimpah tambahan yang memiliki bentuk penampang yang sama dengan *cross section* P34-Sta.0+463.300 sampai *cross section* P33-Sta.0+483.300 pada gambar 7



Gambar 7. Profil muka air Q_{PMF} pada cross section P35-Sta. 0+446.306

5. *Cross section* P1-Sta. 1+120 (hilir)

Pada *cross section* ini memiliki bentuk penampang trapesium, dimanan pada penampang tersebut memiliki bentuk dan dimensi yang sama dengan beberapa *cross section* yaitu dari *cross section* P32-Sta.0+500 sampai dengan *cross section* P2-Sta.1+100 pada gambar 8.



Gambar 8. Profil muka air Q_{PMF} pada cross section P1-Sta. 1+120 (hilir)

Hasil analisis perhitungan HEC-RAS periode ulang maksimum (Q_{PMF}) untuk seluruh *cross section* pada penampang pelimpah tambahan bendungan pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis Perhitungan HEC-RAS Periode Ulang Maksimum (Q_{PMF})

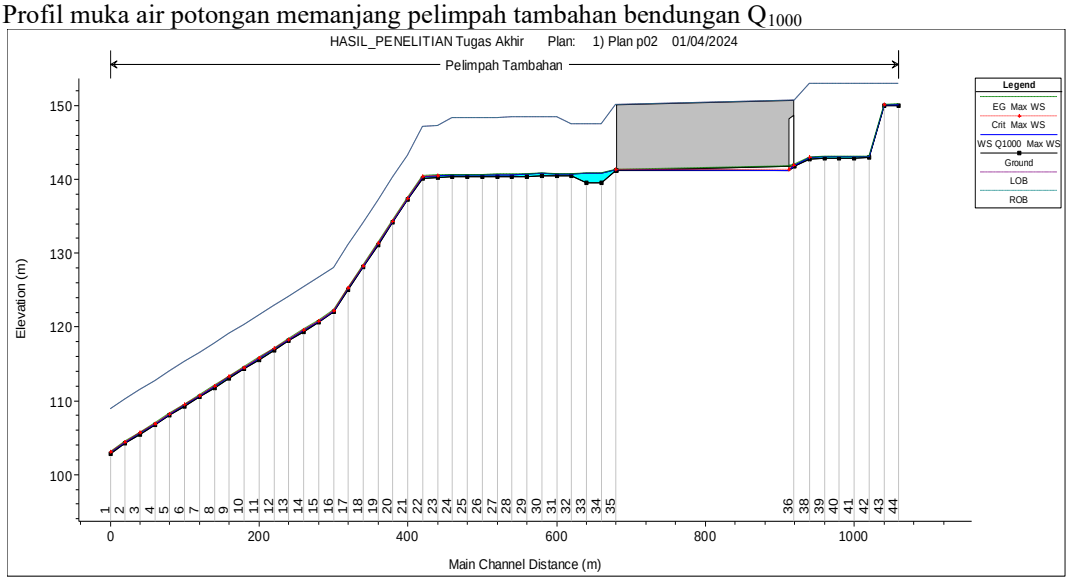
No	Stasiun Pelimpah Tambahan No.	Debit (Q) Total (m^3/s)	Elevasi Dasar Saluran (m)	Elevasi Muka Air (m)	Kecepatan Aliran (m/s)
1	P44	288.63	150.00	151.74	3.18
2	P43	288.63	150.00	151.46	3.80
3	P42	288.63	142.97	147.35	1.55
4	P41	288.63	142.93	147.31	1.76
5	P40	288.63	142.88	147.24	2.06
6	P39	288.63	142.84	147.11	2.53
7	P38	288.63	142.79	146.79	3.42
8	P37	288.63	141.75	147.03	2.18
9	P36	288.63	141.74	144.51	4.29
10	P35	288.63	141.16	143.95	4.14
11	P34	288.63	139.50	144.30	2.61
12	P33	288.63	139.50	144.29	2.62
13	P32	288.63	140.50	143.58	4.39
14	P31	288.63	140.47	143.51	4.49
15	P30	288.63	140.45	143.48	4.51
16	P29	288.63	140.43	143.45	4.52
17	P28	288.63	140.41	143.42	4.54
18	P27	288.63	140.39	143.38	4.57
19	P26	288.63	140.37	143.34	4.60
20	P25	288.63	140.35	143.29	4.65
21	P24	288.63	140.33	143.18	4.81
22	P23	288.63	140.31	143.02	5.04
23	P22	288.63	140.19	142.90	5.04

24	P21	288.63	137.23	139.93	5.00
25	P20	288.63	134.20	136.90	5.00
26	P19	288.63	131.16	133.86	5.00
27	P18	288.63	128.13	130.83	5.00
28	P17	288.63	125.09	127.79	5.00
29	P16	288.63	122.06	124.76	5.00
30	P15	288.63	120.66	123.36	5.00
31	P14	288.63	119.40	122.10	5.00
32	P13	288.63	118.13	120.83	5.00
33	P12	288.63	116.87	119.57	5.00
34	P11	288.63	115.60	118.30	5.00
35	P10	288.63	114.33	117.03	5.00
36	P9	288.63	113.07	115.77	5.00
37	P8	288.63	111.80	114.50	5.00
38	P7	288.63	110.54	113.24	5.00
39	P6	288.63	109.27	111.97	5.00
40	P5	288.63	108.00	110.70	5.00
41	P4	288.63	106.74	109.44	5.00
42	P3	288.63	105.47	108.17	5.00
43	P2	288.63	104.21	106.92	5.00
44	P1	288.63	102.85	105.56	5.00

Berdasarkan hasil simulasi profil muka air aliran tak mantap (*unsteady flow*) untuk kondisi PMF dengan debit maksimum sebesar 288,63 m^3/detik yang terlihat seperti pada gambar 4 sampai dengan gambar 8 dan pada tabel 1, diketahui bahwa profil muka air banjir yang terjadi pada penampang memanjang dan melintang pelimpah tambahan Bendungan Manikin. Pada bentuk penampang persegi yang terdapat pada *cross section* P44-Sta.0+060 sampai *cross section* P38-Sta.0+183.580 didapatkan tinggi muka air banjir maksimum berada pada elevasi 151,74 m dengan kedalam air 1,74 m dan muka air minimum berada di elevasi 146,79 m dengan kedalam air 4,00 m, pada penampang *boxculvert* didapatkan tinggi muka air maksimum berada pada elevasi 144,51 m dengan kedalam air 2,77 m dan tinggi muka air minimum berada di elevasi 143,14 m dengan kedalaman air 1,98 m, pada penampang persegi panjang tinggi muka air berada di elevasi elevasi 144,30 m dengan kedalaman air 4,80 m, sedangkan tinggi muka air minimum berada di elevasi 143,95 m dengan kedalaman air 2,79 m, dan pada penampang trapesium pelimpah tambahan muka air banjir berada pada elevasi 143,58 m dengan kedalaman air 3,08 m, sedangkan tinggi minimum muka air banjir berada pada elevasi 105,56 m dengan kedalaman air 2,71 m. kecepatan rata-rata yang didapatkan sebesar 5,00 m/s.

Hasil Simulasi Program HEC-RAS pada Penampang Pelimpah Tambahan Kondisi Kala Ulang 1000 Tahun (Q_{1000})

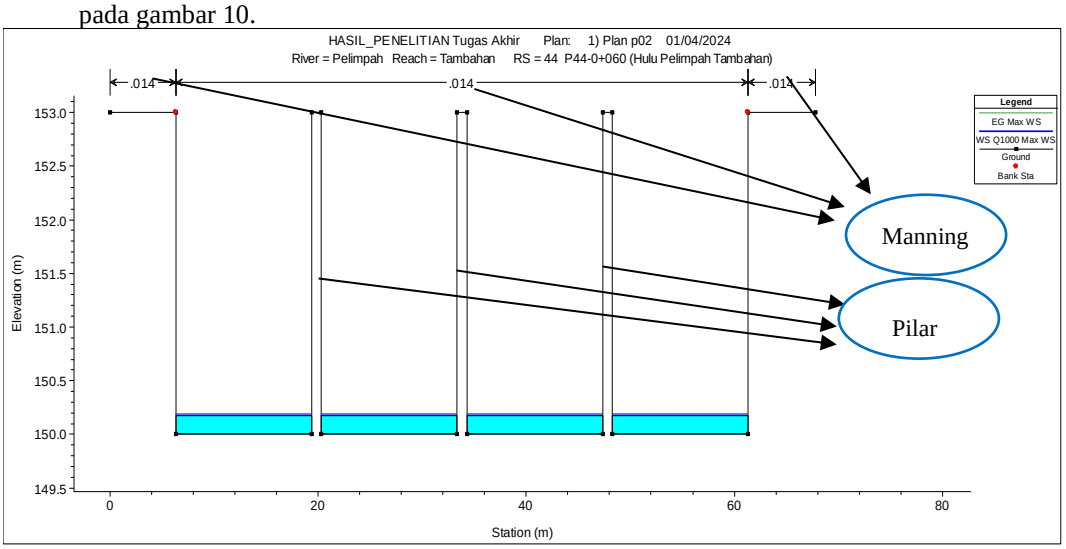
1. Profil muka air potongan memanjang pelimpah tambahan bendungan Q_{1000}



Gambar 9. Profil memanjang muka air untuk pelimpah tambahan kondisi Q_{1000}

1. *Cross section* P44-Sta. 0+060 (hulu)

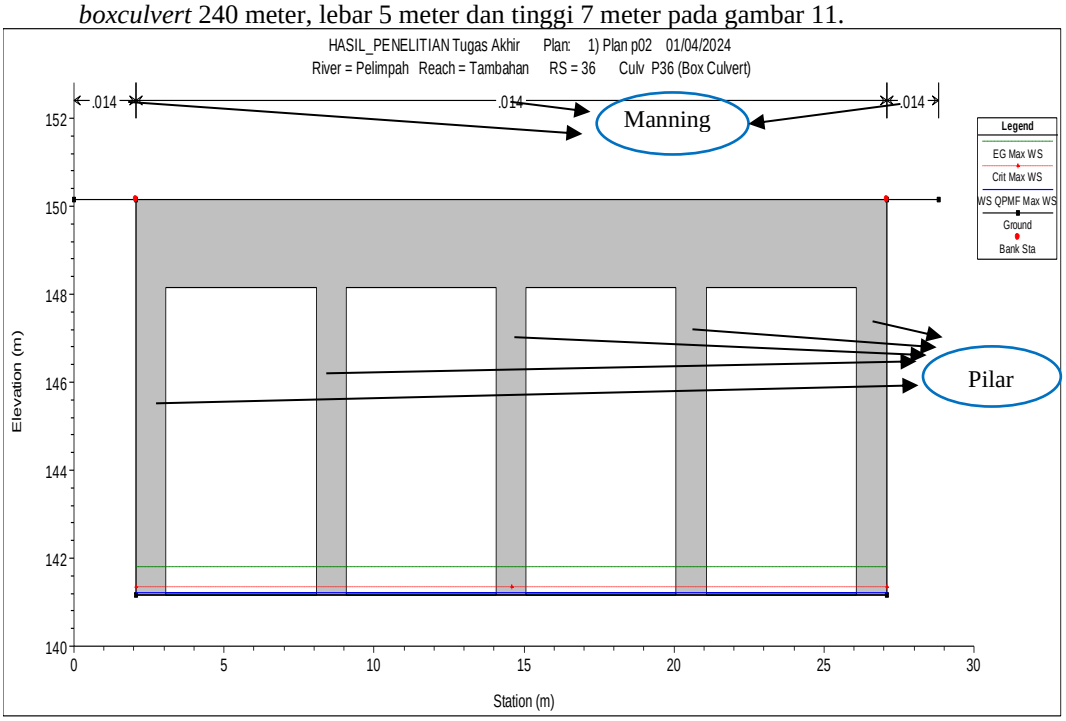
   Pada *cross section* ini memiliki bentuk penampang persegi yang terdiri dari 4 saluran yang sama dengan beberapa *cross section* yaitu pada *cross section* P43-Sta.0+080 sampai *cross section* P38-Sta.0+183.580 pada gambar 10.



Gambar 10. Profil muka air Q_{1000} pada cross section P44-Sta. 0+060 (hulu)

2. *Cross section* P36-Sta. 0+240

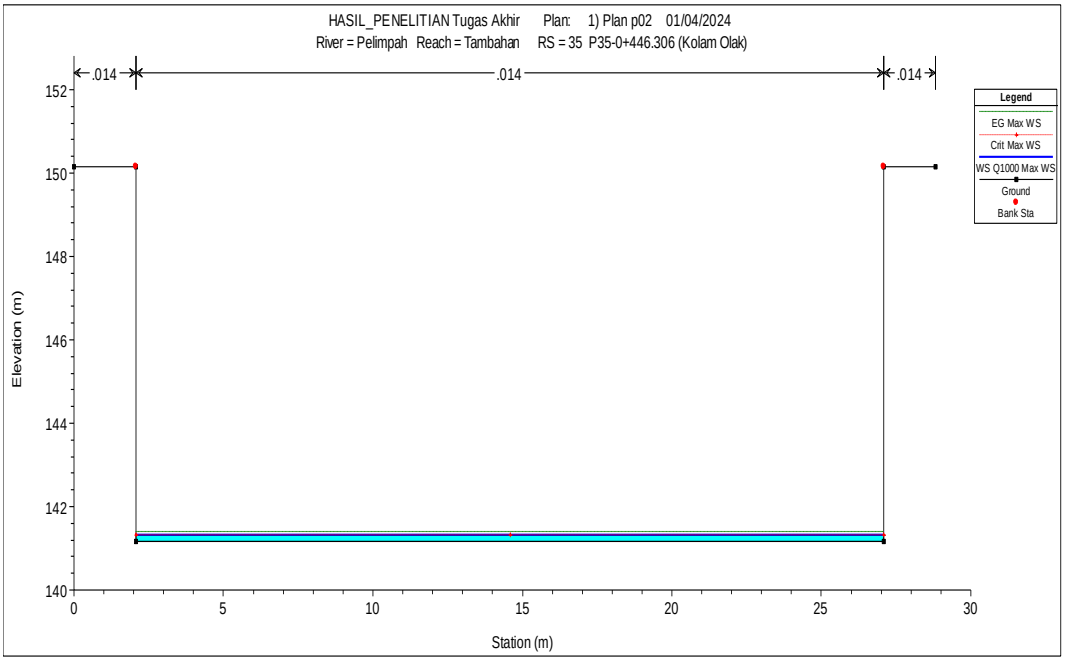
   Pada *cross section* ini merupakan *boxculvert* atau saluran hantar yang terdiri dari 4 saluran, dengan panjang *boxculvert* 240 meter, lebar 5 meter dan tinggi 7 meter pada gambar 11.



Gambar 11. Profil muka air Q_{1000} pada cross section P36-Sta. 0+240

3. *Cross section* P35-Sta. 0+446.306

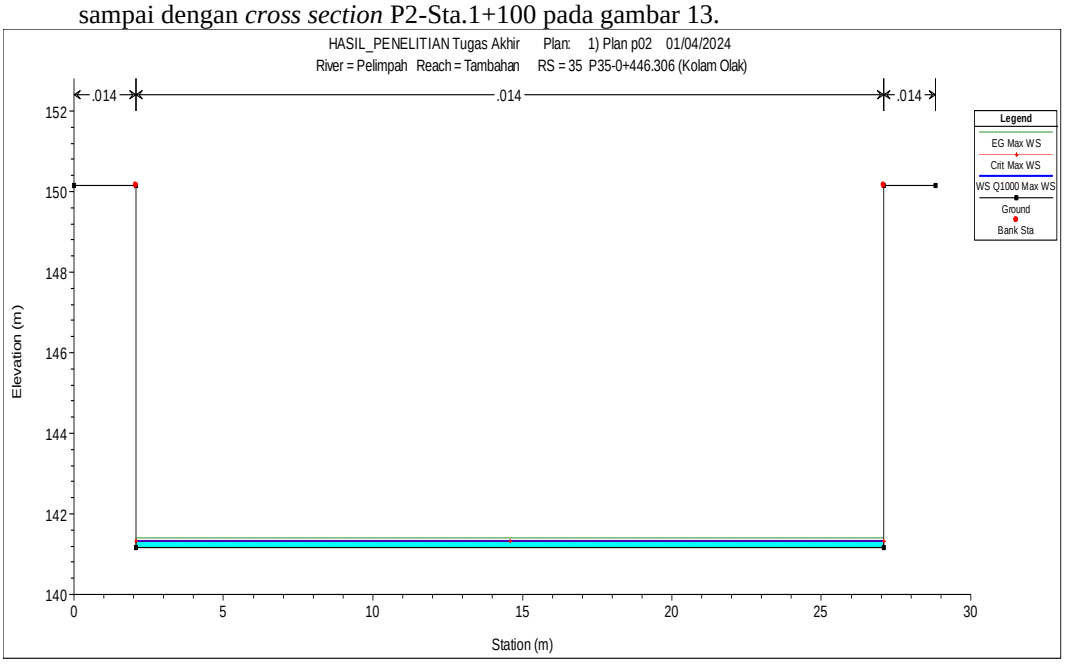
   Pada bagian *cross section* ini memiliki bentuk penampang persegi panjang. Pada *cross section* ini juga merupakan kolam olak pelimpah tambahan yang memiliki bentuk penampang yang sama dengan *cross section* P34-Sta.0+463.300 sampai *cross section* P33-Sta.0+483.300 pada gambar 12.



Gambar 12. Profil muka air Q_{1000} pada cross section P35-Sta. 0+446.306

4. *Cross section* P1-Sta. 1+120 (hilir)

Pada *cross section* ini memiliki bentuk penampang trapesium, dimanan pada penampang tersebut memiliki bentuk dan dimensi yang sama dengan beberapa *cross section* yaitu dari *cross section* P32-Sta.0+500 sampai dengan *cross section* P2-Sta.1+100 pada gambar 13.



Gambar 13. Profil muka air Q_{1000} pada cross section P1-Sta. 1+120 (hilir)

Hasil analisis perhitungan HEC-RAS periode ulang 1000 tahun (Q_{1000}) untuk seluruh *cross section* pada penampang pelimpah tambahan bendungan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Perhitungan HEC-RAS Periode Ulang 1000 Tahun (Q_{1000})

No	Stasiun Pelimpah Tambahan No.	Debit (Q) Total (m^3/s)	Elevasi Dasar Saluran (m)	Elevasi Muka Air (m)	Kecepatan Aliran (m/s)
1	P44	4.41	150.00	150.18	0.48
2	P43	4.41	150.00	150.09	0.94
3	P42	4.41	142.97	143.12	0.69
4	P41	4.41	142.93	143.12	0.01
5	P40	4.41	142.88	143.08	0.68
6	P39	4.41	142.84	143.06	0.73
7	P38	4.41	142.79	142.95	1.28
8	P37	4.41	141.75	141.96	0.82
9	P36	4.41	141.74	141.91	1.35
10	P35	4.41	141.16	141.31	1.20
11	P34	4.41	139.50	140.80	0.15
12	P33	4.41	139.50	140.80	0.15
13	P32	4.41	140.50	140.74	0.92
14	P31	4.41	140.47	140.72	0.88
15	P30	4.41	140.45	140.81	0.01
16	P29	4.41	140.43	140.68	0.88
17	P28	4.41	140.41	140.66	0.88
18	P27	4.41	140.39	140.64	0.89
19	P26	4.41	140.37	140.62	0.89
20	P25	4.41	140.35	140.60	0.89
21	P24	4.41	140.33	140.57	0.90
22	P23	4.41	140.31	140.48	1.29
23	P22	4.41	140.19	140.36	1.29
24	P21	4.41	137.23	137.40	1.29
25	P20	4.41	134.20	134.37	1.29
26	P19	4.41	131.16	131.33	1.29
27	P18	4.41	128.13	128.30	1.29
28	P17	4.41	125.09	125.26	1.29
29	P16	4.41	122.06	122.23	1.29
30	P15	4.41	120.66	120.83	1.29
31	P14	4.41	119.40	119.57	1.29
32	P13	4.41	118.13	118.30	1.29
33	P12	4.41	116.87	117.04	1.29
34	P11	4.41	115.60	115.77	1.29
35	P10	4.41	114.33	114.50	1.29
36	P9	4.41	113.07	113.24	1.29
37	P8	4.41	111.80	111.97	1.29
38	P7	4.41	110.54	110.71	1.29
39	P6	4.41	109.27	109.44	1.29
40	P5	4.41	108.00	108.17	1.29
41	P4	4.41	106.74	106.91	1.29
42	P3	4.41	105.47	105.64	1.29
43	P2	4.41	104.21	104.38	1.29
44	P1	4.41	102.85	103.02	1.29

Berdasarkan hasil simulasi profil muka air aliran tak mantap (*unsteady flow*) untuk kondisi Q_{1000} dengan debit maksimum sebesar 4,41 m^3/detik yang terlihat seperti pada gambar 9 sampai dengan gambar 13 dan pada tabel 2, diketahui bahwa profil muka air banjir yang terjadi pada penampang memanjang dan melintang pelimpah tambahan Bendungan Manikin. Pada bentuk penampang persegi yang terdapat pada *cross section* P44-Sta.0+060 sampai *cross section* P38-Sta.0+183.580 didapatkan tinggi muka air banjir maksimum berada pada elevasi 150,18 m dengan kedalaman air sebesar 0,18 m, dan tinggi muka air banjir minimun berada pada elevasi 142,95 m dengan kedalaman air 0,16 m, pada penampang *boxculvert* tinggi muka air berada di elevasi 141,91 m dengan kedalaman air 0,17 m dan tinggi muka air minimum berada di elevasi 141,23 m dengan kedalaman air 0,07 m, pada penampang persegi panjang

didapatkan tinggi muka air banjir berada pada elevasi 141,31 m dengan kedalaman air 0,15 m, sedangkan tinggi muka air minimum berada di elevasi 140,80 m dengan kedalaman air 1,30 m, dan pada penampang trapesium profil tinggi muka air banjir berada pada elevasi 140,81 m dengan kedalaman air 0,36 m, sedangkan tinggi minimum muka air banjir berada di elevasi 103,02 m dengan kedalaman air 0,17 m. Kecepatan rata-rata sebesar 1,29 m/s.

5. KESIMPULAN

Hasil simulasi profil muka air pada pelimpah tambahan Bendungan Manikin dengan debit *Probable Maximum Flood* PMF atau Q_{PMF} diperoleh profil tinggi muka air banjir maksimum pada penampang persegi berada di elevasi 151,74 m dengan kedalaman air 1,74 m dan muka air minimum berada di elevasi 146,79 m kedalaman air 4,00 m, penampang *boxculvert* tinggi muka air berada di elevasi 144,51 m kedalaman air 2,77 m dan tinggi muka air minimum berada di elevasi 143,14 m kedalaman air 1,98 m, pada penampang persegi panjang berada pada elevasi 144,30 m kedalaman air 4,80 m, sedangkan tinggi muka air minimum berada di elevasi 143,95 m kedalaman air 2,79 m, dan pada penampang trapesium berada di elevasi 143,58 m kedalaman air 3,08 m, sedangkan tinggi minimum muka air banjir berada pada elevasi 105,56 m kedalaman air 2,71 m. Sedangkan untuk kala ulang Q_{1000} tahun sebesar 4,41 m^3/detik diperoleh tinggi muka air maksimum pada penampang persegi berada di elevasi 150,18 m kedalaman air 0,18 m, dan tinggi muka air banjir minimun berada pada elevasi 142,95 m kedalaman air 0,16 m, pada penampang *boxculvert* tinggi muka air berada di elevasi 141,91 m kedalaman air 0,17 m dan tinggi muka air minimum berada di elevasi 141,23 m kedalaman air 0,07 m, untuk penampang persegi panjang didapatkan tinggi muka air banjir berada pada elevasi 141,31 m kedalaman air 0,15 m, sedangkan tinggi muka air minimum berada di elevasi 140,80 m kedalaman air 1,30 m, dan pada penampang trapesium profil tinggi muka air banjir berada pada elevasi 140,81 m kedalaman air 0,36 m dan tinggi minimum muka air banjir berada di elevasi 103,02 m kedalaman air 0,17 m. Kecepatan rata-rata aliran dengan debit Q_{PMF} sebesar 5,00 m/s dan debit Q_{1000} kecepatan rata-rata sebesar 1,29 m/s.

DAFTAR PUSTAKA

Triatmodjo, B. (1993). *Hidraulika I*. Yogyakarta : Beta Offset.

Orfa, Louriana Evanale dkk. (2018). *Permodelan Aliran di Pelimpah Bendungan Menggunakan Program Hec-Ras. Seminar Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan (SEMSINA) 2018.* Malang.

Saridewi, Ratih N. 2022. *Modul Pelatihan Software Hec-Ras 4.1*.

Istiarto. 2014. *Simulasi Aliran 1-Dimensi dengan Bantuan Paket Program Hidrodinamika Hec-Ras.* Modul Pelatihan *Simple Geometry River*.Yogyakarta.

Ismawati, Sintya Maghfira, and Umboro Lasminto. 2017. "Pemodelan Aliran 1D Pada Bendungan Tugu Menggunakan Software HEC-RAS."

Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Sumber Daya Air. 2013. "Standar Perencanaan Irigasi."

Orfa, Lourina Evanale, and Chairil Saleh. 2019. "Model Pelimpah Samping Bendungan Bajulmati Menggunakan Lateral Structure Pada Program Hec-Ras Bajulmati Dam Side Spillway Model Uses Lateral Structure in the Hec-Ras Program."

PT. Indra Karya Persero. "Sertifikasi Desain Dan Model Test Bendungan Tefmo / Manikin Kabupaten Kupang."

ANALISIS KAWASAN BANJIR PADA SUNGAI MENGGUNAKAN HYDRAULIC MODEL HEC-RAS 2D

(ANALYSIS FLOODPLAIN AREA IN RIVER USING HYDRAULIC MODEL HEC RAS 2D)

Budi Santosa[1], Yohanes Yuli Mulyanto[2] Naufal Aly Ramadhan[3], Ananta Christuaji W.M[4],

[1]Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katholik Soegijapranata,
Jl. Pawiyatan Luhur IV/I, Semarang
e-mail: budi@unika.ac.id
[2]Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katholik Soegijapranata,
Jl. Pawiyatan Luhur IV/I, Semarang
e-mail: yuli@unika.ac.id,
[3]Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katholik Soegijapranata,
Jl. Pawiyatan Luhur IV/I, Semarang
e-mail: 18b10091@unika.ac.id
[4]Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Katholik Soegijapranata,
Jl. Pawiyatan Luhur IV/I, Semarang
e-mail: 18b10096@unika.ac.id

ABSTRAK

Curah hujan yang tinggi mengakibatkan banjir pada Sungai Karema khususnya pada Hm 106 – Hm 129. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kawasan banjir yang terjadi pada Sungai Karema di Hm 106 – Hm 129 menggunakan Hydraulic Model HEC-RAS. Berdasarkan hasil kalibrasi model pada 22 maret 2018 menghasilkan debit banjir lapangan (QLap) sebesar 469,070 m3/detik dan untuk debit hasil Hidrograf Snyder (QSnyder) menghasilkan debit banjir sebesar 469,12 m3/detik sehingga menghasilkan nilai error sebesar 0,010%. Hasil Analisis debit banjir tiap periode ulang Q2 = 358,60 m3/detik, Q5 = 411,04 m3/detik, Q10 = 439,74 m3/detik, Q25 = 480,80 m3/detik, Q50 = 511,52 m3/detik, Q100 = 542,44 m3/detik. Setelah dihitung menggunakan Hydraulic Model HEC-RAS, luas kawasan banjir yang terjadi pada tanggal 22 Maret 2018 yaitu seluas 668,82 m2, dan untuk luas kawasan banjir tiap periode ulang 2 tahun seluas 511,26 m2, 5 tahun seluas 586,02 m2, 10 tahun seluas 626,94 m2, 25 tahun seluas 685,48 m2, 50 tahun seluas 729,27 m2, dan 100 tahun seluas 773,36 m2. Rekomendasi penanganan dapat dilakukan dengan cara melakukan peninggian tanggul sungai pada Hm 94 – Hm 137 setinggi 1 meter yang dapat menjadi salah satu upaya agar tidak terjadi luapan banjir di sekitar Hm 106 – Hm 129.

Kata kunci: Kawasan Banjir, Hidrograph Satuan Sintetik Snyder, HEC-RAS

PENDAHULUAN.

Banjir adalah peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat yang disebabkan, baik oleh faktor alam dan/atau faktor non alam maupun faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis (Pahleviannur, 2019). Dalam Laporan Berita Acara BWS Sulawesi III, Kamis tanggal 22 Maret 2018 Sungai Karema meluap dengan area luapan sekitar 3.000 m2. Masyarakat yang terdampak sebanyak 3.267 jiwa, 1.089 unit rumah terendam, pom pengisian bahan bakar pertamina tenggelam, gudang penyimpanan beras bulog terendam enam desa di Kecamatan Mamuju dan Simboro. Banjir terjadi berulang setiap tahun, terakhir terjadi pada bulan Juni dan Oktober 2022.

DELINEASI DAS

Menurut Fuady dan Azizah (2008), daerah aliran sungai merupakan cakupan suatu daerah yang terdapat sungai utama yang biasanya berfungsi sebagai sistem hidrologi dan sebagai satu ekosistem alami, jika dilihat dari batasnya daerah aliran sungai pada umumnya terletak pada pegunungan atau tebing yang dapat memisahkan sistem aliran yang satu dengan lainnya, daerah aliran sungai terdiri dari dua bagian utama yaitu daerah tadah atau hulu dan daerah penyaluran air yang berada di bawah daerah tadah yaitu biasa disebut hilir.

Delineasi DAS memiliki dua metode yang dapat digunakan, yaitu delineasi DAS secara manual dengan melakukan pengukuran langsung dilapangan dan delineasi DAS menggunakan perangkat lunak dengan bantuan software ArcGIS memakai data DEM.

ANALISIS FREKUENSI

Menurut Kamiana (2010), untuk melakukan analisis frekuensi data hujan dapat menggunakan beberapa distribusi probabilitas yang sering digunakan yaitu: Gumbel, Normal, Log Normal, dan Log Pearson III. Menurut (Urias, 2007) periode ulang adalah rata-rata periode waktu kembalinya suatu peristiwa atau kejadian yang memiliki nilai yang sama atau lebih besar.

UJI SEBARAN

Setiap distribusi mempunyai ciri yang khas sehingga data curah hujan harus diuji kecocokannya dengan metode Chi Kuadrat dan Smirnov-Kolmogorov. Uji kecocokan distribusi merupakan pengujian untuk menentukan kecocokan distribusi frekuensi dari contoh data yang diolah. Menurut Soewarno (1995), uji sebaran Chi Kuadrat diawali dengan mengurutkan data dari terbesar ke terkecil dan kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan dibawah ini:

$K = 1 + 3{,}3 \log n$ ..... (2.1)

$d_k = K - (p + 1)$ ..... (2.2)

$P = \frac{1}{K} \times 100\%$ ..... (2.3)

$t = \frac{1}{P}$ ..... (2.4)

$\Delta X_t = X_r + (K_T \times S_d)$ ..... (2.5)

$\log \Delta X_t = \log X_r + (K_T \times \log S_d)$ ..... (2.6)

$E_f = \frac{n}{K}$ (2.7)

$X^2 = \sum \frac{(E_f - O_f)^2}{E_f}$ ..... (2.8)

Syarat $= X^2 < X^2_{cr}$ ..... (2.9)

Menurut Kamiana (2011), perhitungan uji sebaran Smirnov – Kolmogorov diawali dengan mengurutkan data dari terbesar ke terkecil yang kemudian dilakukan perhitungan dengan persamaan berikut ini:

$P(X_i) = \frac{i}{n+1}$ ..... (2.10)

Untuk distribusi Gumbel

$P'(X_i) = e^{(-e)^{-Y}}$ ..... (2.11)

$Y = \frac{1283}{S_d} \times X_i\ (X_r - 0{,}455\ S_d)$ ..... (2.12)

Untuk distribusi Normal

$P'(X_i) = \frac{1}{S_{d \times \sqrt{2\pi}}} exp\ \frac{|-(X_i - X_r)^2|}{2 \times {S_d}^2}$ ..... (2.13)

Untuk distribusi Log Normal

$P'(X_i) = \frac{1}{\log S_d \times \log X_i \times \sqrt{2\pi}}\ exp\ \frac{|-(\log X_i - \log X_r)^2|}{2 \times \log {S_d}^2}$

Untuk distribusi Log Pearson III

$P'(X_i) = \frac{1}{a \times b} \times \left|\frac{X_i - c}{a}\right|^{b-1} \times e^{-\left|\frac{X_i - c}{a}\right|}$ ..... (2.14)

$a = \frac{C_s \times S_d}{2}$ (2.15)

$b = \left(\frac{1}{C_s} \times 2\right)^2$ ..... (2.16)

$c = \left|X_r \times \frac{2 \times S_d}{C_s}\right|$ ..... (2.17)

$\Delta P_{Maks} = |P(X_i) - P'(X_i)|$ ..... (2.18)

Pola Distribusi Hujan Jam-Jaman

Menurut Kamiana (2011), intensitas hujan adalah ketinggian atau kederasan hujan per satuan waktu, biasanya dalam satuan (mm/jam) atau (cm/jam). Menurut Kamiana (2011), berdasarkan hasil pengamatan data sebaran hujan di Indonesia, hujan terpusat tidak lebih dari 7 jam. Menurut Soemarto (1986), perhitungan intensitas hujan dapat menggunakan Metode *Modified Mononobe* yang dapat dilihat di bawah ini:

$$I_t = \left(\frac{R_{24}}{t_c}\right)\left(\frac{t_c}{t}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.19)$$

$$P_t = \frac{I_t}{\sum I_t} \times 100\% \quad (2.20)$$

$$R_n = P_t \times R_{24} \quad (2.21)$$

HSS Snyder

HSS Snyder menggunakan debit puncak, waktu dasar, dan durasi hujan untuk unsur-unsur hidrograf, sedangkan untuk karakteristik DAS menggunakan luas DAS (A), panjang aliran yang ditinjau (LSegmen), dan jarak titik berat DAS dengan outlet saluran (Lc). Karakteristik DAS yang digunakan.

Menurut Kamiana, (2011), HSS Snyder dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$Q_P = \frac{0{,}275 \times C_p \times A}{T_P} \quad (2.22)$$

$$t_e = \frac{t_p}{5{,}5} \quad (2.23)$$

$t_e > T_r$, maka $T_p = t_p + 0{,}25 \times (T_r - t_e)$ (2.24)

$t_e < T_r$, maka $T_p = t_p + 0{,}50\ T_r$ (2.25)

$$t_p = C_t \times (L_{Segmen} \times L_c)^n \quad (2.26)$$

Menurut Soemarto (1995), untuk mempercepat dan mempermudah pekerjaan maka diberika rumus Alexejev yang memberikan bentuk hidrograf satuannya. Rumus Alexejev dapat dilihat berikut ini:

$$Q_t = Q_p \times 10^{-a\left(\frac{1-x}{x}\right)^2} \quad (2.27)$$

$$\lambda = \frac{(Q_p \times T_p)}{(h \times A)} \quad (2.28)$$

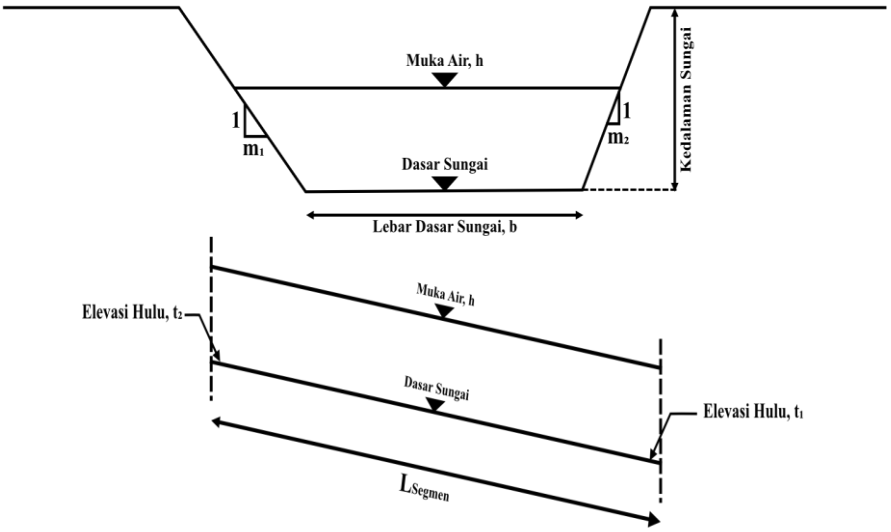
$$a = (1{,}32 \times \lambda) + (0{,}15 \times \lambda) + 0{,}045 \quad (2.29)$$

$$x = \frac{T}{T_p} \quad (2.30)$$

$$Q_{Snyder} = Q_t \times \sum R_n \quad (2.31)$$

Analisis Debit Lapangan

Untuk analisis debit lapangan diperlukan beberapa parameter, yaitu ketinggian muka air, potongan melintang sungai, panjang total sungai, perbedaan elevasi dasar sungai pada hulu dan hilir. Potongan melintang sungai pada Gambar 1



Gambar 1 Bagian-Bagian Pada Sungai

Menurut Kamiana (2011), perhitungan debit lapangan dapat dihitung dengan langkah-langkah dibawah ini:

$T = b + h\,(m_1 + m_2)$ ..... (2.32)

$A = \frac{h}{2}(b + T)$ ..... (2.33)

$S = \frac{(t_2 - t_1)}{L_{Segmen}}$ ..... (2.34)

$P = b + h\left(\sqrt{1 + m_1{}^2} + \sqrt{1 + m_2{}^2}\right)$ ..... (2.36)

$R = \frac{A}{P}$ ..... (2.35)

$V = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2}$ ..... (2.36)

$Q_{Lap} = A \times V$ ..... (2.37)

Pada analisis debit lapangan diperlukan untuk menentukan koefisien kekasaran Manning. Koefisien kekasaran Manning dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Koefisien Kekasaran Manning

Tipe Saluran	Keterangan	Nilai Manning
Tanah	Lurus, baru, seragam, landai dan bersih	0,016 – 0,033
	Berkelok, landai dan berumput	0,023 – 0,040
	Tidak terawat dan kotor	0,050 – 0,140
	Tanah berbatu, kasar dan tidak teratur	0,035 – 0,045
Pasangan	Batu kosong	0,023 – 0,035
	Pasangan batu belah	0,017 – 0,030
Beton	Halus, sambungan baik dan rata	0,014 – 0,018
	Kurang halus dan sambungan kurang rata	0,018 – 0,030

Kalibrasi Debit

Menurut Sosrodarsono dan Takeda (1997), proses kalibrasi adalah proses untuk membandingkan data yang sudah dianalisis dengan data sejenis sehingga hasil dari kalibrasi data dapat teruji. Kebenarannya. Untuk melakukan kalibrasi debit, jika hasil kalibrasi terlampau jauh maka harus dilakukan penyesuaian koefisien C_t dan C_p pada tahap perhitungan HSS. Menurut Sinaga (2014), semakin kecil tingkat kesalahan, maka tingkat keakuratan data yang diuji semakin bagus. dengan maksimal perbedaan 1%, karena dengan tingkat kesalahan semakin kecil maka akan semakin bagus. Menurut Epperson (2013), kalibrasi debit dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.70) yang dapat dilihat dibawah ini:

$$Error\ (\%) = \frac{|\text{Debit Lapangan} - \text{Debit Snyder}|}{\text{Debit Lapangan}} \times 100 \quad \text{..... (2.38)}$$

HEC-RAS 2D

HEC-RAS digunakan untuk membuat pemodelan aliran unsteady atau steady dengan model geometri 2D. HEC-RAS 2D memungkinkan pengguna untuk mengembangkan model hidrolik yang mencakup aliran dua dimensi yang berarti simulasi memperhitungkan perubahan ketinggian secara horizontal dan vertikal sepanjang sungai maupun dataran yang di kaji (USACE,2024). Berdasarkan USACE (2024), software HEC-RAS menggunakan dasar persamaan Saint Venant dan menggunakan dasar komputasi Microsoft Visual C++.

METODE PENELITIAN

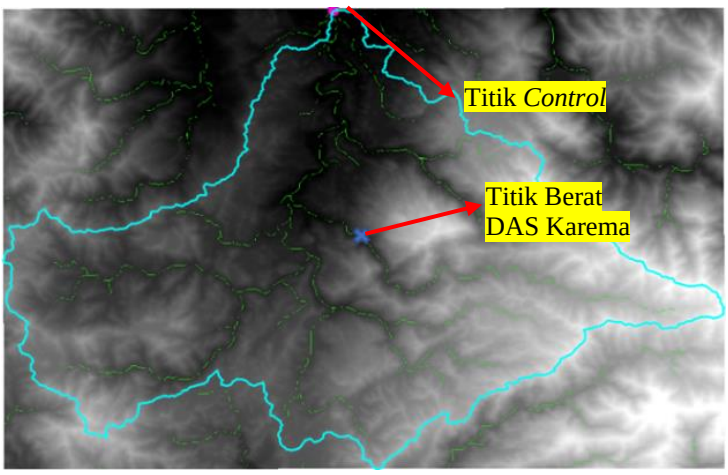
Berdasarkan data yang diperoleh serta kajian putstaka yang menjadi dasar penelitian, Data dari stasiun hujan yang diperoleh selanjutnya akan dilakukan uji distribusi probabilitas, kemudian salah satu distibusi dipilih yang memenuhi syarat distribusi untuk digunakan dalam perhitungan uji sebaran chi-square dan smirnov-kolmogrov. Setelah data teruji, selanjutnya meghitung pola distribusi hujan menggunakan metobe mononobe. berdasarkan hasil pengamatan data sebaran hujan di Indonesia, hujan terpusat tidak lebih dari 7 jam. Selanjutnya dilakukan kalibrasi untuk mendapatkan parameter kondisi DAS dengan cara membandiknan hasil debit snyder dari hidrograf satuan sintetis Snyder dengan debit lapangan pada hari dan tahun yang sama dengan kejadian banjir. Jika hasil qsnyder terlampau jauh maka dilakukan peyenesuaiian pada parepemer bebas koefisien waktu (ct) dan koefisien puncak (cp) hingga hasil debit qsnyder memiliki selisih maksimal 1% dari debit lapangan. Setelah debit qsnyder terkalibrasi ditemukan maka selanjutnnya akan digunakan untuk membuat pemodelan *hydrolic model* menggunakan HEC-RAS 2D untuk mengehatui besarnya luasan kawasan banjir, setelanjutnya melakukan melakukan modifikasi dinding sungai pada HEC-RAS hingga luapan tidak terjadi pada area sungai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan pada penelitian ini

Delineasi DAS

Delineasi DAS menggunakan program Arc-GIS dengan data DEM sehingga menghasilkan area tangkapan air seluas 76km2 yang dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 Delineasi DAS

Analisis Frekuensi

Analisi frekuensi menggunakan perhitungan distribusi Gumbel, Normal, Log Normal, dan Log Pearson. Dari hasil pengujian maka log pierson III dipilih karena. memenuhi syarat, kemudian menghitung curah hujan rencana dengan periode ulang yang dapat dilihat pada tabel 2.

Table 2 Analisis Curah Hujan Rancangan Distribusi Log Pearson III

Periode Ulang, T (tahun)	log X_r (mm)	K_T	C_s	S_d (mm)	log X_T (mm)	X_T (mm)
2	1,957	-0,116	0,65	0,061	1,949	89,055
5	1,957	0,79	0,65	0,061	2,005	101,169
10	1,957	1,333	0,65	0,061	2,038	109,205
25	1,957	1,967	0,65	0,061	2,077	119,399
50	1,957	2,407	0,65	0,061	2,104	127,029
100	1,957	2,824	0,65	0,061	2,129	134,708

Table 3 Perbandingan Syarat Distribusi Distribusi

Distribusi	Syarat Distribusi	Hasil Perhitungan		Keterangan	
		C_s	C_k	C_s	C_k
Gumbel	$C_s = 1,14$ $C_k = 5,4$	0,791	-0,641	Tidak OK	Tidak OK
Normal	$C_s \approx 0$ $C_k \approx 3$	0,791	-0,641	Tidak OK	Tidak OK
Log Normal	$C_s = C_v^3 + 3C_v$ $C_k = C_v^8 + 6C_v^6 + 15C_v^4 + 16C_v^2 + 3$	0,094	63,016	Tidak OK	Tidak OK
Log Pearson III	$Cs \neq 0$	0,650	-1,053	OK	OK

Uji sebaran

menggunakan 2 metode. Metode yang digunakan yaitu uji sebaran Chi Kuadrat (Chi Square) dan metode uji Smirnov – Kolmogorov.Uji sebaran Chi Kuadrat (Chi Square) dilakukan dengan beberapa tahapan agar dapat menghasilkan nilai Chi Kuadrat yang lebih kecil dari nilai Chi Kritis. Hasil dari uji sebaran chi kuadrat dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4 Hasil Perhitungan Chi Kuadrat (X2)

Kelas	P	Nilai Batas Tiap Kelas	E_f	O_f	$(E_f - O_f)^2 / E_f$
5	0,200	> 101,88	2	2	0
	0,400	93,76 – 101,88	2	2	0
	0,600	87,39 – 93,76	2	1	0,5
	0,800	80,42 – 87,39	2	2	0
	0,999	< 80,42	2	3	0,5
		Jumlah	**10**	**10**	**1**
		Syarat X^2_{cr}			**5,991**

Perhitungan selanjutnya yaitu uji sebaran menggunakan Smirnov-Kolmogrov. Sebelum melakukan perhitungan, harus menentukan nilai dari delta kritis Δcr), dengan cara menentukan jumlah data (n) dan derajat kepastian (α) yang kemudian didapatkan nilai dari delta kritis Δcr).

Tabel 5 Rekap Nilai Δcr Smirnov-Kolmogrov

Jenis Distribusi	ΔP_{maks}	Δ_{cr}
Normal	0,189	< 0,41
Log Normal	0,186	
Gumbel	0,170	
Log Pearson III	0,165	

Berdasarkan Tabel 5, nilai ΔP maks dari semua metode diterima, maka diambil nilai yang terjauh dari syarat Δcr yaitu distribusi Log Pearson III dengan nilai ΔPmaks sebesar 0,165

Kalibrasi Parameter Model

Pada tahap ini penyesuaiian koefisien waktu (ct) dan koefisien puncak (cp) yaitu ct 1,00 dan cp 1,00 sehingga didapatkan error debit lapangan dengan debit qsnyder 22 maret kurang dari 1% yaitu 0.23%

Pola Distribusi Hujan Jam-Jaman

Dalam menentukan pola distribusi hujan jam-an, terlebih dulu dilakukan perhitungan intensitas hujan tiap periode ulang yang telah lolos uji frekuensi dan sebaran, perhitungan itensitas hujan 6 jam yang dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6 Nilai Intensitas hujan Tiap Periode Ulang

t (Jam)	Periode Ulang, T (Tahun)					
	2	5	10	25	50	100
	Intensitas hujan, I (mm/jam)					
1	49,01	55,68	60,10	65,71	69,91	74,13
2	30,87	35,07	37,86	41,39	44,04	46,70
3	23,56	26,77	28,89	31,59	33,61	35,64
4	19,45	22,09	23,85	26,08	27,74	29,42
5	16,76	19,04	20,55	22,47	23,91	25,35
6	14,84	16,86	18,20	19,90	21,17	22,45
∑	154,5	175,5	189,4	207,1	220,3	233,7

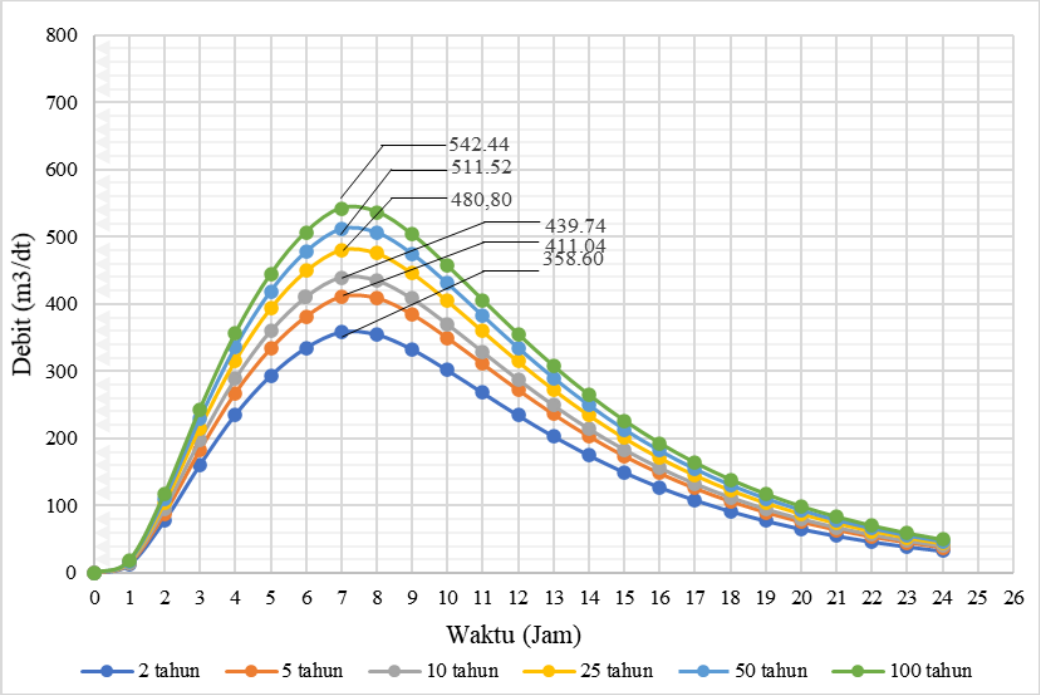
Setelah itensitas hujan dihitung, maka hasil dari itensitas hujan akan digunakan dalam perhitungan pola distribusi hujan yang dapat dilihat pada tabel 7

Tabel 7 Nilai Distribusi Hujan Jam-Jaman Tiap Periode Ulang

t (Jam)	Periode Ulang, T (Tahun)					
	2	5	10	25	50	100
	Distribusi Hujan Jam-Jaman (mm)					
1	28,25	32,09	34,64	37,88	40,30	42,73
2	17,79	20,22	21,82	23,86	25,38	26,92
3	13,58	15,43	16,65	18,21	19,37	20,54
4	11,21	12,74	13,75	15,03	15,99	16,96
5	9,66	10,98	11,85	12,95	13,78	14,61
6	8,55	9,72	10,49	11,47	12,20	12,94
∑	**89,05**	**101,17**	**109,20**	**119,40**	**127,03**	**134,71**

HSS Snyder

untuk analisis hidrograf satuan sintetik menggunakan Snyder membutuhkan data pola distribusi hujan setiap kala ulang. Hasil dari analisis hidrograf satuan sintetis Snyder disajiikan pada gambar 3.



Gambar 3 Grafik Hidrograf Snyder Periode Ulang

Berdasarkan Gambar 3, dapat disimpulkan bahwa:
1. Debit puncak pada periode ulang 2 tahun terjadi pada jam ke-7dengan nilai debit puncak 358,60 m^3/detik.
2. Debit puncak pada periode ulang 5 tahun terjadi pada pada jam ke-7 dengan nilai debit sebesar 411,04 m^3/detik.
3. Debit puncak pada periode ulang 10 tahun terjadi pada jam ke-7 dengan nilai debit sebesar 439,74 m^3/detik.
4. Debit puncak pada periode ulang 25 tahun terjadi pada jam ke-7 dengan nilai debit sebesar 480,80 m^3/detik.
5. Debit puncak pada periode ulang 50 tahun terjadi pada jam ke-7 dengan nilai debit sebesar 511,52 m^3/detik.
6. Debit puncak pada periode ulang 100 tahun terjadi pada jam ke-7 dengan nilai debit sebesar 542,44 m^3/detik.

Analisis Hidrolika

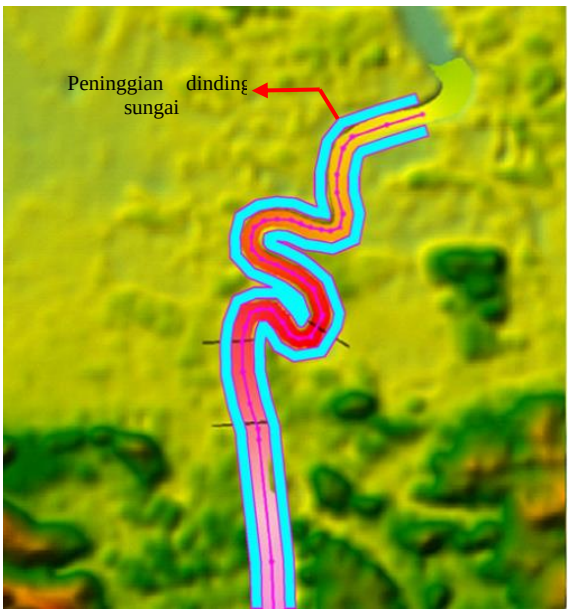
Setelah melakukan analisis debit rancangan dan mengetahui hasil debit setelah dikalibrasi, maka dapat melakukan pemodelan HEC-RAS 2D. Hasil dari simulasi model HEC-RAS 2D mendapatkan luas kawasan banjir seluas 773.363 m^2 yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 4 Luas Kawasan Banjir

Rekomendasi penanganan

Setelah mengetahui luasan kawasan banjir, selanjutnyab adalah merekomendasikan penanganan dengan memodifikasi penampang sungai setinggi 1 m pada Hm 94 hingga Hm 137, kemudian dilakukan simulasi ulang menggunakan HEC-RAS 2D dengan hasil tidak terjadi luapan yang dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9 Tampilan Sungai Setelah Peninggian dinding sungai

KESIMPULAN

Dari analisis dan penelitian yang sudah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan yang berkaitan dengan analisis kawasan banjir di Sungai Karema menggunakan Hydraulic Model HEC-RAS, yaitu:

1. Perhitungan debit banjir menggunakan Hidrograf Snyder pada tanggal 22 Maret 2018 menghasilkan debit sebesar 469,12 m3/detik, dan untuk debit banjir tiap periode ulang yaitu:
   a. 2 tahun (Q_2) =358,60 m3/detik
   b. 5 tahun (Q_5) =411,04 m3/detik
   c. 10 tahun (Q_{10}) =439,74 m3/detik
   d. 25 tahun (Q_{25}) =480,80 m3/detik

e. 50 tahun (Q_{50}) =511,52 m3/detik
f. 100 tahun (Q_{100}) =542,44 m3/detik.

2. Dari simulasi HEC-RAS 2D dengan menggunakan data debit banjir tanggal 22 Maret 2018 menghasilkan luas kawasan banjir sebesar 668.820 m2, dan untuk luas kawasan banjir dengan menggunakan data debit tiap periode ulang yaitu:
   a. 2 tahun = 511.260 m2
   b. 5 tahun = 586.020 m2
   c. 10 tahun = 626.940 m2
   d. 25 tahun = 685.480 m2
   e. 50 tahun = 729.270 m2
   f. 100 tahun = 773.360 m2.
3. Rekomendasi penganggulangan banjir Sungai Karema dapat dilakukan dengan cara peninggian tanggul sungai setinggi 1 meter sebagai batas aman pada Hm 94 – Hm 137 agar tidak terjadi banjir pada Hm 106 – Hm 137.

SARAN

Dari penelitian yang sudah dilakukan, menghasilkan saran yang berkaitan dengan analisis kawasan banjir di Sungai Karema menggunakan Hydraulic Model HEC-RAS, yaitu:

1. Perlu adanya stasiun hujan di sekitar Kabupaten Mamuju sehingga akan meningkatkan kelengkapan data dan keakuratan analisis curah hujan.
2. Sebaiknya menggunakan kerapatan data DEM diatas 32bit agar analisis genangan dan limpasan semakin akurat dan dapat mempermudah pengolahan geometri sungai.
3. Kesadaran masyarakat diperlukan untuk tidak membangun bangunan di area sempadan sungai yang akan membuat perubahan bentuk profil sungai .

DAFTAR PUSTAKA

Agustin, W. (2010): Pola distribusi hujan jam-jaman di sub das keduang, Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, 12-14.

Arsyad, S. (2006): Konservasi tanah dan air, IPB Press, 25-35.

Chow, V. T. (1959): Open channel hydraulics, McGraw-Hill Book Company, 109-113.

Fadjarajani, S., Singkawijaya, E. B., dan Indriane, T. (2018): Peran serta masyarakat dalam menjaga kelestarian sungai cimulu di kota tasikmalaya, Prosiding Seminar Nasional Geografi UMS, ISBN: 978-602-361-137-9, 1 (1), 248-249.

Fuady, Z., dan Azizah, C. (2008): Tinjauan daerah aliran sungai sebagai sistem ekologi dan manajemen daerah aliran sungai, Jurnal Lentera, ISSN: 1829-9598, 1 (6), 1-3.

Ginting, S. dan Putuhena, W. M. (2016): Hujan rancangan berdasarkan analisis frekuensi regional dengan metode tl-moment, Jurnal Sumber Daya Air, ISSN: 2548-494, 12 (1), 1-4.

Harto, S. (1993): Analisis hidrologi, PT Gramedia Pustaka Utama, 25-29.

Hermon, D. (2012): Mitigasi bencana hidrometeorologi banjir, longsor, ekologi, degradasi lahan, puting beliung, kekeringani, UNP Press, 36-37.

Istiarto. (2014): Modul pelatihan simulasi aliran 1 dimensi dengan bantuan paket program hidrodinamika HEC-RAS, Universitas Gadjah Mada.

Kamiana, I. M. (2011): Teknik perhitungan debit rencana bangunan air, Graha Ilmu, 14-51.

Kodoatie, R. J. dan Sjarief, R. (2010): Tata ruang air, Andi, 151-153.

Lesawengen, V. F., Jansen, F., dan Manoppo, F. J. (2019): Minimalisasi kesalahan survey topografi dalam pemetaan digital dengan koordinat global menggunakan autocad land desktop dan geographic information system, Jurnal Sipil Statik, ISSN: 2337-6732, 7 (1), 133-135.

Limantara, L. M. (2010): Hidrologi praktis, Lubuk Agung, 53-70.

Linsley, R. K., Franzini, J. B., dan Sasongko, D. (1991): Teknik sumber daya air, Erlangga, 5-7.

Marimin, N. A., Razi, M. A. M., Ahmad, M. A., Adnan, M. S., dan Rahmat S. N. (2018): Hec-ras hydraulic model for floodplain area in sembrong river, International Journal of Integrated Engineering, e-ISSN: 2600-7916, 10 (2), 151-152.

Niagara, R., Purwanto, Y., dan Suharnoto, Y. (2016): Analisis debit air dan air tanah dangkal daerah aliran sungai (das) prumpung, kabupaten tuban, Jurnal Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan, e-ISSN: 2460-5824, 6 (1), 20-23.

Nurhadi, Dyah, R. S. S., dan Nurul, K. (2013): Analisis kerentanan banjir di daerah aliran sungai (das) code kota yogyakarta, Laporan Penelitian Prgoram Studi Pendidikan Geografi, Universitas Negeri Yogyakarta, 8-9.

Pahleviannur, M. R. (2019): Edukasi sadar bencana melalui sosialisasi kebencanaan sebagai upaya peningkatan pengetahuan siswa terhadap mitigasi bencana, Jurnal Pendidikan dan Ilmu Sosial, e-ISSN: 2541-4569, 29 (1), 49-50.

Pristianovita, A. (2017): Perbandingan analisis hujan rancangan dengan metode partial series dan annual series, Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 3-4.

Pangaribuan, J., Sabri, L. M., dan Amarrohman, F. J. (2019): Analisis daerah rawan bencana tanah longsor di kabupaten magelang menggunakan sistem informasi geografis dengan metode standar nasional indonesia dan analythical hierarchy procss, Jurnal Geodesi Undip, e-ISSN: 2809-9672, 8 (1), 290-292.

Purbawijaya, N. B. I. (2017): Analisis debit banjir rencana dan penelusuran banjir pada perencanaan bangunan pelimpah waduk jehem di kabupaten bangle, Tugas Akhir Program Studi Teknik Tipil, Universitas Udayana, 3-19.

Putra, M. B. S., Trilita, M. N., dan Wahjudijanto, I. (2017): Analisis debit banjir rencana pada daerah aliran sungai banyumileng, Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Infrastruktur, ISBN: 978-602-61803-8-4, 145-146.

Rahmat, D. P., Antoni, D., dan Suroyo, H. (2021): Sistem informasi geografis pemetaan area menggunakan arcgis (studi kasus lokasi organisasi masyarakat (ormas) keagamaan di kota palembang), Jurnal Nasional Ilmu Komputer, e-ISSN: 2746-1343, 2 (4), 257-258.

Riyanto, B. A. (2019): Dasar teori aliran tetap 1-d hecras, Jurusan Sipil Fakultas Teknik UNPAR, 10-14.

Sebayang, I. S. D. (2018): Analisis banjir dan tinggi muka air pada ruas sungai ciliwung sta 7+646 s/d sta 15+049, Jurnal Forum Mekanika, ISSN: 2356-1491, 7 (1), 43-44.

Simons, D. B., dan Senturk, F. (1992): Sediment transport technology: water and sediment dynamic, Water Resources Publications, 271-277.

Soemarto, C. D. (1999): Hidrologi teknik edisi II, Erlangga, 80-106.

Soewarno. (1995): Hidrologi aplikasi metode statistic untuk analisis data jilid 1, NOVA, 12-14.

Sosrodarsono, S., dan Takeda, K. (2003): Hidrologi untuk pengairan, PT Pradnya Paramita, 1-15.

Suripin. (2004): Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan, Andi, 13-98.

Tambunan, M. P. (2017): The pattern of spatial flood disaster region in DKI Jakarta, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 12014, 56 (1), 2-10.

Tarigan, L. A. (2022): Analisis karakteristik bentuk aliran sungai tuntungan desa sei beras sekata, kecamatan sunggal, kabupaten deli serdang, sumatera utara, Jurnal Samudra Geografi, ISSN: 2716-2737, 5 (1), 84-86.

Triatmodjo, B. (2010): Hidrologi terapan, Beta, 110-112, 147-149.

Tondobala, L. (2011): Pemahaman tentang kawasan rawan bencana dan tinjauan terhadap kebijakan dan peraturan terkait, Jurnal Sabua, ISSN: 2085-7020, 3 (1), 59-60.

Undang-Undang Republik Indonesia, (2007). Penanggulangan bencana. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 24 Tahun 2007. Undang-Undang Republik Indonesia. Jakarta.

Wulandari, S. dan Soebagio. (2020): Studi pengembangan metode poligon thiessen dengan pembobotan linier terhadap bidang eksak pada perhitungan curah hujan rerata daerah, Jurnal Rekayasa dan manajemen Konstruksi, ISSN: 2615-0824, 8 (1), 57-58. Arsyad, S. (2000): *Konservasi tanah dan air*, Penerbit IPB (IPB *Press*), Bandung.

Analisis Ketersediaan Debit Air Irigasi Terhadap Pola Tanam Masyarakat Pada Daerah Irigasi Haekrit Kabupaten Belu

Roswita Maranatha Tubani
I Made Udiana
Wilhelmus Bunganaen

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Kupang
***e-mail**: tubaniitha@gmail.com*
made_udiana@yahoo.com
wilembunganaen@staf.undana.ac.id

ABSTRAK

Kabupaten Belu merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Nusa Tenggara Timur yang memiliki potensi pengembangan ekonomi berbasis sumber daya alam. Oleh karena itu, di bangun saluran irigasi yang bersumber dari Bendungan Haekrit untuk mengoptimalkan ketersediaan air yang terbatas. Bendungan ini difungsikan untuk mengairi daerah irigasi (DI) Haekrit seluas 78 ha. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besar debit andalan menggunakan Metode F.J. Mock dan untuk mengetahui ketersediaan air pada DI Haekrit. Besar debit andalan per sepuluh harian bulanan maksimum untuk DI Haekrit tahun 2011-2020 terjadi pada bulan Februari (II) dengan nilai 0,84 m3/detik. Sedangkan minimumnya terjadi pada bulan Agustus (II) dengan nilai 0,30 m3/detik. Perhitungan secara manual didapat kebutuhan air irigasi maksimum sebesar 0,22 m3/detik dan minimum sebesar 0,03 m3/detik. Perhitungan menggunakan Program Cropwat 8.0, didapat kebutuhan air irigasi maksimum sebesar 0,36 m3/detik dan minimum sebesar 0,01 m3/detik. Neraca air mengalami surplus air untuk pola tanam padi-padi-palawija terutama pada alternatif 4 yang mengalami surplus air tertinggi yaitu sebesar 0,02 % dengan perhitungan secara manual dan 0,33 % dengan menggunakan Program Cropwat 8.0. Sehingga pola tanam alternatif 4 ini direkomendasikan sebagai pola tanam yang cukup optimal dalam memenuhi kebutuhan air irigasi selama musim kemarau.

Kata kunci: Ketersediaan, Debit Air, Irigasi, Pola Tanam, Bendungan

1. PENDAHULUAN

Kabupaten Belu merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Nusa Tenggara Timur yang posisinya berbatasan langsung dengan Negara Timor Leste. Pembangunan layanan daerah irigasi di Kabupaten Belu demi menjamin pasokan kebutuhan air untuk usaha pertanian tanaman pangan dan hortikultura belum dapat terlayaninya kebutuhan air irigasi secara optimal. Oleh karena itu, sebagai upaya memperbaiki kondisi tersebut perlu dilakukan pembangunan, pemeliharaan dan peningkatan saluran. Kecamatan Tasifeto Timur merupakan salah satu kecamatan di Kabupaten Belu yang memiliki potensi pengembangan ekonomi yang sangat besar berbasis sumber daya alam salah satunya sektor tanaman pangan dan perkebunan. Untuk menunjang proses di sektor tersebut, dibutuhkan ketersediaan air yang cukup . Oleh karena itu, di bangun saluran irigasi yang bersumber dari Bendungan Haekrit untuk mengoptimalkan ketersediaan air yang terbatas pada Daerah Irigasi (DI) Haekrit. Bendungan ini difungsikan sebagai pusat pengairan untuk mengairi Daerah Irigasi (DI) Haekrit seluas 78 ha di Kabupaten Belu serta bermanfaat sebagai penyedia air baku sebesar 30 liter/detik. (Kemenpu Dirjen SDA, 2013).

2. PEMBAHASAN

Lokasi dalam penelitian ini adalah Daerah Irigasi Haekrit, Kecamatan Tasifeto Timur, Kabupaten Belu, dengan luas area irigasi sebesar 78 ha. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data data hujan tahun 2011-2020 (10 tahun) dari data Stasiun Hujan Haliwen yang diperoleh dari Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II, Kupang dan data iklim berupa data suhu (T), kelembaban relatif (RH), lama penyinaran matahari (n/N) dan kecepatan angin (u) digunakan tahun 2011-2020 (10 tahun) yang diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Lasiana, Kupang.

1) Curah Hujan Andalan

Curah hujan andalan digunakan untuk menentukan curah hujan efektif yang merupakan curah hujan yang

digunakan oleh tanaman untuk pertumbuhan. Curah hujan andalan untuk tanaman padi ditetapkan sebesar 80%, sedangkan untuk tanaman palawija sebesar 50% (Tria, L. dkk., 2014).

2) Curah Hujan Efektif

Besar curah hujan efektif untuk tanaman padi ditentukan dengan 70% dari curah hujan merata sesuai periode pengamatan dengan kemungkinan kegagalan 20% atau curah hujan R80. Curah hujan efektif diperoleh dari 70% nilai R80 per periode waktu pengamatan.

3) Evapotranspirasi Potensial Secara Manual

Metode FAO (Food and Agriculture Organization) Penman yang terkoreksi atau lazim digunakan untuk menghitung evapotranspirasi potensial disebut Penman Modifikasi.

4) Evapotranspirasi Potensial dengan Program *Cropwat 8.0*

Dari beberapa studi didapatkan bahwa model Penman-Monteith memberikan pendugaan yang akurat sehingga FAO merekomendasikan penggunaannya untuk pendugaan laju evapotranspirasi standar dalam menduga kebutuhan air bagi tanaman (Tumiar, dkk., 2012).

5) Debit Andalan

Dalam perencanaan proyek- proyek penyediaan air terlebih dahulu harus dicari debit andalan (*dependable discharge*), yang tujuannya adalah untuk menentukan debit perencanaan yang diharapkan selalu tersedia di sungai (Soemarto, 1986). Metode yang digunakan untuk menghitung besar debit andalan dalam penelitian ini adalah Metode F. J. Mock.

6) Kebutuhan Air Irigasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam menentukan kebutuhan air irigasi untuk penanaman padi di sawah adalah sebagai berikut (KP-01, 2013):

Penyiapan lahan

Besarnya kebutuhan air untuk penyiapan lahan tergantung pada beberapa faktor seperti lamanya waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan pekerjaan penyiapan lahan dan jumlah air yang dibutuhkan untuk penyiapan lahan tersebut.

Penggunaan konsumtif

Untuk mengetahui nilai kebutuhan konsumtif tanaman, dapat dihitung dengan menggunakan nilai evapotranspirasi dan koefisien tanaman.

Perkolasi

Pada tanah-tanah lempung berat dengan karakteristik pengelolahan (*puddling*) yang baik, laju perkolasi dapat mencapai 1-3 mm/ hari. Pada tanah-tanah yang lebih ringan laju perkolasi bisa lebih tinggi (Priyonugroho,2014).

Penggantian lapisan air

Penggantian dilakukan sebanyak 2 kali, masing-masing 50 mm (atau 3,3 mm/hari selama 1/2 bulan) selama satu bulan dan dua bulan setelah transplantasi (Priyonugroho,2014).

Efisiensi irigasi

Menurut KP-01 (2013), efisiensi irigasi dipengaruhi oleh besarnya jumlah air yang hilang selama pengalirannya dari saluran primer, sekunder hingga tersier.

Faktor-faktor yang mempengaruhi dalam menentukan kebutuhan air irigasi untuk penanaman palawija di sawah adalah sebagai berikut (KP-01, 2013):

Penyiapan lahan

Kebutuhan air untuk penyiapan lahan diperkirakan dari 50 mm - 100 mm (Kriteria Perencanaan-01, 2013).

Penggunaan konsumtif

Untuk mengetahui nilai kebutuhan konsumtif tanaman palawija, dapat dihitung dengan menggunakan nilai evapotranspirasi dan koefisien tanaman seperti pada tanaman padi yang menggunakan rumus Metode Penman

modifikasi.

7) Neraca Air (*Water Balance*)

Menurut Hadryana dkk (2015), neraca air (*water balance*) merupakan neraca masukan dan keluaran air di suatu tempat pada periode tertentu, sehingga dapat diketahui jumlah air tersebut kelebihan (surplus) ataupun kekurangan (defisit). Dalam perencanaan hidrologi, perhitungan neraca air dapat membantu menerangkan aliran air yang masuk dan keluar pada suatu sistem.

8) Pola Tanam

Pola tanam merupakan rencana urutan jadwal penanaman jenis tanaman pada suatu daerah irigasi dalam jangka waktu satu tahun atau lebih. Setelah ada pola tanam rencana, maka penentuan awal tanamnya dilakukan dengan cara mencoba-coba menggeser awal waktu tanamnya dengan periode 45 hari agar di peroleh luas tanam maksimumnya (Bunganaen, 2020).

9) Program *Cropwat 8.0*

Program Cropwat 8.0 dapat dipergunakan untuk menghitung evapotranspirasi potensial, evapotranspirasi aktual, kebutuhan air irigasi satu jenis tanaman maupun beberapa jenis tanaman. Dari beberapa studi didapatkan bahwa model Penman-Monteith memberikan pendugaan yang akurat sehingga FAO merekomendasikan penggunaannya untuk pendugaan laju evapotranspirasi standar dalam menduga kebutuhan air bagi tanaman (Tumiar, dkk., 2012).

3. GAMBAR DAN TABEL

1) Nilai Kc Tanaman Padi

Nilai Kc tanaman padi dibedakan untuk tanaman padi unggul dan padi lokal. Koefisien tanaman mengacu pada Tabel 1 koefisien tanaman menurut Nedeco/Prosida dan FAO yang telah dimodifikasi:

Tabel 1. Harga Koefisien Tanaman Padi

Umur (bulan)	Padi (Nedeco/Prosida)		Padi FAO	
	Lokal	Unggul	Lokal	Unggul
0, 50	1, 20	1, 20	1, 10	1, 10
1, 00	1, 20	1, 27	1, 10	1, 10
1, 50	1, 32	1, 33	1, 10	1, 05
2, 00	1, 40	1, 30	1, 10	1, 05
2, 50	1, 35	1, 15	1, 05	0, 95
3, 00	1, 24	0, 00	1, 05	0, 00
3, 50	1, 12		0, 95	
4, 00	0, 00		0, 00	

2) Contoh Pola Tanam

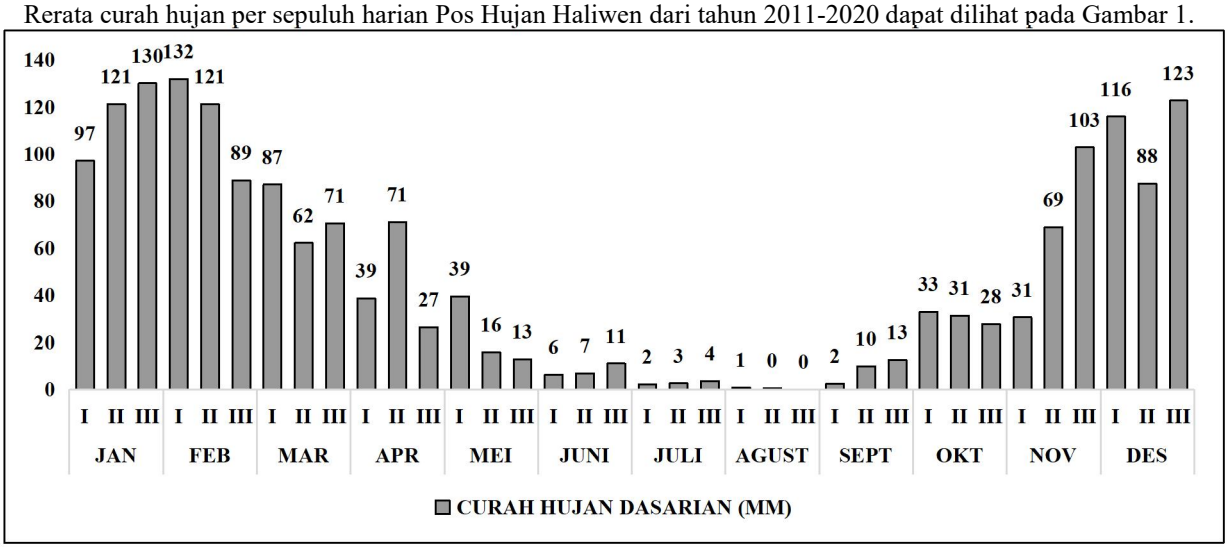
Untuk memenuhi kebutuhan air bagi tanaman, penentuan pola tanam merupakan hal yang perlu dipertimbangkan. Tabel 2 menunjukan contoh pola tanam yang bisa digunakan.

Tabel 2. Contoh Pola Tanam

No	Ketersediaan air untuk jaringan irigasi	Pola tanam dalam satu tahun
1.	Tersedia air cukup banyak	Padi – Padi – Palawija
2.	Tersedia air dalam jumlah cukup	Padi – Padi – Bera Padi – Palawija – Palawija
3.	Daerah yang cenderung kekurangan air	Padi – Palawija – Bera Palawija – Padi – Bera

3) Curah Hujan per Sepuluh Harian

Rerata curah hujan per sepuluh harian Pos Hujan Haliwen dari tahun 2011-2020 dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Rerata curah hujan per sepuluh harian Pos Hujan Haliwen Tahun 2011-2020

4) Curah Hujan Andalan dan Curah Hujan Efektif

Curah hujan andalan untuk tanaman padi (80%), untuk tanaman palawija (50%) dan Curah hujan efektif sebesar 70% dari curah hujan andalan dapat dilihat pada Tabel 3.

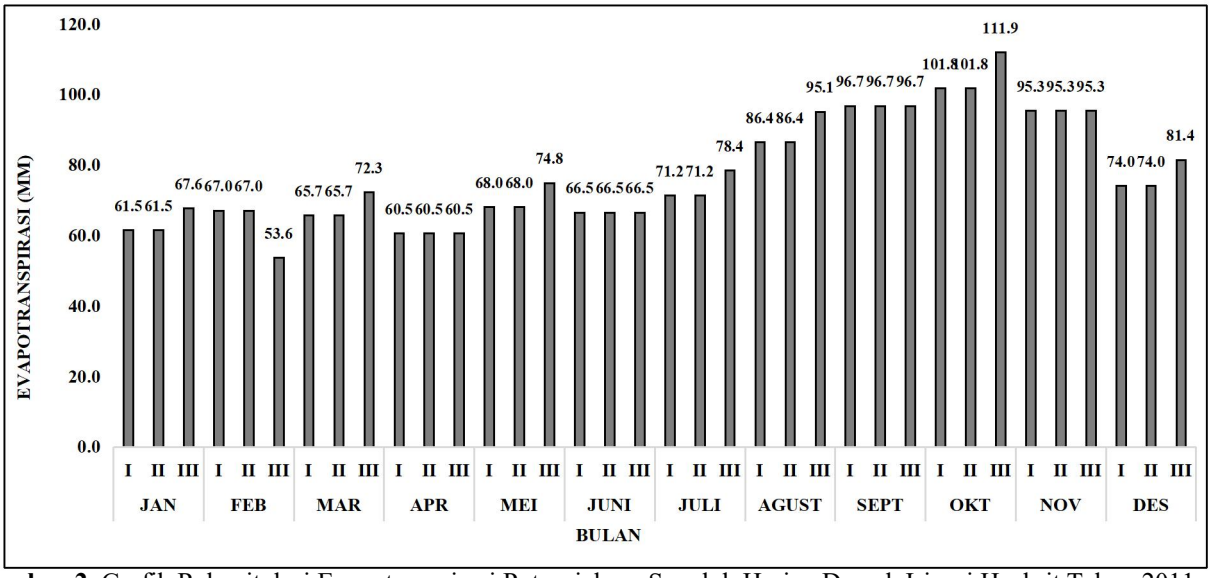
Tabel 3. Curah Hujan Andalan dan Curah Hujan Efektif

Bulan	Periode	Curah Hujan Andalan(mm)		Reff Padi		Reff Palawija	
		Probabilitas 80%	Probabilitas 50%	70% x R_{80} (mm)	mm/hari	70% x R_{50} (mm)	mm/hari
Januari	I	20.66	79.40	14.46	1.45	55.58	5.56
	II	31.66	82.35	22.16	2.22	57.65	5.76
	III	18.58	132.25	13.01	1.18	92.58	8.42
Februari	I	54.44	128.35	38.11	3.81	89.85	8.98
	II	44.26	118.75	30.98	3.10	83.13	8.31
	III	34.30	49.80	24.01	3.00	34.86	4.36
Maret	I	40.72	88.05	28.50	2.85	61.64	6.16
	II	38.18	60.65	26.73	2.67	42.46	4.25
	III	36.20	52.30	25.34	2.30	36.61	3.33
April	I	2.00	29.10	1.40	0.14	20.37	2.04
	II	12.12	30.55	8.48	0.85	21.39	2.14
	III	0.20	25.95	0.14	0.01	18.17	1.82
Mei	I	5.84	28.45	4.09	0.41	19.92	1.99
	II	0.00	9.40	0.00	0.00	6.58	0.66
	III	0.00	1.50	0.00	0.00	1.05	0.10
Juni	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Juli	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agustus	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
September	I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	III	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Oktober	I	0.00	8.70	0.00	0.00	6.09	0.61
	II	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	III	0.00	11.25	0.00	0.00	7.88	0.72

November	I	0.00	7.45	0.00	0.00	5.22	0.52
	II	6.74	35.10	4.72	0.47	24.57	2.46
	III	15.42	59.95	10.79	1.08	41.97	4.20
Desember	I	70.36	108.80	49.25	4.93	76.16	7.62
	II	44.44	68.05	31.11	3.11	47.64	4.76
	III	78.80	110.90	55.16	5.01	77.63	7.06

5) Perhitungan Evapotranspirasi Potensial Secara Manual

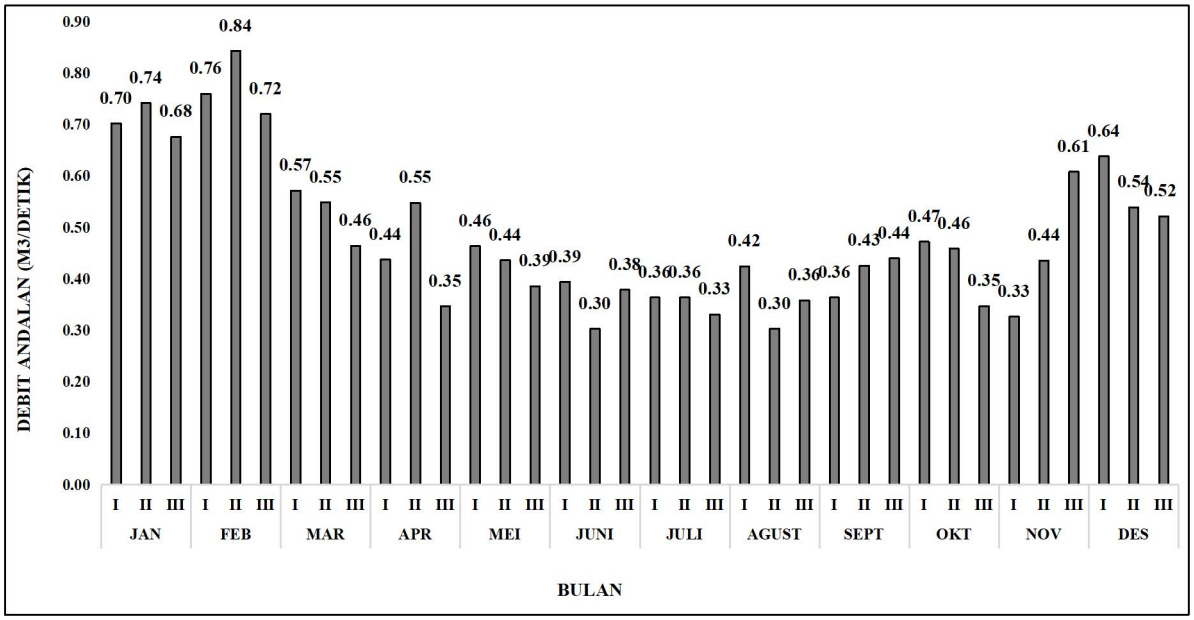
Hasil perhitungan evapotranspirasi potensial secara manual dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Rekapitulasi Evapotranspirasi Potensial per Sepuluh Harian Daerah Irigasi Haekrit Tahun 2011-2020

6) Perhitungan Debit Andalan

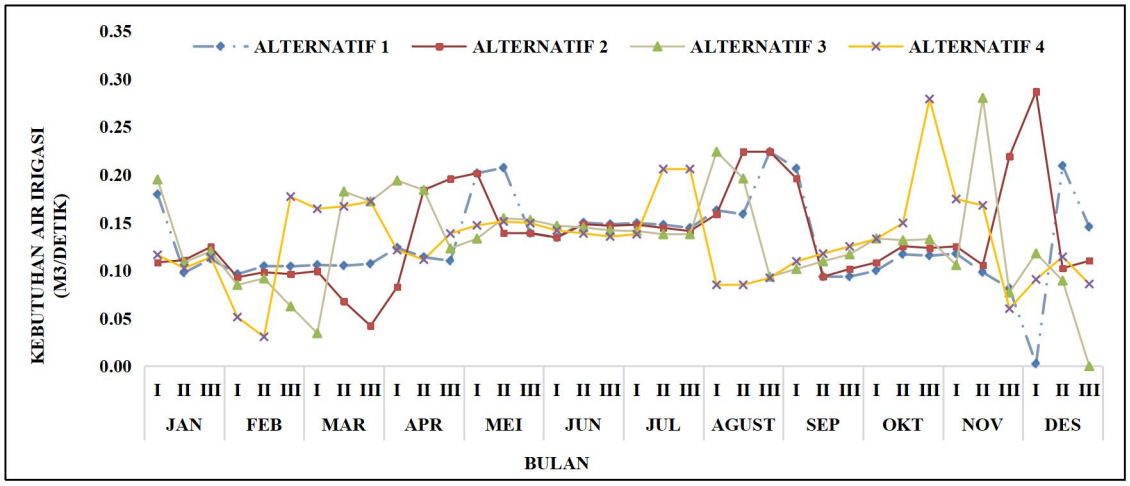
Hasil perhitungan debit andalan per sepuluh harian dengan Metode F. J. Mock dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Debit Andalan Daerah Irigasi Haekrit Tahun 2011-2020

7) Analisis Kebutuhan Air Irigasi dengan Perhitungan Secara Manual

Besar kebutuhan air rigasi untuk pola tanam padi-padi-palawija alternatif 1-alternatif 4 jika digambarkan ke dalam grafik dapat dilihat pada Gambar 4.



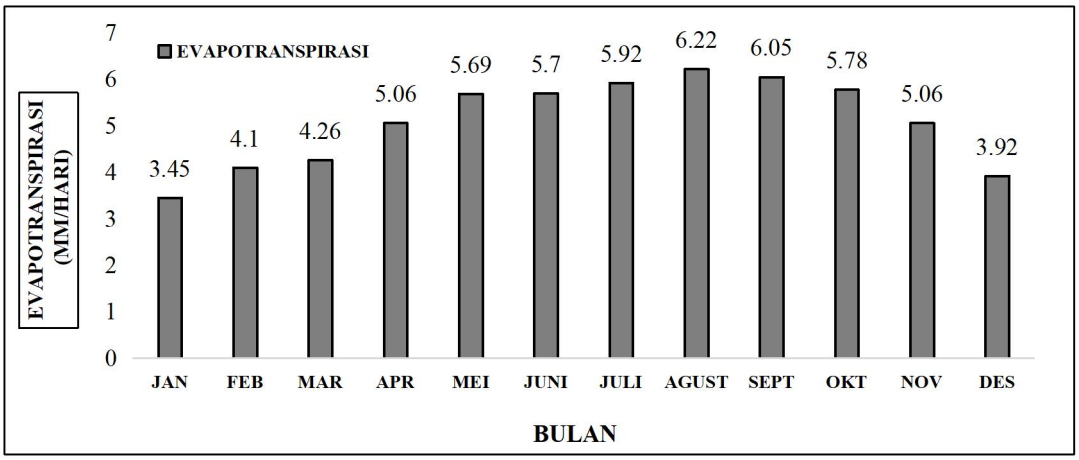
Gambar 4. Grafik Rekapitulasi Kebutuhan Air Irigasi Pola Tanam Padi–Padi– Palawija Alternatif 1 Sampai Alternatif 4

Dari Gambar 4 dapat dikatakan bahwa kebutuan air maksimum terbesar terjadi pada pola tanam padi–padi–palawija alternatif 2 yaitu sebesar 0,29 m3/detik, sedangkan nilai kebutuhan air maksimum terendah terdapat pada pola tanam padi–padi–palawija alternatif 1 yaitu sebesar 0,21 m3/detik.

8) Analisis Kebutuhan Air Irigasi dengan Program Cropwat 8.0

Perhitungan evapotranspirasi potensial

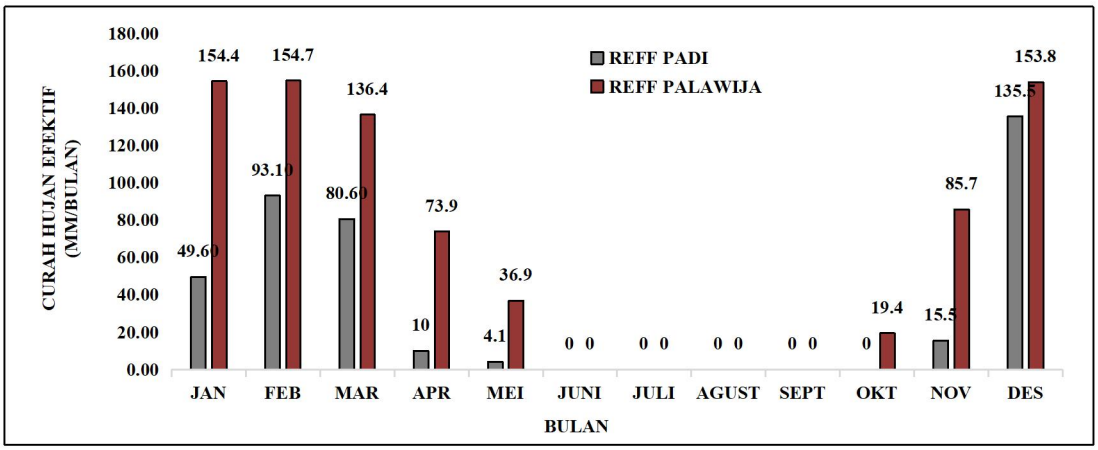
Data input yang dibutuhkan untuk Program Cropwat 8.0 untuk menghitung evapotranspirasi potensial yaitu data klimatologi berupa suhu udara rata-rata, kelembaban relatif, lama penyinaran dan kecepatan angin tahun 2011-2020 yang digunakan dalam penentuan nilai ETo melalui persamaan Penman-Monteith. Rekapitulasi nilai evapotranspirasi potensial dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Rekapitulasi Evapotranspirasi dengan Program *Cropwat 8.0*

Perhitungan curah hujan efektif

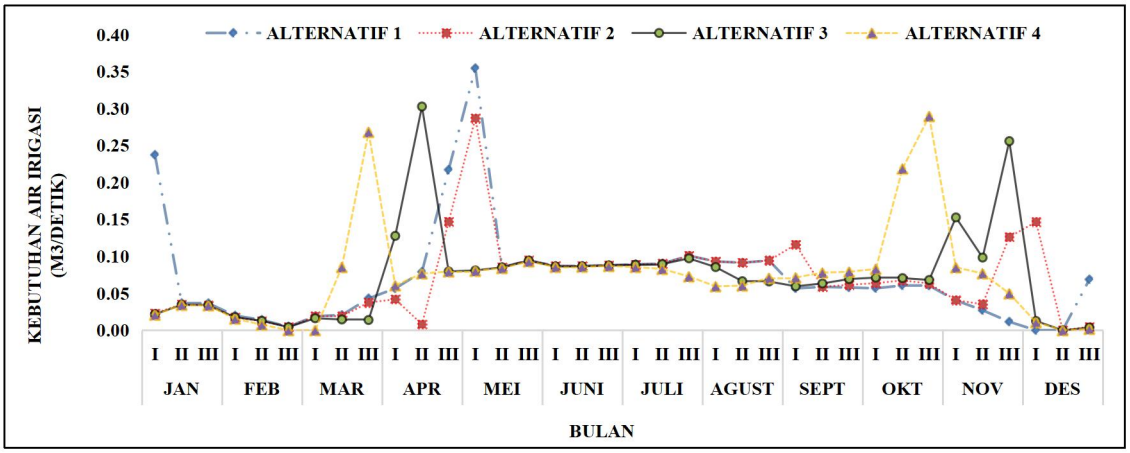
Hasil perhitungan curah hujan efektif dari tanaman padi dan palawija dengan Program Cropwat 8.0 dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Rekapitulasi Curah Hujan Efektif Padi dan Palawija dengan Program *Cropwat 8.0*

Analisa kebutuhan air irigasi

Besar kebutuhan air rigasi untuk pola tanam padi-padi-palawija alternatif 1-alternatif 4 jika digambarkan ke dalam grafik dapat dilihat pada Gambar 7.



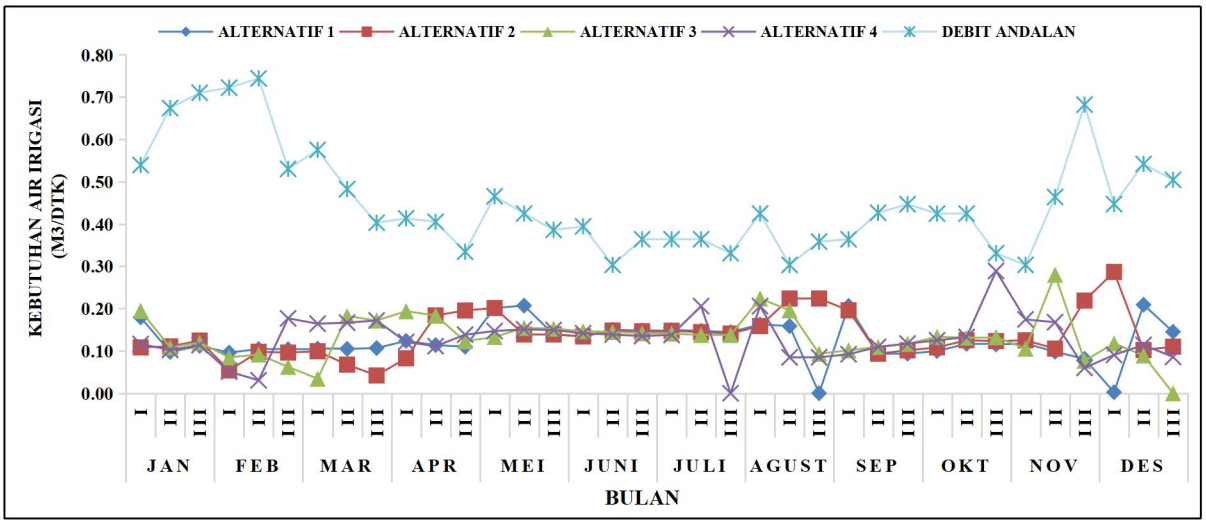
Gambar 7. Grafik Rekapitulasi Kebutuhan Air Irigasi Pola Tanam Padi–Padi– Palawija Alternatif 1 Sampai Alternatif 4 dengan Program *Cropwat 8.0*

Dari Gambar 7 dapat disimpulkan bahwa kebutuhan air maksimum terbesar terjadi pada pola tanam padi–padi–palawija alternatif 1 yaitu sebesar 0,35 m3/detik, sedangkan untuk nilai kebutuhan air maksimum terendah terdapat pada pola tanam padi–padi–palawija alternatif 2 yaitu sebesar 0,29 m3/detik.

9) Neraca Air (*Water Balance*)

Neraca air untuk perhitungan secara manual

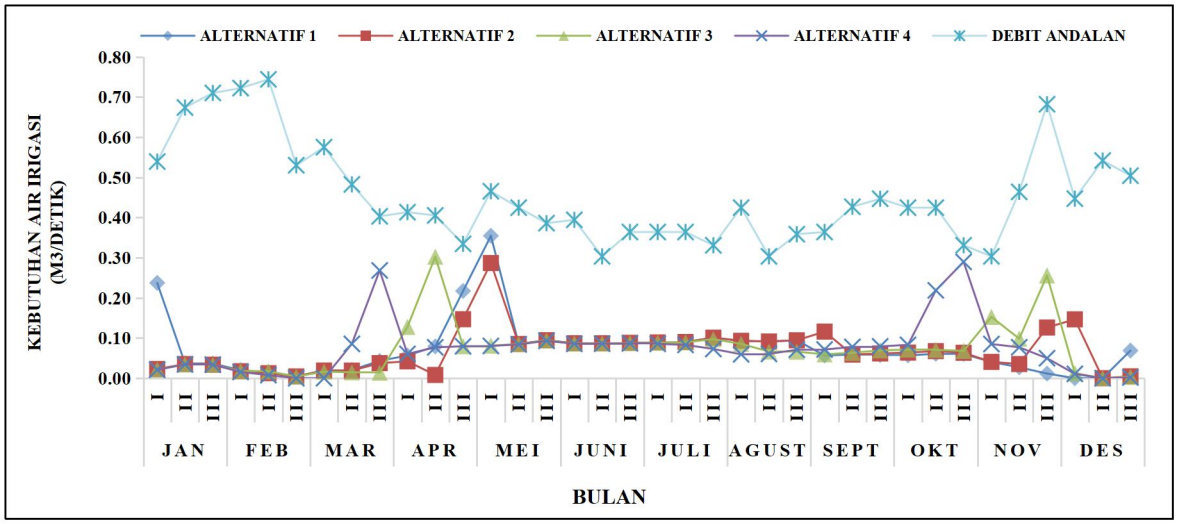
Hasil perhitungan secara manual untuk debit andalan menggunakan Metode F. J. Mock dan nilai kebutuhan air irigasi pola tanam padi-padi-palawija alternatif 1 sampai 4 yang akan mengairi lahan irigasi seluas 78 Ha jika digambarkan dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Neraca Air pada Hasil Perhitungan Kebutuhan Air Irigasi Secara Manual Pola Tanam Padi-Padi-Palawija Alternatif 1-Alternatif 4

Necara air untuk hasil perhitungan menggunakan Program *Cropwat 8.0*

Hasil perhitungan dengan Program Cropwat 8.0 untuk debit andalan menggunakan Metode F. J. Mock dan nilai kebutuhan air irigasi pola tanam padi-padi-palawija alternatif 1 sampai 4 yang akan mengairi lahan irigasi seluas 78 Ha jika digambarkan dalam bentuk grafik dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Neraca Air pada Hasil Perhitungan Kebutuhan Air Irigasi dengan Program *Cropwat 8.0* Pola Tanam Padi-Padi-Palawija Alternatif 1-Alternatif 4

Rekomendasi pola tanam

Berdasarkan Gambar 8 dan Gambar 9, pola tanam alternatif 4 mengalami surplus air paling tinggi pada musim kemarau (Mei-November) dimanan\ perhitungan secara manual sebesar 0,02 % dan perhitungan dengan Program Cropwat 8.0 sebesar 0,33 %.

4. PERSAMAAN

Curah hujan efektif tanaman padi diperoleh dari 70% nilai R80 per periode waktu pengamatan dengan persamaan (Kemenpu Dirjen SDA, 2013):

$$\text{Reffpadi} = \frac{0{,}7 \times R_{80}}{10} \quad (1)$$

dengan, Repadi = Curah hujan efektif tanaman padi (mm/hari), R80 = Curah hujan andalan 80% (tanaman padi)

Curah hujan efektif tanaman palawija diperoleh dari R50 per periode waktu pengamatan, dengan persamaan (Kemenpu Dirjen SDA, 2013):

dengan, Repalawija = Curah hujan efektif tanaman palawija (mm/hari), R50 = Curah hujan andalan 50% (tanaman palawija)

Evapotranspirasi potensial secara manual (Eto) dapat diperoleh dari persamaan:

$$ETo = c\,[W \times Rn + (1 - W) \times f(U) \times (ea - ed)] \quad (3)$$

dengan, ETo = Evapotranspirasi (mm/hari), c = Faktor kondisi umum, W = Faktor bobot, Rn = Penyinaran radiasi bersih (mm/hari), f(U) = Fungsi angin relatif (km/hari), ea = Tekanan uap air jenuh (mbar), ed = Tekanan uap air (mbar)

Evapotranspirasi potensial dengan Program *Cropwat 8.0* dapat diperoleh dari persamaan:

$$ETo = \frac{0{,}408(Rn\text{-}G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s\text{-}e_a)}{\Delta+\gamma(1+0{,}34u_2)} \quad (4)$$

dengan, G = Kerapatan panas terus-menerus pada tanah (MJ/m2 /hari), γ = Konstanta psychrometric (kPa/oC), T = Temperatur harian rata-rata pada ketinggian 2 m (oC), u2 = Kecepatan angin pada ketinggian 2 m (m/s), Δ = Kurva kemiringan tekanan uap (kPa/oC)

Penyiapan Lahan dapat diperoleh dari persamaan:

$$IR = \frac{(M \times e^k)}{(e^k\text{-}1)} \quad (5)$$

dengan, IR = Kebutuhan air irigasi di tingkat persawahan (mm/hari), M = Kebutuhan air untuk mengganti kehilangan air akibat evaporasi dan perkolasi di sawah yang sudah dijenuhkan (mm/hari), e = Bilangan eksponensial (2,71828), k = Faktor kebutuhan air penyiapan lahan .

Penggunaan konsumtif dapat diperoleh dari persamaan:

$$ETc = Kc \times ETo \quad (6)$$

dengan, ETc = Evapotranspirasi tanaman (mm/hari), kc = Koefisien tanaman

Kebutuhan air bersih di sawah untuk padi dapat diperoleh dari persamaan:

$$NFRpadi = ETc + WLR + P - Repadi \quad (7)$$

dengan, NFR_{padi} = *Netto field water requirement*, kebutuhan bersih air di sawah (mm/hari), WLR = Pergantian lapisan air (mm/hari), P = Perkolasi (mm/hari), Repadi = Curah hujan efektif (mm/hari).

Kebutuhan air irigasi untuk tanaman padi dapat diperoleh dari persamaan:

$$Irpadi = \frac{NFR}{Eff} \quad (8)$$

dengan, Irpadi = Kebutuhan air untuk tanaman padi (mm/hari), Eff = Efisiensi irigasi

Kebutuhan air bersih di sawah untuk palawija dapat diperoleh dari persamaan:

$$NFRpalawija = ETc - Repalawija \quad (9)$$

Kebutuhan air irigasi untuk tanaman palawija dapat diperoleh dari persamaan:

$$Irpalawija = \frac{ETc - Re_{palawija}}{Eff} \quad (10)$$

$$DR = \frac{}{8,64} \quad (11)$$

dengan, DR = Kebutuhan pengambilan air pada sumbernya (lt/dt/ha), $\frac{1}{8,64}$ =Angka konversi satuan dari mm/hari ke lt/dt/ha

Kebutuhan air irigasi sesuai luas areal yang dialiri dapat diperoleh dari persamaan:

$$Q = \frac{(DR \times A)}{Eff} \times \frac{1}{1000} \quad (12)$$

dengan,Q = Debit rencana (m^3 /det), A = Luas daerah yang dialiri (ha), $\frac{1}{1000}$ = Angka konversi satuan dari l/det ke m^3/det

5. KESIMPULAN

Daerah Irigasi Haekrit menunjukkan variasi debit andalan dan kebutuhan air irigasi yang signifikan antara musim hujan dan kemarau dalam periode 2011-2020. Debit andalan tertinggi tercatat pada bulan Februari bagian II, sedangkan debit terendah terjadi pada bulan Agustus bagian II. Kebutuhan air irigasi maksimum dan minimum berbeda tergantung metode perhitungan, baik secara manual maupun dengan Program Cropwat 8.0. Secara keseluruhan, terdapat surplus air selama musim kemarau untuk pola tanam padi-padi-palawija, dengan pola tanam alternatif 4 memberikan surplus air tertinggi. Oleh karena itu, pola tanam alternatif 4 direkomendasikan sebagai pilihan yang paling optimal untuk memenuhi kebutuhan air irigasi selama musim kemarau.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

Soemarto, C. D. (1986). Hidrologi Teknik. Erlangga. Jakarta.

RMJMD. (2016). Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RMJMD) Kabupaten Belu Tahun 2016-2021.Pemerintah Kabupaten Belu

Direktotat Jendral Pengairan. (2013). Kriteria Perencanaan, Bagian Perencanaan Jaringan Irigasi (KP-01). Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.

Bunganaen, W., Karbeka, N. S., dan Hangge, E. E. (2020). "Analisis Ketersediaan Air terhadap Pola Tanam dan Luas Areal Irigasi Daerah Irigasi Siafu". Lembaga Penelitian UNDANA. Kupang.

A.O. (1998). "Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and Drainase paper 56". *FAO Irrigation and drainage paper*. Roma.

Priyunugroho. (2014). "Analisis Kebutuhan Air Irigasi (Studi Kasus pada Daerah Irigasi Sungai Air Keban Daerah Kabupaten Empat Lawang)". Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan. Universitas Sriwijaya. Sumatera Selatan.

Tumiar, M. K. (2012). "Evaluasi Metode Penman Monteith dalam Menduga Laju Evapotranspirasi Standar (ETo) di Dataran Rendah Provinsi Lampung, Indonesia". Universitas Lampung

ANALISIS KETERSEDIAAN SUMBER DAYA AIR DAN UPAYA KONSERVASI SUB DAS KALI LAMONG LAMONGAN

Anita Rahmawati[1*], Faradlillah Saves[2], Gilang Ramadan Kololikiye[1]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Malang, Jl. MT. Haryono 163, Kota Malang*
***e-mail**: anita.rahmawati@unisma.ac.id*
[2]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tujuh Belas Agustus Surabaya, Jl. Semolowaru No.45, Surabaya
e-mail: farasaves@untag-sby.ac.id
[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Malang, Jl. MT. Haryono 163, Kota Malang
e-mail: gilangft@unisma.ac.id

ABSTRAK

Konservasi Sub DAS merupakan upaya pengelolaan dan perlindungan sumber daya alam secara terpadu pada suatu wilayah yang lebih kecil dari Daerah Aliran Sungai (DAS) utama. Sub DAS merupakan bagian dari DAS yang memiliki karakteristik hidrologis dan geomorfologis yang khas. Lamongan merupakan salah satu Kabupaten di Provinsi Jawa Timur yang dilalui oleh Sub DAS Kali Bengawan Solo dan Sub DAS Kali Lamong. Kondisi DAS Kali Lamong yang dilewati oleh beberapa daerah telah mengalami kerusakan yang disebabkan berkurangnya tutupan lahan. Berkurangnya tutupan lahan merupakan salah satu masalah lingkungan yang serius dan berdampak langsung pada ketersediaan air. Tutupan lahan mengacu pada jenis vegetasi yang menutupi permukaan bumi, seperti hutan, semak belukar, dan lahan pertanian. Ketika tutupan lahan berkurang, misalnya akibat penebangan hutan atau konversi lahan menjadi permukiman, maka akan terjadi sejumlah perubahan yang berujung pada defisit air. Defisit air pada musim kemarau pada tahun 2019 sebesar 4.966.826 m^3 dan pada tahun 2023 sebesar 6.775.193 m^3. Konservasi tanah dan air adalah upaya untuk menjaga dan melindungi tanah serta sumber daya air dari kerusakan akibat erosi dan banjir. Ada dua metode utama yang sering digunakan dalam konservasi, yaitu vegetatif dan mekanis. Besar debit andalan tahun 2024 adalah 286.764.441,7395 (L/jiwa/Hari). Sementara itu, jumlah ketersediaan airnya adalah 134.889.167,441 (mm/hari) maka total keseimbangan airnya adalah 134.612.402.969,6 L/hari.

Kata kunci: defisit, konservasi, Sub DAS Kali Lamong

1. PENDAHULUAN

Defisit air merupakan kondisi ketika curah hujan lebih kecil daripada evapotranspirasi, sehingga air di lahan menjadi berkurang. Faktor yang mempengaruhi terjadinya defisit air yaitu pengaruh kondisi lingkungan seperti: suhu, kekeringan dan salinitas. Defisit air memiliki dampak negatif pada perkembangan dan pertumbuhan tanaman, dimana tanda – tanda utamanya adalah daun-daun layu. Defisit air dapat dihitung dengan data meteorologi, seperti: ketersediaan air, curah hujan dan evapotranspirasi. Pemodelan neraca air juga dapat digunakan untuk memprediksi defisit air di suatu daerah.

Selain itu, ketersediaan air untuk kebutuhan makhluk hidup saat ini terbatas dikarenakan jumlah manusia yang populasinya semakin bertambah dan lahan hijau semakin sempit, sedangkan kebutuhan air semakin meningkat setiap tahunnya baik dari segi kualitas, kuatitas dan jenis kebutuhan. Dalam banyak wilayah, kondisi ketersediaan air selama musim kemarau menjadi masalah. Pada musim kemarau pasokan air dapat mempengaruhi kebutuhan konsumsi, pertanian, industri dan ekosistem. Ketersediaan air ditentukan dari siklus air yang seimbang dimana besarnya aliran masuk (*inflow*) dan kebutuhan air keluar (*outflow*) adalah konstan. Adapun dalam penelitian ini komponen air masuk (*inflow*) pada waduk ini berasal dari air hujan yang turun dan air sungai sedangkan kebutuhan air keluar (*outflow*) digunakan untuk air baku melalui irigasi dan evapotranspirasi (Hadriyana dkk, 2015). Oleh karena itu, penting mengembangkan pendekatan yang memungkinkan pemantauan dan penglolaan efisiensi sumber daya air selama musim kemarau. Setiap DAS (Daerah Aliran Sungai) memiliki kebutuhan air yang berbeda – beda, sehingga memerlukan perlakuan khusus pada beberapa Sub DAS. Pengelolaan Sub DAS harus mampu menyediakan air secara merata keseluruh daerah sehingga masing-masing memperoleh kebutuhan air sesuai peruntukannya. (Ardana et al, 2019).

Terkait dengan permasalahan yang terjadi pada Sub DAS Kali Lamong, perlu dilakukan analisis secara teknis mengenai ketersediaan sumber daya air yang ada di wilayah tersebut terhadap kebutuhan air yang tiap tahun meningkat. Untuk menjaga ketersediaan sumber daya air baik masa sekarang maupun yang akan datang, diperlukan analisis konservasi sumber daya air. Analisis konservasi sumber daya air yang dilakukan di wilayah tersebut bertujuan untuk meminimalisir defisit air yang terjadi pada musim kemarau. Upaya yang dapat dilakukan antara lain dengan mengembalikan fungsi lahan sebagai lahan konservasi (vegetasi) dan penyediaan pemanen air hujan (mekanis). Apabila ditinjau dari aspek finansial, konservasi diharapkan ada kegiatan yang dapat menguntungkan bagi masyarakat sekitar. Masyarakat yang awalnya mengalami kerugian akibat kekeringan diharapkan mendapatkan keuntungan baik

2. RUMUSAN MASALAH DAN TUJUAN

Berdasarkan latar belakang yang ada, maka perumusan masalah dalam artikel ini dapat diuraikan sebagai berikut:
1. Bagaimana ketersediaan air di Sub DAS Kali Lamong pada saat ini?
2. Bagaimana upaya konservasi sumber daya air yang harus dilakukan untuk menjaga keberlangsungan kuantitas ketersediaan air di masa mendatang?

Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang sudah diuraikan diatas, maka penyusunan artikel ini bertujuan untuk:
1. Menganalisis ketersediaan air yang ada di Sub DAS Kali Lamong pada saat ini.
2. Menganalisis konservasi sumber daya air untuk meminimalisir defisit air pada musim kemarau dan menjaga keberlangsungan kuantitas sumberdaya air di Sub DAS Kali Lamong.

3. MANFAAT

Diharapkan hasil penelitian ini bisa dijadikan sebagai konsep terpadu dalam pengelolaan sumber daya air, khususnya di Sub DAS Kali Lamong terutama pada masa kekeringan. Dengan pengelolaan sumber daya air yang baik, akan diperoleh ketersediaan air yang memenuhi secara berkelanjutan, serta dapat meminimalisir krisis air bersih dalam penyediaan air untuk sektor-sektor penting lainnya yang selalu terjadi setiap tahun.

4. RUANG LINGKUP

Ruang lingkup yang dikaji dalam penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut:
1. Permasalahan yang dibahas hanya pada lingkup Sub DAS Kali Lamong.
2. Tidak memperhitungkan besarnya tingkat erosi terhadap kelerengan.
3. Perhitungan kebutuhan air untuk kebutuhan air domestik dan non domestik.
4. Debit air (ketersediaan air) yang digunakan adalah debit air permukaan.
5. Perhitungan debit air menggunakan metode FJ.Mock dan dikalibrasi dengan debit AWLR (pengamatan).
6. Hanya membahas aspek teknis dan lingkungan sebagai upaya konservasi Sub DAS Kali Lamong.
7. Tidak menganalisis pengaruh kualitas air dalam penyediaan air baku.
8. Tidak mendesain struktur embung/ waduk.

5. KAJIAN PUSTAKA

1. Ketersediaan Air (Air Permukaan)

Dalam menganalisa ketersediaan air perlu diperhitungkan komponen-komponen yang mempengaruhinya, dimana komponen-komponen tersebut meliputi komponen air permukaan dan sumber air. Karena keterbatasan data, maka dalam penelitian ini komponen air yang digunakan hanya air permukaan. Untuk menganalisa ketersediaan air permukaan akan digunakan sebagai acuannya adalah debit andalan (*dependable flow*). Debit andalan merupakan suatu besaran debit gabungan antara limpasan langsung dan aliran dasar. Debit ini mencerminkan suatu angka yang dapat diharapkan terjadi pada titik kontrol yang dikaitkan dengan waktu dan nilai keandalan. Untuk mendapatkan nilai ketersediaan, maka perlu dianalisa lebih dalam melalui debit andalan atau ketersediaan debit yang merupakan debit benar-benar dapat diandalkan ada pada suatu sungai, baik pada musim kering atau musim penghujan. Beberapa metode dapat dilakukan untuk mengetahui debit andalan ini seperti metode FJ. Mock, pengukuran langsung dan dengan memasang alat pengukuran debit *Automatic Water Level Record* (AWLR). Metode FJ Mock menganggap bahwa hujan yang jatuh pada *catchment area* akan hilang sebagai evapotranspirasi, sebagian akan langsung menjadi *direct run off* dan sebagian lagi akan masuk ke dalam tanah (*infiltrasi*).

Infiltrasi asal mulanya akan menjatuhkan *top-soil* kemudian menjadi perkolasi ke tampungan air tanah yang nantinya akan keluar ke sungai sebagai *base flow*, dalam hal ini harus ada keseimbangan antara hujan yang jatuh dengan evapotranspirasi, *direct run off* dan infiltrasi sebagai *soil moisture* dan *ground water discharge*. Metode ini didasarkan pada paremeter data hujan, evapotranspirasi, dan karakteristik DAS setempat. Sehingga perhitungan debit efektif dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{efektif} = \frac{Q_{tot} * A * 1000}{n * 24 \frac{jam}{hari} * 3600} \det/\ jam \qquad (1)$$

dengan Q efektif = debit efektif (m^3/dt), Qtot = total limpasan aliran sungai (mm/ bulan), A = luas *cathment area* (km^2), N = jumlah hari hujan (hari).

2. Metode Vegetasi

Metode vegetasi merupakan sebuah metode yang menggunakan tanaman atau tumbuhan untuk mengurangi daya rusak hujan yang jatuh dan aliran permukaan serta erosi. Menurut (Arsyad, 1989) dalam konservasi dengan metode vegetasi diperoleh beberapa fungsi antara lain :

b. Melindungi tanah terhadap daya perusak aliran air di atas permukaan tanah
c. Memperbaiki kapasitas *infiltrasi* tanah dan penahan air.

Dalam analisa konservasi vegetasi , faktor simpanan lengas tanah (*soil water stronge)* atau disingkat SWS sangat mempengaruhi ketersediaan air dalam tanah. Simpanan lengas tanah merupakan jumlah total air yang tersimpan maka semakin banyak cadangan air yang tersedia bagi tanaman selama periode tertentu. Dalam penanaman disekitar lahan waduk perlu memperhatikan jenis tanah. Jenis tanah yang berada di Sub DAS Kali Lamong merupakan jenis tanah lempung berpasir. Tanah berlempung adalah jenis tanah yang menmiliki kandungan liat yang cukup tinggi . Karakteristik tanah berlempung melibatkan partikel – partikel halus dan kemampuan tanah untuk mempertahankan kelembaban . Jenis tanah lempung berpasir memiliki kombinasi antara partikel liat dan berpasir,memberikan sifat drainase yang lebih baik dibandingkan tanah berlempung murni. Tanah berlempung memiliki karakteristik khusus, termasuk kemampuan retensi air yang baik dan cenderung menjadi keras ketika kering.

3. Metode Mekanis

Pemanfaatan air hujan merupakan serangkaian kegiatan mengumpulkan,menggunakan dan menyerapkan air hujan ke dalam tanah. Kolam pengumpul air hujan merupakan wadah atau kolam yang diguakan untuk menampung air hujan. Metode pemanen air hujan memiliki prinsip konservasi air yaitu memanfaatkan air hujan yang jatuh ke tanah seefisien mungkin, mengendalikan kelebihan air di musim hujan dan menyediakan air yang cukup di musim kemarau. Konsep pemanenan air memiliki fungsi sebagai berikut:

a. Memperlambat aliran permukaan
b. Menampung dan mengalirkan aliran permukaan sehingga tidak merusak
c. Memperbesar kapasitas *infiltrasi* air ke dalam tanah dan memperbaiki aerasi tanah
d. Menyediakan air bagi tanaman

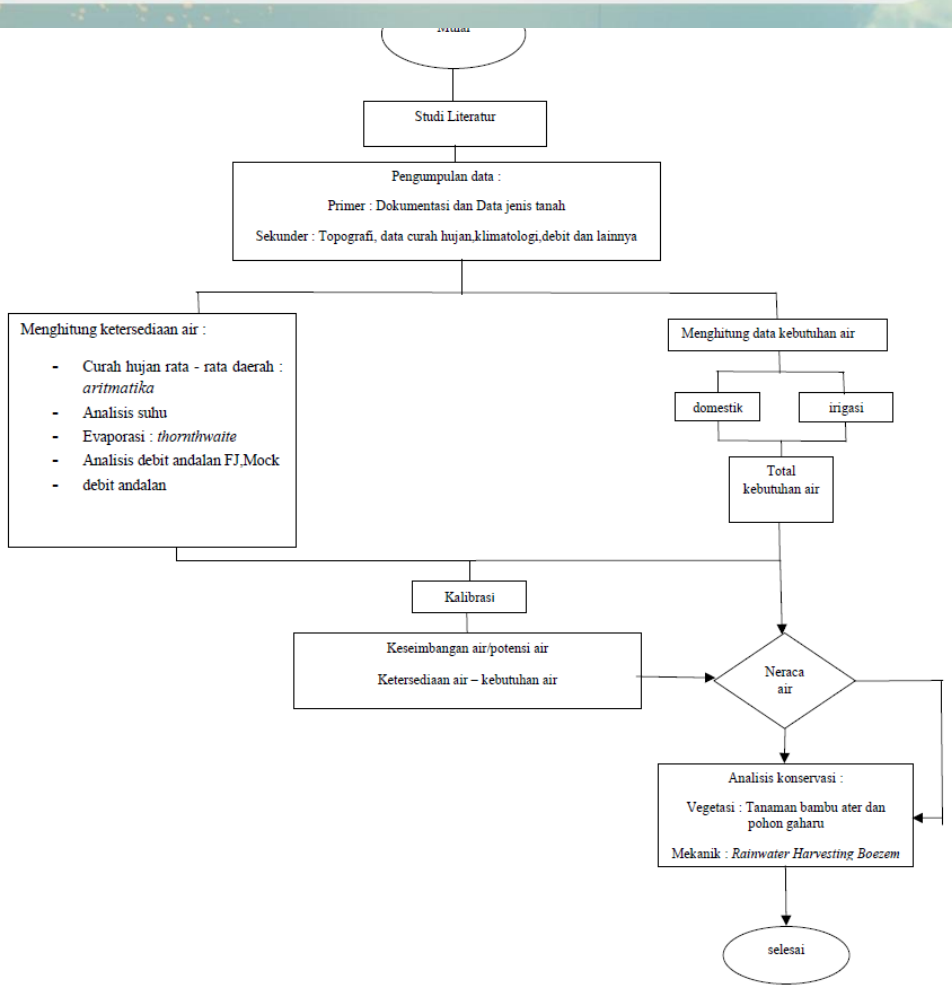
Dalam implementasi air hujan digunakan cara yaitu pemanen air hujan dengan pemanen air hujan dengan embung atau waduk. Pembuatan embung/waduk adalah solusi terbaik untuk menampung air hujan. Namun, apabila penggunaan air untuk keperluan sehari-hari tidak optimal maka akan terjadi ketidak seimbangan air pada musim kemaru dan musim hujan. Kriteria untuk menentukan pembuatan embung/ waduk adalah berdasarkan letaknya yang tidak berbatasan dengan laut dan volume kapasitas tampungan mampu menampung diatas 50.000 m^3 (Lasminto, 2016). Semakin kecil volume tampungan air, maka potensi pemanfaatan airnya terutama dimusim kemarau juga lebih kecil. Untuk menghtung volume tampungan yang diperlukan berdasarkan kebutuhn air (Vn) adalah sebagai berikut :

$$Vn = Vu + Ve + Vi + Vs \quad (2)$$
$$Vi = K \times Vu \quad (3)$$
$$Vs = 0{,}05 \times Vu \quad (4)$$

dengan Vn = volume tampungan berdasarkan kebutuhan air (m^3), Vu = volume tampungan hidup untuk melayani berbagai kebutuhan air (m^3), Ve = jumlah penguapan dari kolam selama musim kemarau (m^3), Vi = jumlah resapan melalui dasar dinding dan tubuh embung selama musim kemarau (m^3), Vs = ruang yang disediakan untuk sedimen (m^3), K = faktor yang nilainya dari sifat lolos material dasar dan dinding kolam embung atau waduk, nilai K = 10 % bila dasar dan dinding kolam embung rapat air (k<10 ^5 cm/dt), nilai K 25% bila dasar dan dinding kolam embung semi lolos air (k = 10 ^-3 sampai 10 ^-4 cm/dt).

6. METODE PENELITIAN

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain, pengumpulan data-data primer dan sekunder (data ketersediaan air dan kebutuhan air), melakukan analisis teknis dan analisis lingkungan. Data-data primer dan sekunder yang telah didapat, langkah berikutnya melakukan analisis teknis. Analisis teknis antara lain menghitung: curah hujan rerata daerah (metode Poligon Thiessen), analisis suhu, evapotranspirasi potensial (ETo) (metode *Thornthwaite*), analisis debit (metode FJ. Mock). Perhitungan curah hujan andalan dan curah hujan efektif sebagai salah satu dasar perhitungan kebutuhan air. Kebutuhan air non irigasi berdasarkan (proyeksi penduduk, kebutuhan air domestik). Setelah ketersediaan air diperoleh dari perhitungan FJ. Mock, maka sebelum melanjutkan perhitungan perlu dikalibrasi dengan debit Kali Lamong kondisi nyata (AWLR). Selisih antara ketersediaan air dengan kebutuhanan air menggambarkan kondisi ketersediaan air pada wilayah penelitian. Jika selisih antara keduanya bernilai positif, maka kondisi ketersediaan air surplus, dan sebaliknya. Dari hasil dasar tersebut dilakukan analisis konservasi sumber daya air (upaya konservasi vegetatif dan mekanik) yang bertujuan menjaga dan melestarikan keberadaan air pada suatu DAS. Analisis konservasi sumber daya air meliputi analisis metode vegetasi dan analisis metode mekanis. Analisis metode vegetasi didasarkan pada luas lahan vegetasi dan potensi sebaran vegetasi. Metode penelitian ini akan disajikan pada diagram alir seperti pada gambar



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

7. PEMBAHASAN

1. Curah hujan rerata dan suhu

Curah hujan rerata yang didapatkan sebesar 158 mm. Stasiun klimatologi Karangploso menjadi acuan dalam menentukan perbedaan suhu dengan ketinggian 575 m diatas permukaan laut (dpl) dan Ketinggian stasiun hujan Lamongan 7,70 m diatas permukaan laut (dpl). Sehingga didapatkan perbedaan suhu sebesar 3,4°C.

2. Evapotranspirasi Potensial

Dalam penelitian ini untuk menghitung evapotranspirasi potensial menggunakan metode *Thornthwaite*, dimana nilai evapotranspirasi potensial dipengaruhi oleh temperature udara, intensitas penyinaran matahari dan letak koordinat. Metode ini mengusulkan perhitungan evapotranspirasi potensial dari data suhu udara rata-rata bulanan, standar bulan 30 hari dan jam penyinarannya adalah 12 jam.

ET = 1,62 × (10. i tm) a = 1749 mm

3. Analisis Debit FJ Mock

Diambil data pada bulan Januari tahun 2021 dengan menggunakan metode FJ. Mock sebagai berikut:

Tabel 1. Data bulan Januari menggunakan metode FJ

No	Jenis Data	Nilai	Satuan
1	Luas sub DAS	16.100	km^2
2	Curah Hujan (P)	158,4	mm
3	Jumlah hari hujan (h)	19	hari
4	Koefisien infiltrasi (if)	0,40	
5	Permukaan lahan terbuka (m)	50	%
6	Faktor resesi aliran air tanah (RC)	0,60	
7	Tampungan air tanah permulaan	167	

4. Menghitung *Surface Run Off* (limpasan permukaan)

Limpasan permukaan atau *surface run off* adalah aliran air yang mengalir di atas permukaan tanah. Fenomena ini

am tanah ini kemudian mengalir mencari jalan terendah, biasanya menuju sungai, danau, atau laut. Analisanya adalah sebagai berikut:

Q = 0,278. C.I.A

Q = 0,278 x 0,80 x 5 x 3,54 = 3,39 m^3/detik

5. Analisis Keseimbangan Air / *Water Balance* (Neraca air)

Menghitung Ketersediaan air setiap bulannya, misal pada bulan Januari tahun 2023.
Ketersediaan air = 134.899.167.411 m³/dt
Jumlah = 31 hari
Qketersediaan = 134.899.167.411 m³/dt x 31 hari x (24x3600) dt/air = 3.61313930,0 m³

Tabel 2. Keseimbangan Air

Bulan	Total Hari	Total kesediaan air (m^3)	Kebutuhan Air	
			Domestik	Non Domestik
			m^3/hari	m^3/hari
Jan	31	3.61313930,0	6.130.825.995,81	2.578.871.698,1145
Feb	29	1.04781040,0	5.375.288.834,79	2.580.879.975,6555
Mar	31	3.61313930,0	6.130.825.995,81	2.578.871.698,1145
Apr	30	1.0839417,0	5.933.057.415,3	2.669.875.836,885
Mei	31	3.61313930,0	6.130.825.995,81	2.578.871.698,1145
Juni	30	1.0839417,0	5.933.057.415,3	2.669.875.836,885
Juli	31	3.61313930,0	6.130.825.995,81	2.578.871.698,1145
Agust	31	3.61313930,0	6.130.825.995,81	2.578.871.698,1145
Sept	30	1.0839417,0	5.933.057.415,3	2.669.875.836,885
Okto	31	3.61313930,0	6.130.825.995,81	2.578.871.698,1145
Nov	30	1.0839417,0	5.933.057.415,3	2.669.875.836,885
Des	31	3.61313930,0	6.130.825.995,81	2.578.871.698,1145

6. **Analisis Konservasi Sumber Daya Air**

Untuk mengatasi defisit air, maka metode konservasi sumber daya air yang dapat dilakukan dengan metode sebagai berikut:

Metode Vegetatif

Berdasarkan jenis tanah dan kedalaman efektif akar tanaman. Nilai kelengasan tanah didapatkan nilai sebagai berikut:

Tabel 3. Simpanan lengas tanah

No	Jenis Tanaman	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	Kapasitas simpanan air (mm/m)	Simpanan lengas tanah (mm)
1	Bambu Ater	Lempung berpasir (aluvial)	2,00	125,00	250,00
2	Pohon Gaharu	Lempung berpasir (aluvial)	1,70	125,00	212,50

Defisit yang dapat diatasi dengan pohon gaharu pada tahun 2023 yaitu:
Luas lahan x simpanan lengas tanah = 3540 x 212,50 m = 752.250 m³
Maka, untuk mengatasi defisit air pada tahun 2021 dengan menggunakan pohon gaharu yang ditananam di lahan semak belukar dengan luas 752.250 m³ menyisakan defisit sebesar 3982 m³. Sisa defisit ini nanti akan diatasi dengan penanaman bambu.

Metode Mekanis

Dalam merencanakan diperlukan untuk menghitung beberapa komponen berikut :
- Curah hujan rerata (P) = 158,4 mm
- Luas area tangkapan waduk (A) = 3,54 km /354.0000 mm
- Koefisien *run off* (C) = 0,80 mm
- Defisit air = 199,1 - 158,4 = 40,7 mm

7. KESIMPULAN

Defisit air terhadap kebutuhan domestik dan non domestik di Sub DAS Kali Lamong terjadi selama 5 bulan (bulan kering), yaitu bulan Juli sampai November. Defisit air di Sub DAS Kali Lamong pada tahun 2023 sebesar 3982 m³ dan tahun 2024 sebesar 8815 m³. Untuk mengatasi defisit air tersebut dilakukan upaya konservasi dengan 2 (dua)

mekanis antara lain: pemanen air hujan dengan pembangunan waduk/ embung. Luas lahan vegetasi yang dibutuhkan untuk menangani masalah defisit tersebut sampai tahun 2023 antara lain: pohon gaharu seluas 752.250 m^2. Besar debit andalan tahun 2024 adalah 286.764.441,7395 (L/jiwa/Hari). Sementara itu, jumlah ketersediaan airnya adalah 134.889.167,441 (mm/hari) maka total keseimbangan airnya adalah 134.612.402.969,6 L/hari.

DAFTAR PUSTAKA

Ak., Harnovinsah, Dr., 2018, Metodologi Penelitian, Universitas Mercu Buana.

Amirullah, A., Saleh, S. M., & Anggraini, R. (2017). Analisis Kelayakan Ekonomi Pembangunan Jalan Krueng Mane-Buketrata dengan Consumer Surplus. Jurnal Teknik Sipil, 1(2), 305-316.

Anonim. (2010). Peraturan PemerintahRepublik Indonesia Nomor 37

Ardana, Y., & Syamsiyah, N. (2023). Perekonomian Indonesia. Penerbit NEM.

Asdak, Chay. 2014. Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.

Azmeri, A., Legowo, S., & Kridasantausa, I. (2004). Analisis Ketersediaan Air dan Sistem Operasi dengan Metode Dinamik Deterministik (Studi Kasus Waduk Sukawana–Sungai Cimahi). Jurnal Teknik Sipil ITB, 11(3), 135-148.

Bambang Triatmodjo,2008. "Hidrologi Terapan". Yogyakarta : Beta Offset

Deismaya, N. R. (2023). Laporan Pkm-Evaluasi Instalasi Pengolahan Air (Ipa) Bersih Perumnas Perumdam Tirta Kerta Raharja Kabupaten Tangerang.

Limantara, I. L. M. (2019). Rekayasa Hidrologi: Edisi Revisi. Penerbit Andi.

Paul, J.O., 1984, "System Analysis for Civil Engineering", University of New Humpshire, Durham-New Hampshire.

Prastiwi, A., & Utomo, C. (2013). Analisa Investasi Perumahan Green Semanggi Mangrove Surabaya. Jurnal Teknik ITS, 2(2), D191-D196.

Sosrodarsono S., Takeda K., 2003, Hidrologi Untuk Pengairan, PT Paradnya Paramita, Jakarta.

Wulandari, T., Noerhayati, E., & Rachmawati, A. (2020). Evaluasi Kebutuhan Air Irigasi dan Pola Operasi Embung Malangsuko Tumpang Kabupaten Malang. Jurnal RekayasaSipil,8(1),63-71.(https://jim.unisma.ac.id/index.php/ft/article/view/5625)

DETEKSI BANJIR PADA DAERAH ALIRAN SUNGAI SERAYU MENGGUNAKAN MODEL HIDROLOGI SWAT (*SOIL WATER ASSESSMENT TOOL*) BERDASARKAN DATA CURAH HUJAN SATELIT PERSIANN

FLOOD DETECTION IN THE SERAYU WATERSHED USING THE SWAT HYDROLOGICAL MODEL BASED ON PERSIANN SATELLITE RAINFALL DATA

Bintang Aqshal Danendra Indrastata*[1], Suroso[2], dan Ardiansyah[3]

[1]Jurusan Teknik Sipil, Universitas Jenderal Soedirman
[2]Jurusan Teknik Sipil, Universitas Jenderal Soedirman
[3]JurusanTeknik Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman

ABSTRAK

Banjir menimbulkan ancaman besar bagi masyarakat yang masih tinggal di daerah aliran sungai, sehingga memerlukan strategi deteksi dan mitigasi yang efektif. Penelitian ini berfokus pada deteksi banjir di DAS Serayu dengan menggunakan pendekatan terpadu yang menggabungkan model hidrologi Soil and Water Assessment Tool (SWAT) dengan data curah hujan satelit PERSIANN. Pemanfaatan data curah hujan yang diperoleh dari satelit menawarkan peningkatan resolusi spasial dan temporal, sehingga meningkatkan akurasi sistem deteksi banjir. Melalui penerapan model SWAT, studi ini memfasilitasi analisis komprehensif proses hidrologi di dalam DAS, sehingga memungkinkan identifikasi wilayah rawan banjir dan penilaian potensi dampak banjir. Dengan mengintegrasikan teknologi canggih dan teknik pemodelan yang sudah ada, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan strategi pengelolaan banjir yang kuat dan disesuaikan dengan konteks DAS Serayu. Temuan penelitian ini memberikan wawasan berharga bagi para pengambil keputusan dan pemangku kepentingan yang terlibat dalam upaya kesiapsiagaan dan tanggap bencana, yang pada akhirnya meningkatkan ketahanan masyarakat yang rentan terhadap bahaya banjir.

Kata kunci: Deteksi Banjir, Model Hidrologi SWAT, Data Curah Hujan Satelit PERSIANN, Pengelolaan Daerah Aliran Sungai, Kesiapsiagaan Bencana

1. PENDAHULUAN

Daerah Aliran Sungai Serayu adalah salah satu wilayah hidrologis yang memiliki banyak peran penting dalam kehidupan. Secara ekonomi, Sungai Serayu menjadi sumber daya utama bagi masyarakat sekitarnya. Sungai serayu digunakan oleh petani sebagai salah satu sumber pengairan bagi pertanian. Bagi nelayan, Sungai Serayu merupakan tempat utama untuk mendapatkan ikan. Pariwisata pada Sungai Serayu juga dimanfaatkan oleh masyarakat lokal untuk menarik wisatawan dari luar daerah. Secara sosial, wilayah Daerah Aliran Sungai Serayu memiliki peran dalam memperkuat identitas budaya dan kehidupan masyarakat lokal. Sungai Serayu memberikan inspirasi bagi seni, musik, dan tradisi lokal lainnya.

Daerah Aliran Sungai Serayu memiliki luas sebesar 3.660 km². Daerah Aliran Sungai Serayu melintasi sebagian besar wilayah Provinsi Jawa Tengah Bagian Selatan. Beberapa kabupaten yang dilintasi oleh DAS Serayu adalah Kabupaten Cilacap, Banyumas, Purbalingga, Banjarnegara dan Wonosobo (Purnama, 2010). Wilayah ini meliputi berbagai karakteristik topografi, mulai dari dataran rendah hingga dataran tinggi. Sepanjang Daerah Aliran Sungai Serayu terdapat berbagai lingkungan yang memiliki pemandangan alam yang indah. Hutan dan bukit sepanjang Sungai Serayu menjadi pemandangan utama yang menghiasi aliran Sungai Serayu. Wilayan aliran Sungai Serayu juga menyimpan keanekaragaman hayati dengan berbagai jenis hewan dan tumbuhan yang hidup di sekitar Sungai Serayu.

Salah satu fenomena alam yang biasa terjadi pada sungai-sungai di Indonesia. Terjadinya banjir tidak memandang daerah baik perkotaan maupun pedesaan (Irawan and Zulkifli Mulki, 2016). Daerah Aliran Sungai Serayu merupakan salah satu daerah yang rentan terhadap bencana banjir. Perubahan tata guna lahan yang tidak terkendali menyebabkan berkurangnya daerah resapan air sehingga dapat menyebabkan banjir (Hernanda *et al.*, 2016). Peningkatan jumlah penduduk di sekitar Daerah Aliran Sungai Serayu menjadi faktor utama terjadinya peningkatan risiko banjir. Pertambahan jumlah penduduk di sekitar Sungai Serayu membuat berubahnya tata guna lahan disekitar. Kebutuhan akan perumahan, jalan raya, dan infrastruktur lainnya membuat tata guna lahan berubah. Berkurangnya area hutan dan sawah pada daerah sekitar Sungai Serayu menimbulkan kurangnya peresapan air hujan. Contoh nyata pada Daerah Aliran Sungai Serayu yang mengalami banjir terdapat pada kawasan Dieng. Degradasi lahan dan erosi sekitar 161 ton/ha/tahun merupakan kerusakan yang dialami pada Kawasan Dieng. Hal itu membuat sedimentasi di Waduk Jenderal Soedirman yang bisa menyebabkan krisis energi (Jariyah and Pramono, 2013). Banjir pada Daerah

Aliran Sungai Serayu menimbulkan kerugian harta benda hingga korban jiwa. Kerusakan ekosistem di sekitar Sungai Serayu tidak bisa dihindarkan.

Deteksi banjir di Daerah Aliran Sungai Serayu merupakan aspek yang penting dalam upaya mitigasi bencana dan manajemen banjir. Perlunya kesiapan masyarakat yang tinggal di sekitar Sungai Serayu ketika terjadi banjir akan meminimalisir dampak kerugian akibat banjir. Salah satu upaya yang digunakan untuk mendeteksi banjir yaitu dengan inovasi teknologi. Informasi deteksi air yang meningkat perlu diketahui oleh masyarakat agar mereka bisa siap setiap saat akan terjadi banjir. Tujuan dari sistem tersebut yaitu untuk memberikan peringatan lebih awal kepada masyarakat agar bisa mengetahui potensi banjir yang akan terjadi (Windiastik, Ardhana and Triono, 2019). Penggunaan sensor hidrologi menjadi salah satu hal penting dalam deteksi banjir pada Daerah Aliran Sungai Serayu. Sensor hidrologi yang terpasang di sepanjang Sungai Serayu dapat memberikan data secara langsung mengenai tingkat air, debit air, dan kondisi hidrologi lainnya yang bisa digunakan sebagai pendeteksi akan adanya banjir.

Perlu dilakukan deteksi banjir pada Daerah Aliran Sungai Serayu dengan menggunakan Model SWAT. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) merupakan sebuah model skala wilayah sungai atau daerah aliran sungai yang dikembangkan oleh Dr. Jeff Arnold. SWAT dikembangkan untuk memprediksi dampak dari pengelolaan lahan terhadap air, sedimen, dan hasil bahan kimia pertanian di daerah aliran sungai besar dan kompleks dengan kondisi tanah, penggunaan lahan, dan pengelolaan yang bervariasi dalam jangka waktu yang lama (Neitsch *et al.*, 2005).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Daerah aliran sungai serayu

Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu daerah yang dibatasi oleh struktur topografi pemisah air yang terkeringkan oleh sungai atau sistem yang saling terhubung sehingga semua aliran yang terdapat di dalamnya akan mengalir keluar melalui satu saluran tunggal dari area tersebut (Sudaryono, 2002) Sungai serayu merupakan salah satu sungai yang berada di Provinsi Jawa Tengah. Sungai Serayu melintasi lima (5) kabupaten yang ada di jawa tengah, yaitu : Kabupaten Wonosobo, Banjarnegara, Purbalingga, Banyumas dan Cilacap. Hulu Sungai Serayu berada di wilayah Dieng dan mengalir menuju hilir yang berada di Samudra Hindia sepanjang 181 km. Sungai Serayu merupakan aliran utama pada Daerah Aliran Sungai Serayu yang memiliki luas sebesar 3.660 km². Daerah Aliran Sungai Serayu diatur dan dikelola oleh Balai Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Serayu Opak Progo.

Banjir

Banjir merupakan salah satu masalah umum yang terdapat di Indonesia ketika terjadinya musim penghujan. Menurut Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Jawa Timur menjelaskan banjir merupakan suatu peristiwa meluapnya air hingga ke daratan yang biasanya kering dikarenakan curah hujan yang tinggi, salju yang meleleh, atau masalah lain sehingga air tidak dapat diserap sempurna oleh tanah atau tidak dapat dialirkan melalui saluran yang ada.

Sistem informasi geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan salah satu sistem yang berkembang pesat dalam lima (5) tahun ini. Sistem Informasi Geografis (SIG) adalah suatu sistem informasi dengan basis komputer yang bisa difungsikan sebagai penyimpan, pengelola, dan analisis data bereferensi geografis. Sistem Informasi Geografis (SIG) memungkinkan melakukan integrasi informasi spasial seperti peta, satelit, dan data geografis lainnya. Sistem Informasi Geografis (SIG) memberikan kemudahan untuk pengguna dalam menentukan kebijakan yang berkaitan dengan geografis. Penataan dan pemetaan lahan akan dipermudah dengan adanya teknologi ini (Wibowo, Kenedi and Jumadi, 2015)

Model hidrologi

Model Hidrologi merupakan suatu gambaran Daerah Aliran Sungai (DAS) sederhana yang digunakan untuk memprediksi suatu kejadian hidrologi yang kemungkinan akan terjadi (Marlina and Andayani, 2018). Kemampuan model Hidrologi bervariasi, mulai dari perhitungan debit limpasan permukaan, aliran air tanah, hidrograf debit sungai, hingga erosi permukaan. Model Hidrologi DAS merupakan model inti dari seluruh model tersebut. Model ini mempunyai fungsi untuk menghitung debit sungai akibat adanya hujan (Kustamar and Yulianti, 2009).

a. Model Stokastik

Model Stokastik adalah representasi matematika yang dapat menerima berbagai variabel, diantaranya variabel acak yang memiliki distribusi acak. Model ini sering digunakan untuk mengevaluasi karakteristik statistik fisik output dari suatu sistem yang dipengaruhi oleh urutan peristiwa seiring waktu dan menghasilkan serangkaian data dalam jangka panjang dengan sifat yang serupa. Data tersebut dapat dianalisis untuk mendapatkan gambaran tentang kemungkinan urutan peristiwa di masa depan, seperti harapan frekuensi debit air (Harsoyo, 2010)

b. Model Probabilitas

Dalam model probabilitas, gagasan tentang frekuensi dan probabilitas memiliki peran yang signifikan, sama halnya dengan yang terjadi dalam model stokastik. Namun, dalam model ini, urutan kejadian tidak dipertimbangkan. Sebagai contoh, kejadian dianggap tidak tergantung pada waktu dan perkiraan dilakukan terhadap kejadian paling ekstrim berdasarkan karakteristik dari data yang ada dalam populasi (Harsoyo, 2010)

c. Model Konseptual

Model Konseptual merupakan hasil dari keadaan yang lebih sederhana terhadap kondisi nyata, seperti penyederhanaan proses dalam Daerah Aliran Sungai (DAS). Pendekatan yang digunakan dalam model ini meliputi: (1) pendekatan model rasional, (2) pendekatan linear dan non-linear terhadap reservoir, dan (3) kombinasi dari model rasional dan pendekatan reservoir (Harsoyo, 2010)

d. Model Parametrik

Umumnya, model parametrik digunakan untuk menghasilkan ekspresi matematis yang menunjukkan fungsi dari Daerah Aliran Sungai (DAS) yang akan diubah menjadi model input dan output (black box models). Selanjutnya, model tersebut menjadi lebih kompleks ketika parameter-parameter penting DAS ditambahkan, yang kemudian menyebabkan variasi respon yang berbeda dari DAS lainnya dengan input yang sama. Model parametrik membantu dalam memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme kerja sistem tersebut (Harsoyo, 2010)

e. Model Deterministik

Model Deterministik adalah representasi matematika yang hanya menerima variabel yang bebas dari variasi acak. Model ini berdasarkan struktur asli dari sistem dan prinsip fisika yang mengatur perilaku sistem tersebut. Terkait dengan variabel dan parameter input atau output, model deterministik dapat dibagi menjadi dua bentuk, yaitu lumped dan terdistribusi. Variabel atau parameter diklasifikasikan sebagai lumped jika besaran yang direpresentasikan tidak memiliki variasi spasial, seperti contohnya curah hujan rata-rata di suatu Daerah Aliran Sungai (DAS). Sebaliknya, variabel dan parameter yang terdistribusi mengandung variasi spasial dan temporal. Parameter merupakan besaran yang menggambarkan sistem hidrologi dengan nilai tetap, tidak bergantung pada waktu. Sedangkan variabel adalah besaran yang menggambarkan sistem yang dapat diukur dan memiliki nilai yang berbeda pada waktu yang berbeda (Harsoyo, 2010).

Analisis sensitivitas

Analisis Sensitivitas kalibrasi merujuk pada kemampuan untuk mengamati dampak yang timbul selama proses kalibrasi karena perubahan nilai parameter tersebut. Dengan demikian, pada saat proses kalibrasi, terdapat parameter yang memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi, sehingga perubahan nilai parameter tersebut dapat mengakibatkan perubahan volume yang signifikan (Prayudi, Handayani and Sujatmoko, 2017).

Model swat

SWAT merupakan model yang diperkenalkan oleh Dr. Jeff Arnold pada awal dekade 1990-an untuk keperluan pengembangan Agricultural Research Service (ARS) dari Departemen Pertanian Amerika Serikat (USDA). Tujuan utama pengembangan model ini adalah untuk meramalkan dampak dari manajemen lahan pertanian terhadap fenomena seperti aliran air, sedimentasi, dan jumlah bahan kimia yang masuk ke dalam suatu DAS yang kompleks. Model ini mempertimbangkan berbagai variasi dalam jenis tanah, penggunaan lahan, serta praktik manajemen di suatu DAS setelah melalui periode waktu yang panjang. SWAT mampu digunakan dalam berbagai analisis dan simulasi di dalam suatu DAS. Data masukan dari setiap sub-DAS kemudian dikelompokkan atau diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori seperti iklim, unit respon hidrologi (HRU), badan air, air tanah, dan saluran utama hingga mencapai sistem drainase di sub-DAS tersebut. Unit respon hidrologi di setiap sub-DAS terdiri dari variasi dalam penutupan lahan, jenis tanah, dan praktik manajemen yang diterapkan (Neitsch *et al.*, 2005).

Data curah hujan

Hujan merupakan salah satu fenomena yang dipengaruhi oleh iklim. Parameter iklim tersebut meliputi udara, kelembapan, suhu, dan arah angin. Untuk menghitung atau mencatat hujan dalam satu sesi sangat sulit dilakukan, sehingga meramal dan menambah data pencatatan hujan perlu dilakukan. Curah hujan adalah jumlah air hujan yang terakumulasi dalam suatu tempat yang datar, tidak menguap, tidak meresap, dan tidak mengalir. Curah hujan memiliki satuan milimeter (mm) atau inchi (inch). Di Indonesia curah hujan dinyatakan dalam satuan (mm) milimeter (Zakaria, Welly and Cambodia, 2015).

Satelit PERSIANN

Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN) untuk estimasi curah hujan yang sedang dikembangkan di Universitas Arizona mengalami penyempurnaan secara

berkala. Algoritma dasar didasarkan pada jaringan saraf dan oleh karena itu dapat dengan mudah diadaptasi untuk memasukkan informasi yang relevan ketika tersedia. Fitur pelatihan adaptif memfasilitasi pembaruan cepat parameter jaringan setiap kali tersedia perkiraan curah hujan independen (Vernimmen *et al.*, 2012). PERSIANN dikembangkan dengan jaringan tiruan yang memperkirakan laju hujan dari data IR, dengan penyesuaian dalam parameter jaringan berdasarkan turunan MW dan laju hujan di lapangan jika tersedia. Rentang waktu data PERSIANN yaitu dari tahun 2000 hingga sekarang (Gustoro, Sujono and Karlina, 2022).

3. METODE PENELITIAN

Lokasi Penilitian

Penelitian ini dilakukan pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Serayu. Daerah Aliran Sungai (DAS) Serayu melewati beberapa kabupaten di Jawa Tengah yaitu Kabupaten Wonosobo, Kabupaten Banjarnegara, Kabupaten Purbalingga, Kabupaten Banyumas, dan Kabupaten Cilacap. Setiap tahun, Sungai Serayu selalu menyebabkan banjir, terutama pada wilayah Banyumas dan Cilacap. Daerah ini setiap tahun mengalami banjir sehingga menyebabkan kerugian dalam jumlah puluhan miliar rupiah karena kerusakan infrastruktur seperti rumah penduduk, lahan pertanian, jalan, jembatan, dan fasilitas umum lainnya. Tingginya curah hujan juga merupakan salah satu penyebab terjadinya aliran permukaan yang besar (Hernanda *et al.*, 2016).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Pengumpulan Data

Data utama yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data geospasial dan data hidrologis, data-data tersebut termasuk data sekunder. Data yang diperoleh berasal dari lembaga pemerintah dan non-pemerintah, dengan penggunaan metode kuantitatif yang melibatkan analisis. Penelitian ini memuat tiga variabel, yakni variabel kontrol, variabel terikat, dan variabel bebas. Data tanah, data curah hujan, data Digital Elevation Model (DEM), data tata guna lahan, data debit sungai, serta data pola aliran sungai dianggap sebagai variabel kontrol.

a. Data Geospasial DAS

Data Geospasial DAS Serayu adalah kumpulan informasi geografis yang berkaitan dengan Daerah Aliran Sungai (DAS) Serayu. Data ini meliputi berbagai jenis informasi spasial seperti peta, citra satelit, data hidrologi, data curah hujan, data sungai, data tata guna lahan, dan informasi lainnya yang relevan dengan karakteristik fisik, topografi, dan hidrologi DAS Serayu. Data Geospasial DAS Serayu digunakan untuk pemodelan hidrologi, analisis lingkungan, perencanaan tata guna lahan, manajemen sumber daya air, dan berbagai kegiatan lainnya yang terkait dengan pengelolaan DAS Serayu.

b. Data Hujan

Data hujan dapat diperoleh dari Balai PSDA. Data tersebut akan digunakan sebagai data masukan curah hujan pada model SWAT, kalibrasi model, verifikasi model, dan input program R Studio.

c. Data Tata Guna Lahan

Data tata guna lahan didapat dari Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2019 (*www.geoportal.menlhk.go.id*). Peta tata guna lahan yang telah diperoleh dipotong menggunakan teknik Clip pada perangkat lunak QGIS sesuai dengan wilayah penelitian, kemudian peta tersebut diubah proyeksinya ke UTM WGS 84 29S. Peta tata guna lahan yang sudah diubah proyeksinya kemudian disesuaikan kembali dengan kondisi lahan pada tahun 2020 melalui proses digitasi manual dengan referensi citra satelit Spot 6 yang diperoleh dari Balai Penginderaan Jauh LAPAN.

d. Data Tanah

Peta tanah diperoleh dari Pusat Sumber Daya Lahan Pertanian, selanjutnya diolah untuk diintegrasikan ke dalam model SWAT. Setiap data Jenis Profil Tanah (SPT) yang ada pada peta tanah disusun menurut kuantitasnya dan disusun secara horizontal. Peta tanah dalam bentuk shapefile diimpor ke ArcMap 10.4 menggunakan tool Add Data. Setelah menyiapkan data untuk integrasi, alat Gabung digunakan untuk menghubungkan data SPT dengan lapisan yang ditentukan. Selanjutnya peta tanah tersebut dipotong ke daerah penelitian menggunakan fungsi Clip di ArcMap 10.4, dan kemudian diubah menjadi proyeksi UTM WGS 84 29S. Terakhir, data peta tanah dalam format Excel diubah menjadi file CSV untuk dianalisis lebih lanjut.

e. Data Curah Hujan Penginderaan Jarak Jauh

Data curah hujan penginderaan jauh diperoleh dari satelit GPCC (Global Precipitation Climate Centre). Satelit GPCC berfungsi sebagai pusat pusat yang bertanggung jawab untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menyebarkan data curah hujan global. Ini memanfaatkan beragam sumber data, yang mencakup citra satelit, stasiun cuaca, dan model iklim, untuk melakukan analisis curah hujan global. Data ini digunakan sebagai masukan bagi program RStudio untuk mengembangkan skenario perubahan iklim dengan menggunakan pendekatan scenario-neutral.

Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian yang dilakukan yaitu:

a. Kajian Literatur

Tahap kajian literatur dalam penelitian DAS (Daerah Aliran Sungai) Serayu akan melibatkan pencarian, pengumpulan, dan analisis berbagai sumber literatur yang relevan dengan topik penelitian tersebut. Tahap ini merupakan langkah awal yang penting dalam proses penelitian, karena akan membantu peneliti memahami konteks, teori, metodologi, dan temuan terdahulu yang berkaitan dengan DAS Serayu.

b. Pembuatan Model Peta pada ArcGIS

Langkah-langkah simulasi dalam perangkat lunak SWAT (Soil and Water Assessment Tool) dimulai dengan pengaturan parameter model yang mencakup data hidrologis, topografi, tanah, penggunaan lahan, dan iklim. Selanjutnya, data curah hujan, suhu udara, dan lainnya yang diperlukan dimasukkan ke dalam model sesuai dengan periode waktu yang ditentukan. Proses ini diikuti dengan pengujian model untuk memastikan parameter yang tepat telah dipilih dan untuk mengidentifikasi kemungkinan masalah dalam simulasi. Setelah pengaturan awal selesai, model dijalankan untuk mensimulasikan aliran air, erosi tanah, dan pergerakan nutrien dalam Daerah Aliran Sungai (DAS).

c. Pemodelan SWAT

Setelah dilakukan kajian literatur dan olah data, selanjutnya dilakukan Pemodelan SWAT yang terdiri dari beberapa tahap sebagai berikut :

1) Deliniasi DAS

Dalam perangkat lunak SWAT, delineasi DAS (Daerah Aliran Sungai) dimulai dengan pembangunan struktur layer hidrologi dasar seperti digitasi batas DAS, sungai, dan kontur topografi. Data topografi seperti Digital Elevation Model (DEM) diimpor dan diproses untuk mengekstrak arah aliran air, yang kemudian digunakan untuk membentuk jaringan sungai. DAS kemudian didefinisikan dengan mengidentifikasi sel-sel yang mengalir ke titik outlet yang ditetapkan. Titik outlet ini seringkali dipilih berdasarkan lokasi muara sungai utama atau tempat di mana aliran air meninggalkan DAS. Setelah delineasi selesai, verifikasi dan koreksi terus-menerus dilakukan untuk memastikan akurasi delineasi yang optimal, memungkinkan penggunaan model SWAT untuk analisis hidrologi yang tepat dan andal.

2) Pembentukan HRU

Langkah-langkah pembentukan Hydrological Response Unit (HRU) dalam perangkat lunak SWAT dimulai dengan pengidentifikasi dan pemahaman terhadap karakteristik fisik, hidrologis, dan penggunaan lahan di wilayah studi. Selanjutnya, wilayah studi dibagi menjadi unit-unit yang homogen, biasanya berdasarkan pada faktor-faktor seperti jenis tanah, tipe vegetasi, topografi, dan pola penggunaan lahan. Setiap HRU kemudian diberi atribut yang mencakup parameter-parameter hidrologis dan tanah yang relevan, seperti infiltrasi, retensi air, dan kemampuan erosi. Proses ini memungkinkan model SWAT untuk merepresentasikan interaksi kompleks antara air, tanah, dan vegetasi di dalam suatu wilayah dengan lebih akurat. Dengan HRU sebagai unit dasar, model dapat memberikan simulasi yang lebih detail dan tepat terkait dengan aliran air, erosi, dan kualitas air di dalam DAS yang diteliti.

3) Simulasi SWAT

Langkah-langkah simulasi dalam perangkat lunak SWAT (Soil and Water Assessment Tool) dimulai dengan pengaturan parameter model yang mencakup data hidrologis, topografi, tanah, penggunaan lahan, dan iklim. Selanjutnya, data curah hujan, suhu udara, dan lainnya yang diperlukan dimasukkan ke dalam model sesuai dengan periode waktu yang ditentukan. Proses ini diikuti dengan pengujian model untuk memastikan parameter yang tepat telah dipilih dan untuk mengidentifikasi kemungkinan masalah dalam simulasi. Setelah pengaturan awal selesai, model dijalankan untuk mensimulasikan aliran air, erosi tanah, dan pergerakan nutrien dalam Daerah Aliran Sungai (DAS).

4) Kalibrasi dan Validasi

Kalibrasi adalah proses optimalisasi nilai parameter untuk meningkatkan koherensi antara respons hidrologi DAS yang teramati dan tersimulasi (Bloschl and Grayson, 200AD). Sebuah model dapat dikatakan baik ketika data hasil simulasinya mendekati atau sama dengan data observasinya. Dengan demikian, pada saat proses kalibrasi, terdapat parameter yang memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi, sehingga perubahan nilai parameter tersebut dapat mengakibatkan perubahan volume yang signifikan (Prayudi, Handayani and Sujatmoko, 2017).

Validasi adalah suatu tindakan penilaian terhadap parameter tertentu, berdasarkan percobaan laboratorium, untuk membuktikan bahwa parameter tersebut memenuhi persyaratan untuk penggunaannya atau bisa dimaksud dengan proses pembuktian dari suatu model, apakah model tersebut dikatan layak untuk dipakai atau tidak. Proses validasi pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan data debit aliran simulasi dengan data observasi dan data kadar air tanah simulasi dengan data kadar air tanah observasi.

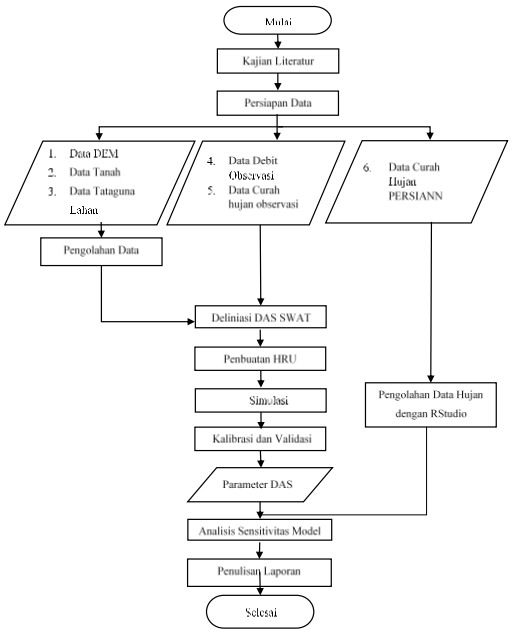
a. Uji Sensitivitas dan Analisis Model

Tujuan dari tahapan ini yaitu untuk menganalisis dan menentukan debit andalan dari hasil permodelan. Debit andalan adalah jumlah air yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan dengan mempertimbangkan tingkat risiko kekurangan. Debit andalan yang menjadi fokus penelitian ini adalah debit yang memiliki probabilitas sekitar 80% dari total 100% di dalam Daerah Aliran Sungai (DAS). Untuk menganalisis probabilitas ini, diperlukan setidaknya data selama lima tahun. Biasanya, untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat, digunakan data selama sepuluh tahun. Sensitivitas parameter kalibrasi merujuk pada kemampuan untuk mengamati dampak yang timbul selama proses kalibrasi karena perubahan nilai parameter tersebut. Analisis sensitivitas ini dilakukan menggunakan software SWAT+ Toolbox.

b. Penulisan Laporan

Setelah dilakukan analisis dan pengolahan data, kemudian hasil dari penelitian yang sudah dilakukan disusuh untuk menjadi laporan tugas akhir yang akan menghasilkan informasi dan hasil dari penelitian ini.

Bagan Alir Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan Peta Lokasi

Tahap yang pertama dilakukan dalam penelitian ini adalah pembuatan lokasi DAS Serayu menggunakan software ArcGis guna mendapatkan koordinat yang tepat. Selain itu dilakukan penyesuaian agar mendapatkan basin model untuk permulaan data masukan pada model hidrologi SWAT. Luas DAS Serayu yang diperoleh dari pembuatan peta ini adalah 3.612,64 km².



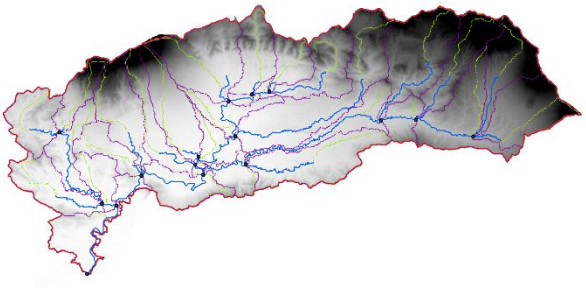
Gambar 3. Peta Lokasi DAS Serayu

Pemodelan Hidrologi pada Model SWAT

Model hidrologi SWAT (Soil and Water Assessment Tool) adalah sebuah model komputer yang digunakan untuk memprediksi dampak dari manajemen lahan dan penggunaan lahan pada kualitas dan kuantitas air dalam suatu daerah aliran sungai yang kompleks dengan penggunaan, kondisi, dan pengelolaan tanah yang bervariasi dalam jangka waktu yang lama. Tahapan yang perlu dilakukan untuk pemodelan hidrologi SWAT ini dimulai dengan deliniasi DAS, pembentukan HRU, penggabungan HRU dengan data iklim. Simulasi model hidrologi SWAT, dan yang terkhir yaitu kalibrasi dan validasi model hidrologi SWAT. Tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut.

a. Deliniasi DAS

Tahap awal dalam pemodelan hidrologi dalam SWAT yaitu Deliniasi DAS. Deliniasi DAS merupakan tahapan yang bertujuan untuk membentuk batasan pada daerah aliran sungai. Data yang dibutuhkan dalam proses ini yaitu data DEM dengan resolusi 90 m dan data pemodelan aliran sungai atau stream. Hasil dari proses deliniasi DAS ini menghasilkan sub-basin, output DAS, batas DAS, jaringan aliran sungai, dan outlet aliran sungai DAS Serayu. Proses deliniasi DAS Serayu menghasilkan data yang dapat dilihat pada Gambar 4.



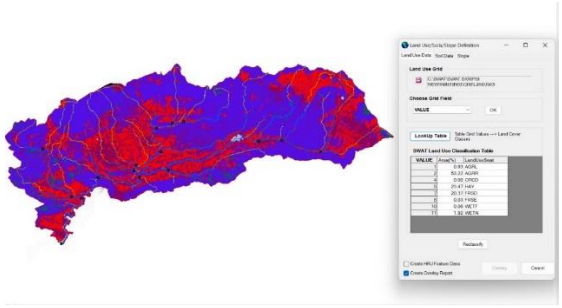
Gambar 4. Hasil Pemodelan Deliniasi DAS Serayu

b. Pembentukan HRU

Tahap selanjutnya dalam pemodelan SWAT merupakan HRU (*Hydrologyca Response Unit)* yang merupakan analisis hidrologi yang terbentuk dari hasil *overlay* dari peta tanah, *Land Use and Land Cover* (LULC), dan peta lereng dengan format sistem koordinat proyeksi UTM, dan *threshold* dari presentasi total LULC 10%, jenis tanah sebesar 5%, dan kemiringan lereng sebesar 5% (Sintanala Arsyad, 2006). Hasil dari pengolahan data LULC pada pemodelan hidrologi SWAT ditampilkan dalam Tabel 1 dan Gambar 5.

Tabel 1 Data LULC DAS Serayu

	Landuse		Luas	
No	*Code*	Keterangan	Km²	Presentase
1	AGRL	*Agricultural Land-Close-grown*	33.60	0.93
2	AGRR	*Agricultural Land-Row Crop*	1922.65	53.22
3	ORCD	*Orchard*	0.00	0.00
4	HAY	*Hay*	847.89	23.47
5	FRSD	*Forest-Deciduous*	735.89	20.37
6	FRSE	*Forest-Evergreen*	1.08	0.03
7	WETF	*Wetlands-Forested*	2.17	0.06
8	WETN	*Wetlands-Non Forested*	69.36	1.92

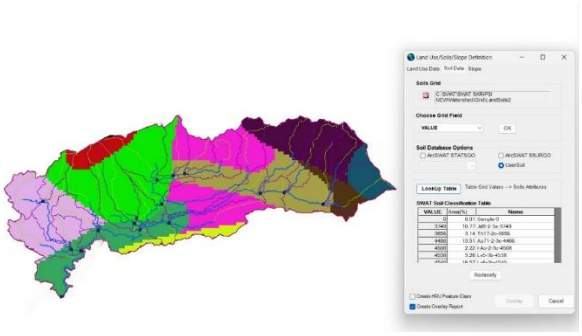


Gambar 5, Hasil Pengolahan Data LULC DAS Serayu

Selanjutnya dilakukan pengolahan tanah dengan data tanah yang didapat pada *Harmonized Soil World Database* (HWSD). Dalam *input* data tanah ini disesuaikan dengan keterangan kode tanah tersebut menggunakan file notepad (.txt). Berikut merupakan hasil dari pengolahan pada model SWAT.

Tanah			Luas	
No	Code	Keterangan	KM²	Presentase
1	Sample-0	LFS-LFS-S	0.41	0.01
2	Jd9-2-3a-3749	LOAM	389.15	10.77
3	Th17-2c-3856	LOAM	113.6	3.14
4	Ao71-2-3c-4466	CLAY_LOAM	488.15	13.51
5	I-Ao-2-3c-4508	SANDY_CLAY_LOAM	80.33	2.22
6	Lv5-3b-4538	CLAY	117.91	3.26
7	Lv6-3b-4540	CLAY	598.49	16.57
8	To24-2c-4575	LOAM	413.83	11.46
9	To25-2b-4576	CLAY_LOAM	755.26	20.9061
10	Tv38-1bc-4580	SANDY_LOAM	131.94	3.65205
11	Vp62-3b-4585	CLAY	523.57	14.4928

Gambar 6. Data Sebaran Tanah DAS Serayu

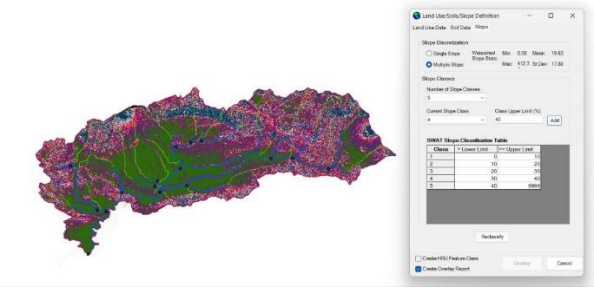


Gambar 7. Pengolahan Data Tanah

Kemiringan lereng merupakan faktor krusial dalam mengatur aliran air di sebuah Daerah Aliran Sungai (DAS) karena mempengaruhi kecepatan dan volume air yang mengalir di permukaan. Berikut merupakan hasil dari pengolahan data kemiringan lereng.

Tabel 2 Hasil Pengolahan Data Kemiringan Lereng DAS Serayu

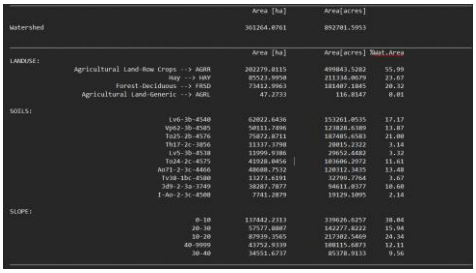
No	Keterangan	Luas	
		Km²	Persentase
1	0-10%	1374.21	38.04%
2	10-20%	875.01	24.22%
3	20-30%	583.50	16.15%
4	30-40%	345.11	9.55%
5	>40%	434.81	12.04%



Gambar 8. Hasil Pengolahan Data Kemiringan Lereng DAS Serayu

Pembagian *Hydrologic Response Units* (HRU) menyesuaikan dengan *threshold* dari persentase total luasan *Land Use and Land Cover* (LULC) sebesar 10%, jenis tanah sebesar 5%, dan kemiringan lereng sebesar 5% (Sintanala Arsyad, 2006). Pada simulasi ini total *Hydrologic Response Units* (HRU) yang dihasilkan yaitu sebesar 568 HRU dan

terdapat beberapa perubahan persentase *Land Use and Land Cover* (LULC), tanah, dan kemiringan lereng seperti yang ditampilkan pada Gambar 9.



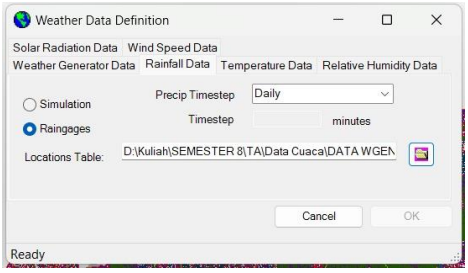
	Area [ha]	Area[acres]	
Watershed	363264.0701	892701.5953	
	Area [ha]	Area[acres]	%wat.Area
LANDUSE:			
Agricultural Land-Row Crops --> AGRR	202279.8115	499841.5282	55.99
Hay --> HAY	85523.9958	211334.8679	23.67
Forest-Deciduous --> FRSD	73412.9963	181407.1845	20.32
Agricultural Land-Generic --> AGRL	47.2733	116.8147	0.01
SOILS:			
Lv6-3b-4540	62022.6436	153261.0535	17.17
Vp62-3b-4585	50111.7496	123828.6389	13.87
Ts25-2b-4576	75872.8711	187485.6583	21.00
Th17-2c-3856	11337.3798	28015.2322	3.14
Lv5-3b-4538	11995.9386	29652.6682	3.32
Ts24-2c-4575	43928.8456	108586.2972	12.41
Ao71-2-3c-4466	48688.7532	120312.3435	13.48
Tv38-1bc-4580	11271.6891	27790.7764	3.07
Sd9-2-3a-3749	38287.7877	94611.8377	10.60
I-Ao-2-3c-4508	7741.2879	19129.1095	2.14
SLOPE:			
0-10	137442.2313	339636.0257	38.04
20-30	57577.8887	142277.8222	15.94
10-20	87935.3565	217302.5469	24.34
40-9999	43752.9339	108115.6873	12.11
30-40	34551.6737	85378.9133	9.56

Gambar 9. Perubahan Presentase Data setelah Pembagian HRU

c. Penggabungan HRU dengan Data Iklim

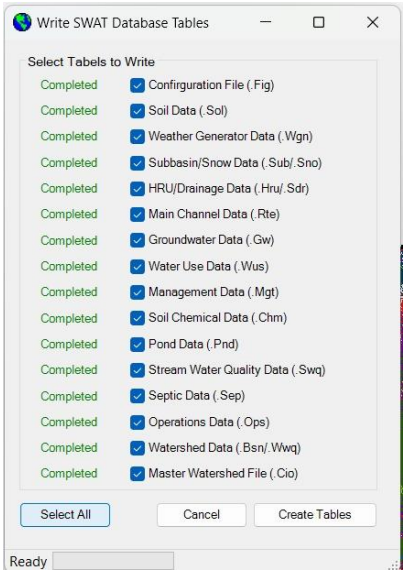
Ketika data iklim seperti curah hujan, suhu, dan kelembaban digabungkan dengan HRU, model dapat mensimulasikan respon hidrologis setiap unit terhadap variabilitas iklim. Hal ini memungkinkan prediksi yang lebih akurat mengenai aliran sungai, ketersediaan air, dan risiko bencana alam seperti banjir dan kekeringan, serta membantu dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya air secara lebih efektif.

HRU yang telah terbentuk pada DAS Serayu kemudian akan digabungkan dengan data masukan iklim untuk mengetahui kondisi DAS Serayu pada rentang tertentu. Data iklim yang digabungkan berupa data curah hujan, kecepatan angin, kelembapan relatif, temperatur, dan radiasi matahari. Dalam pemodelan hidrologi ini digunakan data iklim yang didapat dari Climate Forecast System Reanalysis (CSFR) pada rentang tahun 2000-2019. Pada DAS Serayu digunakan 3 stasiun CSFR yaitu stasiun 731094 (-7.337,109.375), stasiun 731097 (-7.337,109.688), dan stasiun 731100 (-7.337,110). Setelah semua data cuaca didapatkan kemudian data tersebut dapat di-input¬ pada menu write input table, pada tahap ini semua data disesuaikan dengan bagiannya masing masing seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. *Input* Data Cuaca Berdasarkan Tabel

Ketika semua data sudah berhasil di-input kemudian lakukan pengisian data database SWAT seperti pada gambar 11.



Gambar 11. Pengisian Tabel *Database* SWAT

d. Simulasi SWAT

Simulasi SWAT dilakukan selama 18 tahun pada rentang waktu 2001-2018 dengan *warm up* periode selama 2 tahun. Hasil simulasi SWAT akan dilewatkan selama 2 tahun awal rentang waktu sehingga hasil yang didapat dari simulasi SWAT yaitu pada rentang periode 2003-2018. Simulasi SWAT menghasilkan rerata hujan bulanan DAS Serayu, debit aliran (*Flow Out*), dan beberapa hasil yang lain. Pada simulasi ini lebih berfokus pada perbandingan debit aliran (*Flow Out*) bulanan pada tahun 2003-2018 yang didapat dari *tables out* hasil dari simulasi model SWAT.

Average monthly basin values

Mon	Rain (MM)	Snow Fall (MM)	SURF Q (MM)	LAT Q (MM)	Water Yield (MM)	ET (MM)	Sed. Yield (T/HA)	PET (MM)
1	297.40	0.00	110.53	25.29	267.58	0.00	533.42	0.00
2	297.78	0.00	115.33	24.80	275.51	0.00	579.71	0.00
3	218.65	0.00	75.09	21.55	252.31	0.00	400.52	0.00
4	185.72	0.00	58.77	18.06	212.70	0.00	318.70	0.00
5	168.20	0.00	62.03	15.44	199.68	0.00	317.37	0.00
6	115.00	0.00	40.96	11.85	153.87	0.00	214.60	0.00
7	80.48	0.00	25.07	8.79	118.28	0.00	129.78	0.00
8	35.62	0.00	9.20	4.70	75.60	0.00	53.12	0.00
9	75.71	0.00	28.72	6.02	77.34	0.00	151.48	0.00
10	140.06	0.00	49.69	10.60	105.47	0.00	255.89	0.00
11	237.07	0.00	89.63	18.26	175.03	0.00	440.08	0.00
12	309.35	0.00	121.03	23.43	246.52	0.00	627.48	0.00

Gambar 12. Data Hasil Simulasi SWAT

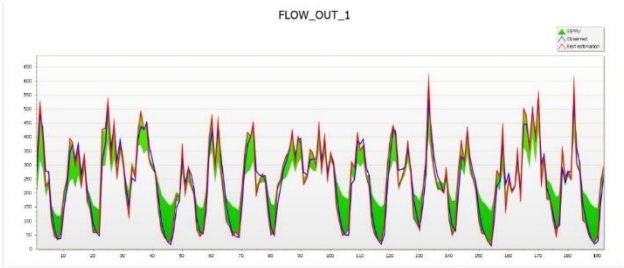
e. Kalibrasi dan Validasi

Kalibrasi dan validasi bertujuan untuk memastikan model dapat menghasilkan kondisi hidrologi yang sebenarnya dengan baik. Proses kalibrasi dan validasi pada pemodelan hidrologi SWAT dilakukan dengan *software* SWATCUP dengan menggunakan metode Sufi2. Kalibrasi dan validasi dilakukan dengan menggunakan 5 sampel pengujian. Parameter yang digunakan pada penelitian ini yaitu alpha_bf, cn2, GW_Delay, dan GWQMN. Hasil dari parameter kalibrasi dan validasi dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Kalibrasi dan Validasi

No	Parameter		Nilai Max	Nilai Min
1	Alpha_bf	Kurva aliran	0	1
2	Cn2	Alpha aliran dasar	0.2	-0.2
3	GW_DELAY	Ambang batas aliran air bawah tanah	30	450
4	GWQMN	Aliran air bawah tanah tertahan	0	2

Setelah parameter kalibrasi ditentukan, selanjutnya yaitu *running* sampel kalibrasi sebanyak 5 kali simulasi. Parameter evaluasi SWAT menggunakan koefisien determinasi (R^2) dan indeks Nash-Sutclife (NS). Untuk nilai koefisien determinasi (R^2) memilikin rentang antara 0 hingga 1, hal tersebut menunjukkan hubungan natara nilai yang diamati dengan nilai yang disimulasikan. Untuk indeks Nash-Sutclife (NS) memiliki rentang antara 0 hingga 1 yang menunjukkan seberapa baik hasil dari nilai kalibrasi tersebut. Hasil dari kalibrasi model hidrologi SWAT dapat dilihat pada Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15.



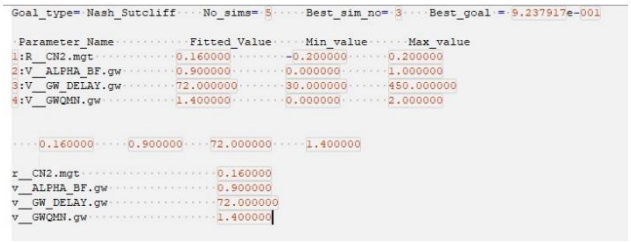
Gambar 13. Hasil Perbandingan Debit Simulasi dan Observasi

```
Goal_type= Nash_Sutcliff    No_sims= 5    Best_sim_no= 3    Best_goal = 9.237917e-001

Variable          p-factor  r-factor  R2    NS    bR2     MSE       SSQR      PBIAS  KGE
FLOW_OUT_1        0.78      0.54      0.94  0.92  0.8999  1.3e+003  2.5e+002  -0.1   0.92

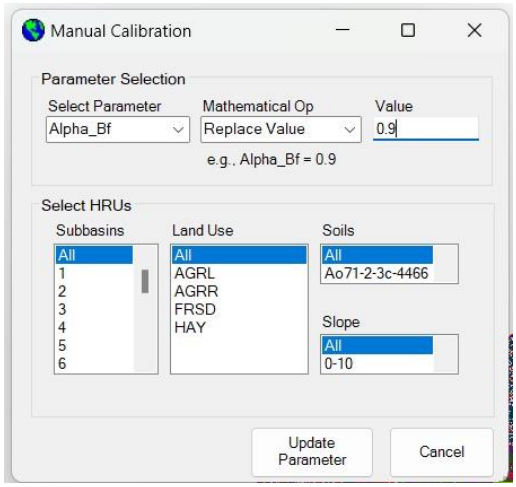
 KGE  RSR  MNS  VOL_FR  ---  Mean_sim(Mean_obs)  StdDev_sim(StdDev_obs)
0.92 0.28 0.73 1.00        249.53(249.35)        142.78(132.86)
```

Gambar 14 Nilai Hasil Kalibrasi



Gambar 15. Parameter Terbaik

Hasil dari parameter ditunjukkan seperti pada Gambar 4.11 dimana hasil terbaik didapatkan pada hasil *running* ke-3. Kemudian hasil dari parameter tersebut di-*input* ke *software* SWAT sebelum dilakukan simulasi lanjutan. Data parameter dimasukkan pada *manual calibration* ArcSWAT sehingga hasil simulasi sudah terkalibrasi dan terverifikasi.

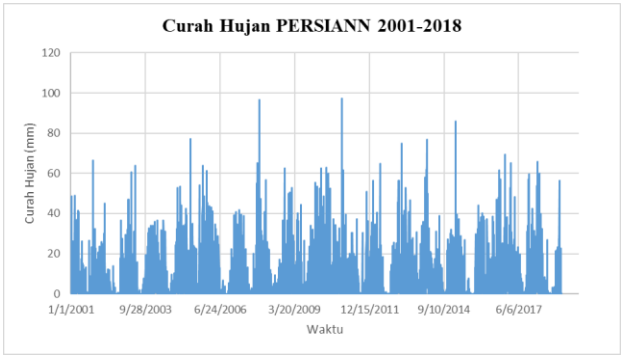


Gambar 16. Proses *Input* Hasil Kalibrasi

Berdasarkan hasil *running* kalibrasi dan validasi didapatkan nilai R2 sebesar 0,94 dan NS sebesar 0,92. Berdasarkan hasil tersebut maka nilai R2 dapat dikategorikan ke dalam kategori yang sangat tinggi. Untuk nilai NS dapat dikategorikan baik.

Pemodelan Curah Hujan dengan Pendekatan Scenario-Neutral

Pemodelan curah hujan dengan pendekatan *scenario-neutral* adalah suatu metode yang digunakan untuk mengidentifikasi pola curah hujan tanpa adanya asumsi terhadap perubahan iklim di masa depan. Pendekatan ini bertujuan untuk menghasilkan proyeksi yang lebih konservatif dan stabil dengan mengandalkan data historis yang ada serta teknik statistik yang cermat. Data curah hujan yang dipakai yaitu data curah hujan PERSIANN dengan periode waktu 2001-2018. Data yang digunakan yaitu selama 18 tahun. Data curah hujan PERSIANN pada periode tahun 2001-2018 ditampilkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Data Curah Hujan PERSIANN Tahun 2001-2018

Skenario Perubahan Iklim pada Model SWAT

a. Simulasi Debit Menggunakan Data Hujan Hasil Skenario

Pada penelitian ini, data yang digunakan adalah data curah hujan tahunan yang disimulasikan dengan variasi peningkatan dan penurunan dibandingkan dengan data observasi. Setiap variasi diwakili oleh tiga simulasi, sehingga secara keseluruhan terdapat tujuh simulasi yang dimodelkan menggunakan ArcSWAT untuk mengestimasi debit air. Data yang digunakan dalam simulasi adalah data observasi curah hujan CFSR dan data hasil skenario curah hujan PERSIANN. Data cuaca pada hasil skenario curah hujan PERSIANN dibagi menjadi 3 data cuaca yang total hujannya lebih rendah (*lower*) dari data curah hujan CFSR dan 3 data yang total curah hujan lebih tinggi (*upper*) dari data curah hujan CFSR. Semua data sampel yang digunakan dapat dilihat dalam Tabel 4.

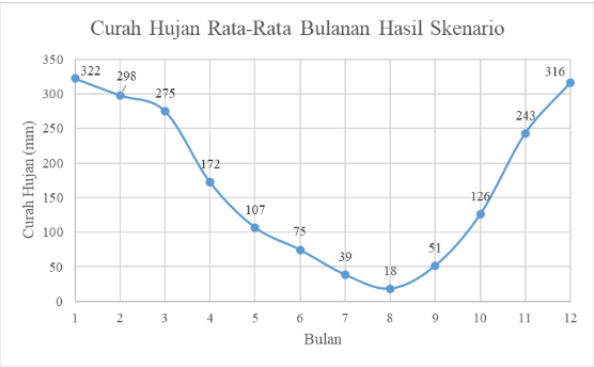
Tabel 4 Sampel Debit Simulasi pada ArcSWAT

No.	Simulasi	Total Curah Hujan Tahunan (mm)	Kondisi
1	CSFR	2158.27	Observasi
2	SN-286	1162.29	*Lower 1*
3	SN-277	1349.60	*Lower 2*
4	SN-208	1974.34	*Lower 3*
5	SN-9	2309.64	*Upper 1*
6	SN-27	2640.29	*Upper 2*
7	SN-37	2704.09	*Upper 3*

Simulasi curah hujan di *RStudio* juga menghasilkan nilai rata-rata curah hujan bulanan. Data ini dikenal sebagai curah hujan sintetis, yang memberikan gambaran lebih rinci mengenai pola curah hujan setiap bulan. Nilai rata-rata total curah hujan pada setiap bulan dari hasil simulasi *Rstudio* dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 18.

Tabel 5. Rata-Rata Curah Hujan Total pada Setiap Bulan

Bulan	CSFR	SN-286	SN-277	SN-208	SN-9	SN-27	SN-37
Jan	298	220	246	386	350	437	319
Feb	277	199	223	334	350	377	326
Mar	224	192	222	311	304	356	316
Apr	187	87	105	169	214	252	194
May	171	41	48	75	156	122	136
Jun	118	26	26	40	112	106	94
Jul	81	14	11	12	73	48	33
Aug	31	0	0	1	18	7	71
Sep	69	11	10	8	41	28	194
Oct	153	28	30	50	132	118	368
Nov	251	116	147	215	257	344	370
Dec	298	226	282	374	303	445	285



Gambar 18. Curah Hujan Rata-Rata Bulanan Hasil Skenario

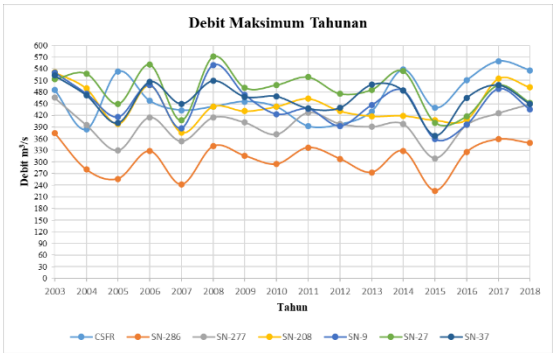
b. Analisis Frekuensi Debit

Hal berikutnya yang dilakukan setelah mendapatkan data curah hujan yaitu memodelkan debit menggunakan data curah hujan hasil simulasi *scenario-neutral* yang akan dijadikan sampel pemodelan SWAT. Data yang digunakan yaitu data pada Tabel 5 dengan menggunakan *software* ArcSWAT. Pada proses pemodelan ini tidak perlu memasukkan data debit pengamatan dikarenakan *output* yang diinginkan adalah debit simulasi dari curah hujan *skenario-neutral*. Hasil dari pemodelan hidrologi tersebut akan direkap dan diolah menggunakan *Microsoft Excel*

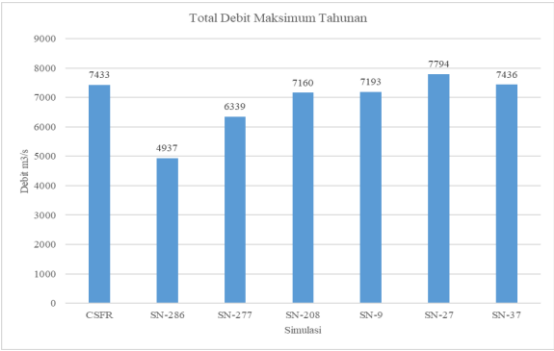
guna mendapatkan debit maksimum tahunan. Hasil debit tahunan yang didapat bisa dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 19.

Tabel 6 Debit Maksimum Tahunan

No	Tahun	Debit Maximum Tahunan						
		CSFR	SN-286	SN-277	SN-208	SN-9	SN-27	SN-37
1	2003	486	375	466	531	530	513	523
2	2004	383	280	395	489	476	528	472
3	2005	533	256	329	397	416	449	400
4	2006	457	328	415	498	499	551	507
5	2007	433	242	353	376	387	407	450
6	2008	442	340	415	443	550	571	509
7	2009	456	316	402	431	473	491	468
8	2010	442	294	371	442	423	498	469
9	2011	392	337	428	463	437	519	438
10	2012	397	308	398	431	393	476	439
11	2013	430	273	391	418	446	486	499
12	2014	538	329	398	419	484	534	483
13	2015	439	226	309	407	359	401	368
14	2016	510	326	396	409	396	418	465
15	2017	560	359	426	515	489	498	498
16	2018	536	349	449	492	435	452	449



Gambar 19. Grafik Debit Maksimum Tahunan

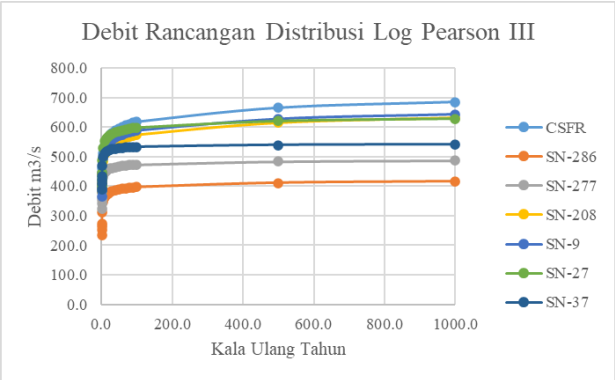


Gambar 20. Grafik Debit Maksimum Tahunan Seluruh Skenario

Analisis frekuensi membutuhkan data debit maksimum tahunan pada grafik dan gambar di atas. Analisis frekuensi menggunakan data yang diambil dari nilai *confidence interval* sebesar 5% dan jenis distribusi data yang dihasilkan yaitu Log Pearson Tipe III. Nantinya hasil tersebut akan menghasilkan data berupa Δkritik yang paling rendah. Hasil didapatkan pada Tabel 7 dan Gambar 21.

Tabel 7 Hasil Uji Distribusi

Jenis Distribusi	Δkritik	
	Uji Chi-Kuadrat	Uji Smirnov-Kolmogorov
Log Pearson Tipe III	3.481	0.330



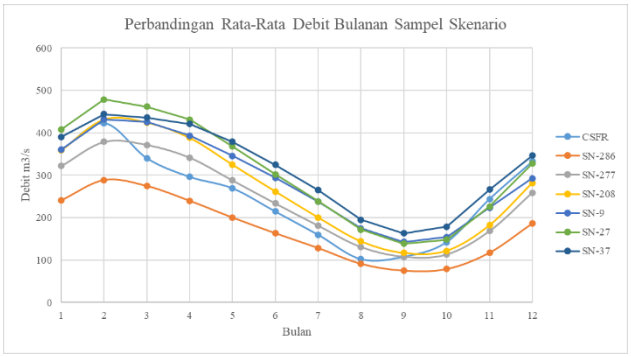
Gambar 21. Debit Kala Ulang Rancangan Setiap Skenario

c. Analisis Sensitivitas DAS Serayu

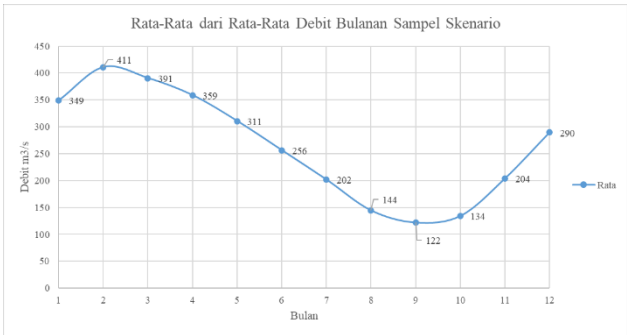
Langkah selanjutnya dalam penelitian ini adalah memodelkan debit menggunakan data curah hujan hasil simulasi skenario-netral yang tercantum dalam Tabel 4.8 dengan menggunakan software ArcSWAT. Proses pemodelan debit ini akan mengikuti tahapan yang telah dijelaskan sebelumnya, namun kali ini tidak perlu memasukkan data debit observasi karena yang diinginkan adalah debit hasil simulasi dari curah hujan *skenario-neutral*. Hasil pemodelan debit untuk setiap sampel kemudian akan diproses dan dihitung menggunakan *Microsoft Excel* untuk memperoleh debit maksimum tahunan. Nilai rata-rata debit dapat dilihat pada Tabel 8, Gambar 22, dan Gambar 23.

Tabel 8. Rata-Rata Debit Bulanan

Bulan	CFSR	SN-286	SN-277	SN-208	SN-9	SN-27	SN-37	Rata
Jan	361	241	322	360	361	408	390	349
Feb	423	288	379	432	432	479	444	411
Mar	340	274	372	425	426	462	436	391
Apr	296	239	342	388	393	431	421	359
May	269	200	288	325	345	368	379	311
Jun	214	163	234	262	294	302	325	256
Jul	159	129	181	200	238	239	265	202
Aug	102	92	131	144	174	172	195	144
Sep	108	76	108	117	142	138	163	122
Oct	142	79	113	122	154	148	179	134
Nov	244	117	168	182	224	226	266	204
Dec	332	186	259	282	293	328	346	290



Gambar 22. Perbandingan Rata-Rata Debit Bulanan Sampel Skenario

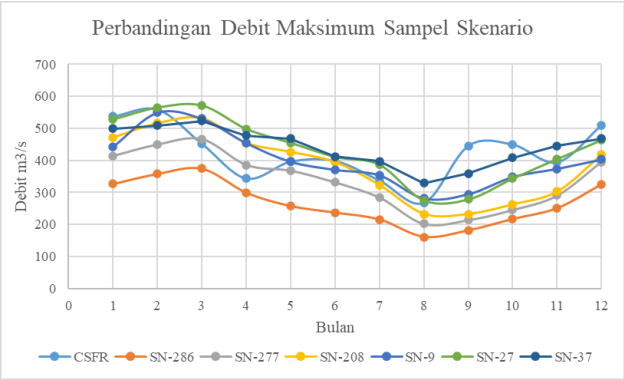


Gambar 23. Nilai Rata-Rata Debit Bulanan Hasil Skenario

Didapat nilai rata-rata debit bulanan pada setiap skenario, kemudian membuat tabel data debit hasil simulasi model SWAT yang akan digunakan untuk mencari nnilai debit maksimum dari hasil sampel semua skenario. Nilai debit maksimum bulanan dapat dilihat pada Tabel 9 dan Gambar 24.

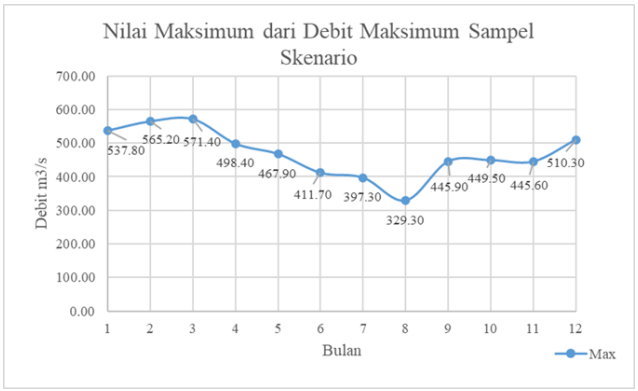
Tabel 9. Nilai Debit Maksimum Bulanan

Bulan	CSFR	SN-286	SN-277	SN-208	SN-9	SN-27	SN-37	Rata-rata
Jan	538	327	414	472	443	528	499	460
Feb	560	359	449	516	550	565	509	501
Mar	452	375	466	531	530	571	523	493
Apr	343	299	386	455	454	498	477	416
May	396	258	368	427	396	455	468	395
Jun	398	237	332	395	371	411	412	365
Jul	337	216	284	323	353	387	397	328
Aug	267	161	202	233	281	275	329	250
Sep	446	182	214	232	294	279	359	287
Oct	450	217	246	263	348	344	408	325
Nov	394	251	291	303	374	405	446	352
Dec	510	326	396	418	403	464	469	426

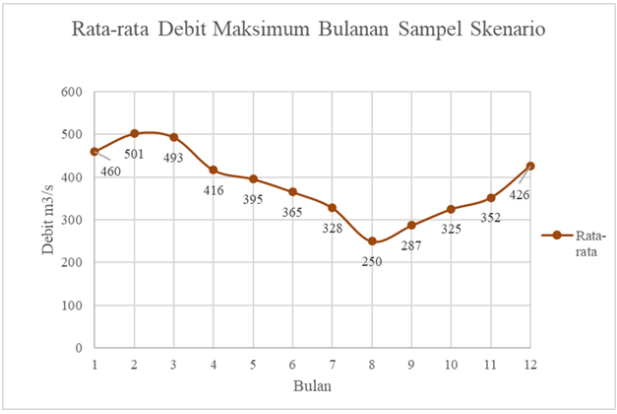


Gambar 24. Perbandingan Debit Maksimum Bulanan antar Skenario

Guna memudahkan dalam melakukan pembacaan grafik, maka dapat dilihat grafik nilai maksimum pada setiap bulan dari nilai rata-rata debit maksimum semua skenario pada Gambar 25 dan Gambar 26.



Gambar 25. Nilai Maksimum dari Debit Maksimum Sampel Skenario

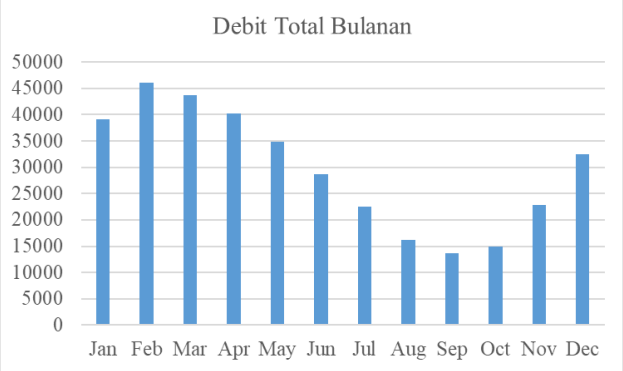


Gambar 26. Nilai Rata-Rata Debit Maksimum Bulanan Sampel Skenario

Langkah selanjutnya yaitu melakukan rekapitulasi pemodelan debit dari masing-masing skenario, melakukan pembuatan tabel untuk debit total bulanan seluruh sampel skenario dari semua tahun simulasi. Hasil dari debit total bulanan dapat dilihat pada Tabel 10 dan Gambar 27.

Tabel 10 Debit Total Bulanan Semua Skenario

Bulan	Debit Total Bulanan
Jan	39081.3
Feb	46030.4
Mar	43750.9
Apr	40180.7
May	34796.6
Jun	28699.5
Jul	22579.4
Aug	16145.1
Sep	13632.3
Oct	15010.5
Nov	22843.3
Dec	32426.5



Gambar 27. Grafik Debit Total Bulanan Semua Skenario

Pembahasan Umum

Penelitian ini yaitu mengenai simulasi curah hujan menjadi debit aliran DAS Serayu menggunakan beberapa *software* diantaranya ArcGis, ArcSWAT, dan SWATCUP. Penelitian ini diawali dengan pemodelan peta DAS Serayu. Setelah mendapatkan model peta DAS Serayu kemudian dilanjutkan dengan proses deliniasi DAS. Deliniasi DAS ini membutuhkan file *Digital Elevation Model* (DEM) DAS Serayu. Hasil dari proses deliniasi DAS ini adalah pembagian dan luasan sub-basin, peta DAS, dan beberapa laporan statistik mengenai DAS Serayu seperti luas DAS, panjang aliran sungai utama, dan elevasi rata-rata. Kemudian setelah proses deliniasi das dilanjutkan dengan proses pembentukan *Hydrologycal Response Unit* (HRU). Proses pembentukan *Hydrologycal Response Unit* (HRU) membutuhkan data penggunaan lahan, tanah, dan kemiringan lereng. Dalam proses ini dilakukan dengan mengkombinasikan semua data tersebut yang akan membentuk kesatuan HRU. Dalam pembentukan HRU ini presentase dari total luasan peta *Land Use and Land Cover* (LULC) sebesar 10%, jenis tanah sebesar 5%, dan kemiringan lereng sebesar 5% (Sintanala Arsyad, 2006). Hasil dari proses ini yaitu berupa data sebaran *Land Use and Land Cover* (LULC), data sebaran tanah, dan data kemiringan lereng DAS Serayu. Proses selanjutnya yang dilakukan yaitu meng-*input* data cuaca yang nantinya akan digabungkan secara otomatis dengan data *Hydrologycal Response Unit* (HRU) oleh *software* ArcSWAT. Data cuaca yang dibutuhkan dalam simulasi hidrologi DAS Serayu ini yaitu berupa data curah hujan, temperatur, radiasi matahadi, kelembapan relatif, dan kecepatan angin. Data tersebut disesuaikan dengan stasiun cuaca pada DAS Serayu. Setelah seluruh data tersebut didapatkan dan di-*input* pada software ArcSWAT, kemudian bisa dilakukan simulasi.

Proses simulasi hidrologi DAS Serayu dilakukan setelah semua data terkumpul. Pada simulasi ini dilakukan sejak tahun 2001-2018. Dalam rentang waktu simulasi terdapat waktu 2 tahun sebagai *warming up*. Simulasi yang sebenarnya dilakukan sejak tahun 2003-2018 dikarenakan tahun *warming up* tidak ikut serta dalam simulasi. Proses simulasi ini dilakukan sebanyak 7 kali *running*. Perbedaan sampel dalam *running* simulasi tersebut yaitu pada data curah hujan awal. Data yang digunakan melibuti data observasi, data curah hujan tahunan *lower* sebanyak 3 sampel, dan data curah hujan tahunan *upper* sebanyak 3 sampel. Data curah hujan tahunan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menggunakan data curah hujan *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN).

Proses yang tidak bisa terlewatkan dalam simulasi hidrologi ini yaitu kalibrasi dan validasi data. Proses kalibrasi dan valiasi data menggunakan *software* SWATCUP. Proses kalibrasi dan validasi ini dilakukan setelah *running* simulasi hidrologi dengan data observasi dan dilakukan untuk melakukan *running* simulasi data *lower* dan *upper*. Parameter yang digunakan dalam proses kalibrasi dan validasi yaitu alpha_Bf, cn2, GW_DELAY, dan GWQMN. Hasil dari proses kalibrasi dan validasi ini berupa *value* nilai NSE sebesar 0,92 yang dapat dikategorikan dalam kategori layak dan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,94 yang juga dikategorikan sebagai layak. Data hasil kalibrasi dan validasi yang digunakan yatu berupa data terbaik dari parameter alpha_Bf, cn2, GW_DELAY, dan GWQMN. Proses kalibrasi dan validasi nantinya akan digunakan untuk *running* simulasi hidrologi pada data *upper* dan *lower*. Semua parameter nantinya di-*input* dalam tab *manual calibration* dalam *software* ArcSWAT.

Semua data didapatkan setelah menjalani simulasi dengan semua sampel. Semua data *output* dari simulasi kemudian diolah dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel*. Dari hasil *output* tersebut ditunjukkan bahwa rata-rata debit tahunan tertinggil terjadi pada bulan Februari kemudian diikuti oleh bulan Maret, April, Januari, Mei, Desember, Juni November, Juli, Agustus, Oktober, dan paling rendah terdapat pada bulan September. Kemudian untuk data *output* nilai rata-rata debit maksimum tertinggi terdapat pada bulan Februari kemudian diikuti oleh bulan Maret, Januari, Desember, April, Mei, November, Juli, Oktober, September, dan data terendah terdapat pada bulan Agustus. Kemudian untuk nilai maksimum debit bulanan yang tertinggi yaitu pada bulan Maret kemudian diikuti bulan Februari, Januari, Desember, April, Mei, Oktober, September, November, Juni, Juli, dan yang terakhir yaitu

pada bulan Agustus. Berdasarkan dari data *output* diatas dapat disimpulan bahwa DAS Serayu memiliki kemungkinan potensi bencana banjir tertinggi pada bulan Desember hingga Mei (awal tahun).

5. PENUTUP

Kesimpulan

Setelah melakukan serangkaian penelitian dan analisis terhadap data yang telah dikumpulkan, pada bab ini akan disajikan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan ini dirumuskan berdasarkan tujuan penelitian, hipotesis yang telah diajukan, serta temuan-temuan yang diperoleh selama proses penelitian. Dengan demikian, diharapkan kesimpulan ini dapat memberikan gambaran yang jelas mengenai kontribusi penelitian terhadap bidang studi yang diteliti, serta implikasi praktis dan teoritis yang dapat diambil dari hasil penelitian ini. Beberapa hal penting yang didapat sebagai berikut :

1. Simulasi pemodelan hidrologi DAS Serayu menggunakan data curah hujan CFSR sebagai data observasi dan data curah hujan PERSIANN sebagai data simulasi. Total curah hujan tahunan CFSR sebesar 2158,27 mm, kemudian untuk data curah hujan skenario dari sampel yang dipilih yaitu SN-286 sebesar 1162,29 mm; SN-277 sebesar 1349,60 mm; SN-208 sebesar 1974,34 mm; SN-9 sebesar 2309,64 mm; SN-27 sebesar 2640,29; SN-37 sebesar 2704,09.Proses validasi pemodelan hidrologi DAS Cisanggarung menghasilkan nilai koefisien korelasi antar debit observasi dengan debit validasi sebesar 0,797.
2. Simulasi pemodelan hidrologi dilakukan sebanyak 7 kali simulasi dari rentang waktu 2001-2018 dengan periode waktu warming up 2 tahun pada awal periode simulasi (2001-2002). Berdasarkan hasil simulasi, rata-rata debit bulanan tertinggi terjadi pada bulan Februari sebesar 501 m^3/s dan terendah terjadi pada bulan Agustus yaitu sebesar 250 m^3/s. Rata-rata debit maksimum bulanan yang tertinggi terjadi pada bulan Maret yaitu sebesar 571,40 m^3/s dan terendah terjadi pada bulan Agustus yaitu sebesar 329,30 m^3/s.
3. Proses kalibrasi dan validasi pemodelan hidrologi pada DAS Serayu menggunakan software SWATCUP pada penelitian ini menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,94 dan nilai NSE sebesar 0,92 yang kedua hasil tersebut termasuk dalam kategori baik dan layak.
4. Berdasarkan hasil simulasi, rentang bulan yang memiliki potensi ketersediaan atau debit air pada DAS Serayu yang tertinggi terjadi pada bulan Desember hingga bulan Mei. Sedangkan rentang bulan yang memiliki ketersediaan air rendah terjadi pada bulan Juni hingga November. Artinya potensi bencana banjir pada DAS Serayu terjadi pada bulan Desember hingga Mei.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang telah diuraikan sebelumnya, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut serta penerapan praktis dari temuan penelitian ini. Saran-saran ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif bagi pihak-pihak yang berkepentingan dan mendorong peningkatan kualitas dalam bidang yang diteliti. Berikut adalah beberapa saran yang dapat dipertimbangkan:

1. Berdasarkan hasil penelitian ini, salah satu cara untuk mengurangi dampak banjir yaitu melalui pengembangan sistem peringatan dini berbasis model hidrologi. Sistem seperti ini dapat memberikan informasi kepada masyaraat dan pemerintah daerah mengenai potensi banjir secara lebih dini.
2. Untuk meningkatkan akurasi deteksi banjir, disarankan agar data curah hujan satelit PERSIANN yang digunakan dalam model SWAT divalidasi dengan data curah hujan dari stasiun meteorologi lokal. Hal ini dapat meminimalkan perbedaan antara data satelit dan kondisi sebenarnya di lapangan.
3. Disarankan untuk mengadakan pelatihan dan edukasi bagi pihak-pihak yang terlibat dalam manajemen banjir mengenai penggunaan dan interpretasi hasil dari model SWAT. Ini akan memastikan bahwa model tersebut dapat digunakan secara maksimal dalam upaya mitigasi banjir.
4. Kolaborasi antara akademisi, pemerintah daerah, dan lembaga penelitian meteorologi dan hidrologi sangat penting untuk pengembangan dan penerapan model deteksi banjir yang lebih efektif. Melalui kolaborasi ini, data dan teknologi yang diperlukan dapat diakses dan dimanfaatkan secara optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Bloschl, G. and Grayson, R. (200AD) *Spatial Observations and Interpolation*. Cambridge.

Gustoro, D., Sujono, J. and Karlina, K. (2022) 'Perbandingan Pola Distribusi Hujan Terukur dan Hujan Satelit PERSIANN di DAS Progo', *Jurnal Teknik Pengairan*, 13(1), pp. 23–35. doi: 10.21776/ub.pengairan.2022.013.01.03.

Harsoyo, B. (2010) 'REVIEW MODELING HIDROLOGI DAS DI INDONESIA', *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 11(1), pp. 41–47.

Hernanda, R. Y. *et al.* (2016) 'TANGGUL SUNGAI SERAYU HILIR DARI MUARA HINGGA BENDUNG GERAK SERAYU', *JURNAL KARYA TEKNIK SIPIL*, 5(1), pp. 135–145. Available at: http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkts.

Irawan, D. and Zulkifli Mulki, G. (2016) 'ANALISA KAWASAN RAWAN BANJIR KOTA SINTANG MENGGUNAKAN SISTEM INFORMASI GEOGRAFI', *JURNAL TEKNIK SIPIL*, 16(2), pp. 529–539.

Jariyah, N. A. and Pramono, I. B. (2013) 'KERENTANAN SOSIAL EKONOMI DAN BIOFISIK DI DAS SERAYU: Collaborative Management (Susceptibility of Socio Economic and Biophysical in Serayu Watershed)', *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 10(3), pp. 141–166.

Kustamar and Yulianti, E. (2009) 'MODEL HIDROLOGI DAS ITN I', *Jurnal Sumber Daya Air*, 5(2), pp. 85–94.

Marlina, A. and Andayani, R. (2018) 'Model Hidrologi Untuk Prediksi Banjir Kota Palembang', *Prosiding Seminar Nasional Hari Air Dunia 2018*, pp. 1–13.

Neitsch, S. L. *et al.* (2005) *SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL THEORETICAL DOCUMENTATION VERSION 2005*.

Prayudi, M., Handayani, Y. L. and Sujatmoko, B. (2017) 'ANALISIS SENSITIVITAS PARAMETER KALIBRASI DALAM HEC-HMS', *Jom FTEKNIK*, 4(1).

Purnama, S. (2010) 'POTENSI SUMBERDAYA AIR DAS SERAYU', 6(3), pp. 291–302.

Sintanala Arsyad (2006) *Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: IPB Press.

Sudaryono (2002) 'PENGELOLAAN DAERAH ALIRAN SUNGAI (DAS) TERPADU, KONSEP PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN', *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 3(2), pp. 153–158.

Vernimmen, R. R. E. *et al.* (2012) 'Evaluation and bias correction of satellite rainfall data for drought monitoring in Indonesia', *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), pp. 133–146. doi: 10.5194/hess-16-133-2012.

Wibowo, K. M., Kenedi, I. and Jumadi, J. (2015) 'SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS (SIG) MENENTUKAN LOKASI PERTAMBANGAN BATU BARA DI PROVINSI BENGKULU BERBASIS WEBSITE', *Jurnal Media Infotama*, 11(1), pp. 51–60.

Windiastik, S. P., Ardhana, N. and Triono, J. (2019) 'PERANCANGAN SISTEM PENDETEKSI BANJIR BERBASIS IOT (INTERNET OF THING)', *Seminar Nasional Sistem Informasi*, 3(1), pp. 1925–1931.

Zakaria, A., Welly, M. and Cambodia, M. (2015) 'Model Stokastik Curah Hujan Harian dari Beberapa Stasiun Curah Hujan di Way Jepara', *Jurnal Rekayasa*, 19(2), pp. 107–118.

Efektivitas Saluran Pengendali Banjir di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika: Studi Kasus Sirkuit Internasional Mandalika Lombok

M. Arifudin Fahmi[1*,2], Nabila H. Trisna[1]

[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Al-Azhar, Mataram
[2] Program Doktor Teknik Sipil Universitas Islam Sultan Agung, Semarang
e-mail: arifudinfahmy65@gmail.com

ABSTRAK

Saluran pengendali banjir KEK Mandalika khusunya di area sekitar komplek Pertamina Mandalika Internasional Street Circuit dibangun bertujuan untuk melindungi sirkuit dari resiko banjir dengan mengelakkan dua sungai dan satu drainase yang nantinya akan dialirkan menuju satu saluran yang berujung ke muara. Dengan adanya saluran pengendali banjir di KEK Mandalika Lombok, penelitian ini bertujuan untuk meneliti efektivitas saluran pengendali banjir tersebut dan meneliti dimensi saluran pengendali banjir yang ada di DAS Ngolang dengan debit periode ulang 10 tahun apakah dapat menampung debit limpasan.
Metode penelitian yang digunakan yaitu metode perhitungan penjabaran hasil dari pengolahan data lapangan dapat disimpulkan bahwa saluran pengendali banjir pada Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika yang bertujuan untuk melindungi sirkuit dari terjangan banjir sudah efektif, terbukti dengan hasil perhitungan Qrancangan < Qsaluran maka saluran masih memenuhi debit yg mengalir dan kemungkinannya kecil akan terjadi over topping.
Dengan dimensi saluran yang sudah direncanakan telah terbukti dapat menampung debit limpasan seperti Sungai Ngolang dengan Qrancangan 0.772 m^3/dt lebih kecil dari pada 32.99 m^3/dt Qsaluran, Drainase Ngolang dengan Qrancangan 0.083 m^3/dt lebih kecil dari pada 1.8 m^3/dt Qsaluran, Sungai Soker dengan Qrancangan 0.318 m^3/dt lebih kecil dari pada 27.00 m^3/dt Qsaluran, Drainase Pengendali Banjir dengan Qrancangan 1.127 m^3/dt lebih kecil dari pada 104.00 m^3/dt Qsaluran, Sungai Lagon dengan Qrancangan 1.127 m^3/dt lebih kecil dari pada 77.98 m^3/dt Qsaluran, maka dapat dinyatakan kelima saluran tersebut telah memenuhi debit yang mengalir.

Kata kunci: Pengendali banjir, Sirkuit Mandalika, DAS Ngolang

1. PENDAHULUAN

Kawasan Ekonomi Kreatif (KEK) Mandalika adalah merupakan Destinasi Pariwisata Super Prioritas (DPSP) di Indonesia. KEK Mandalika tidak hanya memiliki banyak tempat wisata alam yang menarik, tetapi juga memiliki Pertamina Mandalika Internasional Street Circuit, tempat berbagai ajang balap internasional akan diadakan. Untuk meningkatkan potensi Sirkuit Mandalika, Kementrian PUPR membangun drainase pengaman banjir di area seluas 1.135 hektar Sirkuit Mandalika dengan panjang 7,2 km dan debit air 78 m3/dt. Diharapkan banjir di sekitar Sirkuit dan KEK Mandalika akan berkurang.
Namun, pertumbuhan pesat KEK Mandalika menghadirkan tantangan baru, terutama dalam hal pengelolaan lingkungan dan pengendalian banjir. Karena letak geografisnya, wilayah ini rentan terhadap bencana alam, termasuk banjir, yang dapat mengancam keberlanjutan pembangunan dan keselamatan infrastruktur. Risiko banjir dapat meningkat sebagai akibat dari pembangunan yang tidak terkendali dan perubahan penggunaan lahan, yang pada akhirnya akan mengganggu operasional dan menarik investasi dari wilayah tersebut.
Saluran pengendali banjir sangat penting untuk mengurangi risiko banjir. Untuk memastikan bahwa KEK Mandalika dapat berkembang secara berkelanjutan tanpa terpengaruh oleh bencana alam, sistem saluran yang efektif sangat penting. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa efektif saluran yang digunakan untuk mengendalikan banjir di wilayah sekitar Sirkuit Internasional Mandalika. Penelitian ini akan melihat bagaimana kondisi saluran, seberapa baik sistem drainase berfungsi, dan bagaimana hal-hal ini berdampak pada manajemen risiko banjir di kawasan tersebut. Penelitian ini akan dianalisis dengan metode studi kasus.
Studi ini diharapkan dapat memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana sistem pengendalian banjir di KEK Mandalika digunakan dan bekerja dengan baik. Hasilnya akan membantu pengelola kawasan dan pemerintah membuat kebijakan dan strategi yang lebih baik untuk mengelola sumber daya air dan pengendalian banjir, sehingga pembangunan di KEK Mandalika dapat dilanjutkan secara berkelanjutan dan memberikan manfaat terbaik bagi semua pihak.
Sebagai daratan paling terendah di Lombok, selevel permukaan air laut, Sirkuit Mandalika tidak dapat memanfaatkan

potensinya sepenuhnya jika tidak ada drainase. Dengan adanya drainase ini, yang melindungi banjir dengan kapasitas yang sesuai dengan desain dan telah dijaga angka keamanannya agar tidak terjadi over popping, over popping tidak terjadi. Diharapkan bahwa dengan adanya saluran pengandali banjir ini, risiko banjir di sirkuit dan KEK Mandalika akan dikurangi.

Maksud Dan Tujuan Penelitian

1. Meneliti efektivitas saluran pengendali banjir di KEK Mandalika yang dibangun untuk melindungi area Sirkuit Mandalika.
2. Meneliti dimensi saluran pengendali banjir yang ada di DAS Ngolang dan dengan debit periode ulang 10 tahun apakah dapat menampung debit limpasan.

2. METODOLOGI

Lokasi Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di KEK Mandalika, yang terletak di Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat, Indonesia. KEK Mandalika adalah salah satu dari Destinasi Pariwisata Super Prioritas (DPSP) yang telah ditetapkan oleh pemerintah Indonesia. Lokasi ini dipilih karena memiliki kombinasi unik antara keindahan alam, potensi pariwisata, dan tantangan lingkungan yang signifikan.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data

Data yang dikumpulkan adalah data primer terdiri dari lokasi, kondisi, dan dimensi saluran. Data sekunder berasal dari stasiun pengukur curah hujan yang berdampak pada wilayah yang terkait dengan pengamatan selama sepuluh tahun dan peta topografi. Karena beberapa data saat ini hanya dapat diakses selama 5 tahun, data tersebut dianalisa dengan metode Thomas Fiering. Langkah berikutnya adalah pengolahan atau analisis data, yang dilakukan dengan menggunakan rumus yang tepat .

Analisa Hidrologi

Rencana sistem drainase wilayah bergantung pada data curah hujan. Data harus dikumpulkan dalam jumlahyang cukup dari sejumlah stasiun pengukur hujan yang terletak di sekitar area penelitian. Karena data curah hujan harian digunakan, intensitas hujan dan debit pengaliran dihitung menggunakan persamaan berikut, yang keduanya didasarkan pada rumus Mononobe:

$$I = \frac{R_{24}}{24}\left(\frac{24}{tc}\right)^{m} \quad (1)$$

dengan I = Intensitas hujan (mm/jam), t = Lamanya curah hujan (menit), a,b,n,m = Kostanta, R_{24} =Curah hujan maksimum dalam 24 jam, Tc = Waktu konsentrasi

Debit air hujan , maka di gunakan persamaan berikut ini:

$$Q = 0{,}00278 \times C \times I \times A \quad (2)$$

dengan Q = Debit air yang mengalir (m3/dt), C = Koefisien pengaliran, A = Luas wilayah pengaliran (ha), dan I = Intensitas hujan (mm/jam)

Untuk memperkirakan jumlah air kotor yang akan dialirkan ke saluran drainase, pertama-tama perlu mengetahui berapa banyak air yang dibutuhkan setiap orang. Seseorang memerlukan 80 liter air setiap hari untuk mandi, yang merupakan 80% dari kebutuhan air bersih. Oleh karena itu, jumlah air yang digunakan setiap hari adalah 64 liter, atau $7{,}41.10^{-3}$ liter per detik, atau 80% dari kebutuhan air bersih.

- Jika diketahui jumlah penduduk pada suatu permukiman

$$Qak = Pn\ x\ 7{,}41.10^{-3} \quad (3)$$

- Jika tidak di ketahui jumlah penduduk pada suatu permukiman:

$$\text{Qak} = \frac{\text{Pn x } 7{,}41.10^{-3}}{\text{AK}} \text{ x Ap} \quad (4)$$

dengan Qak = Debit air limbah rumah tangga (m³/det), Pn = Jumlah penduduk pada tahun ke-n, Ap = Luas pemukiman (blok) (km²), Ak = Total luas wilayah yang dikajian (km²).

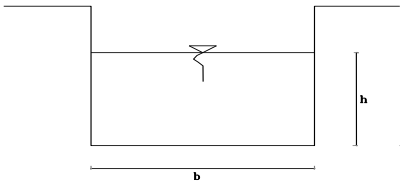
Debit Rancangan adalah total debit banjir saluran pada tiap-tiap saluran, dimana dalam satu saluran menerima debit banjir saluran dari saluran sebelumnya.
Persamaan debit Rancangan :

$$\text{Qtot} = \text{Qsal 1} + \text{Qsal 2} + \ldots + \text{Qsal n} \quad (5)$$

dengan Qtot = Debit banjir rancangan (m³/det), Qsal n = Debit banjir saluran ke-n (m³/det).

Analisa Hidrolika

Perencanaan saluran drainase harus mempertimbangkan kapasitas tampung saluran yang ada berdasarkan tinjauan hidrolis dan elevasi sesuai kondisi lapangan. Berikut penampang saluran segi empat adalah salah satu contoh penampang saluran.



Gambar 2. Penampang saluran segi empat

Kapasitas saluran segi empat dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$A = b \text{ x } h \quad (6)$$

$$P = b + 2h \quad (7)$$

$$R = \frac{bh}{b+2h} \quad (8)$$

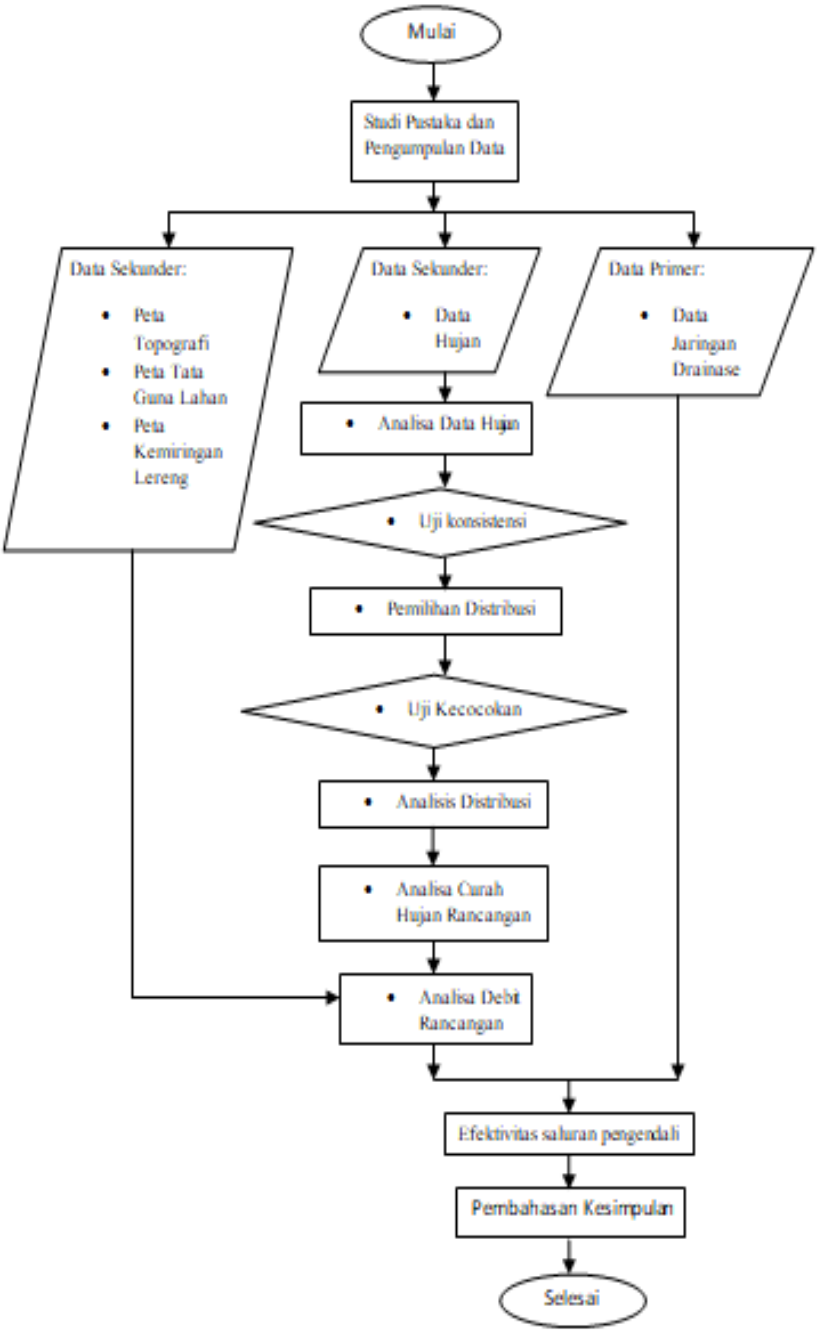
dengan b = Lebar dasar saluran (m), h = Kedalaman air (m), A = Luas penampang (m²), P = Keliling basah saluran (m), R = Jari-jari hidrolis (m).

Kapasitas saluran dapat dihitung menggunakan persamaan Manning:

$$Q = A\ .V \quad (9)$$

$$V = \frac{1}{n}.R^{2}/^{3}.S\,{}^{1}/_{2} \quad (10)$$

dengan Q = Debit air di saluran (m³/detik), V = Kecepatan air di saluran (m/detik), S = Kemiringan dasar saluran, n = Koefisien kekasaran manning.



Gambar 3. Bagan alir penelitian

3. PEMBAHASAN

Data

Data curah hujan harian dari tahun 2012 hingga 2021 dan tahun 2012 hingga 2016 diperoleh dari Balai Wilayah Sungai; metode Thomas Fieirng, yang menghasilkan data dari tahun 2017 hingga 2021, juga digunakan. Dua stasiun hujan yang berpengaruh di daerah penelitian yang memenuhi syarat untuk ketersediaan data adalah Stasiun ARR Rembitan dan Stasiun MRG Sepit.

Berikut data curah hujan harian maksimum dari stasiun ARR Rembitan dan Stasiun MRG Sepit dapat di lihat pada tabel 1.

Tabel 1. Data curah hujan harian maksimum

Tahun	Tanggal	Curah hujan (mm)		Hujan Rerata	Hujan Rerata Maksimum
		Pos Rembitan	Pos Sepit		
2012	des	128.6	115.0	121.80	121.80
	des	128.6	115.0	121.80	
2013	mei	93.7	90.5	61.40	95.37
	feb	84.7	201.4	95.37	
2014	des	168.2	134.7	100.97	134.47
	feb	36.1	367.3	134.47	
2015	des	86.3	145.4	77.23	133.23
	feb	37.7	362.0	133.23	
2016	des	181.9	154.5	168.20	168.20
	feb	26.2	354.1	126.77	
2017	nov	147.6	25.8	57.80	57.80
	feb	69	100.4	56.47	
2018	jan	110.6	112.5	74.37	74.37
	jan	110.6	112.5	74.37	
2019	nov	105.1	0	35.03	51.23
	jan	65.3	88.4	51.23	
2020	mar	118.5	88.4	68.97	68.97
	mar	118.5	88.4	68.97	
2021	jan	145.5	105.7	83.73	83.73
	des	111.5	113.5	75.00	

Data saluran eksisting dari hasil pengamatan lapangan di Kecamatan Pujut, Lombok Tengah. Provinsi Nusa Tenggara Barat.
dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Data saluran eksisting

No.	Nama Saluran	Dimensi Saluran		Tipe Saluran	Bentuk Penampang	Type Konstruksi	L Saluran (m)
		b (m)	h (m)				
1	Saluran Pengendalian Banjir	10	2.5	Terbuka & Tertutup	Segi Empat	L. Gutter, Box Culvert & Uditch	3.893
2	Sungai Ngolang	7	2.5	Terbuka	Terbuka	L. Gutter	127
3	Anak Sungai Ngolang	2	1.2	Terbuka	Terbuka	L. Gutter	113
4	Sungai Soker	4	2.5	Terbuka	Terbuka	L. Gutter	350
5	Sungai Lagon	14	2.7	Terbuka	Terbuka	L. Gutter	324

Analisa Hidrologi

Perhitungan yang dilakukan untuk menguji konsistensi data curah hujan tahun 2012 menggunakan RAPS (Rescaled Adjusted Partial Sums):

- $Sk^* = \sum_{i+1}^{k}(\gamma_i - \gamma_\tau)$

  $Sk^* = (121.8 - 98.9)$

  $Sk^* = 22.9$

- $Dy^2 = \sum_{I-2}^{n}(\gamma_i - \gamma_\tau)^2$

  $Dy^2 = \frac{22.9^2}{10}$

  $Dy^2 = 52.36$

- $Sk^{**} = \frac{Sk^*}{Dy^2}$

$$Sk^{**} = \frac{22.9}{52.36} = 0{,}4$$

Tabel 3. Hasil perhitungan uji konsistensi data hujan Metode RAPS

No.	Tahun	Hujan (mm)	Sk*	Komulatif	dy²	Sk**	[Sk**]
1	2011	121.8	22.9	34.9	52.36	0	0
2	2012	95.4	(3.5)	19.3	1.26	(3)	3
3	2013	134.5	35.6	54.9	126.4	0	0
4	2014	133.2	34.3	89.2	117.76	0	0
5	2015	168.2	69.3	158.5	480.0	0	0
6	2016	57.8	(41.1)	117.4	169.1	0	0
7	2017	74.4	(24.6)	92.8	60.3	0	0
8	2018	51.2	(47.7)	45.13	227.4	0	0
9	2020	69.0	(30.0)	15.18	89.7	0	0
10	2021	83.7	(15.2)	0.00	23.1	(1)	1
Jumlah		**989.2**			**1,347.24**		
Rata-rata		**98.9**			**134.72**		

n=10
Sk** maks=0
Sk**min=(-3)
Q = Sk** maks= 5

R = Sk** maks- Sk**min= 8

$Q/n^{\frac{1}{2}}$=0,70 < Tabel 90%=1,05 konsisten [ok]

$R/n^{\frac{1}{2}}$=0,95<Tabel 90%=1,21 konsisten [ok]

Perhitungan Curah Hujan Rancangan Probabilitas :

Jumlah data (rerata + koefisien kemencengan x standar deviasi).

Curah Hujan Rancangan = $10^{(1.794 + 0 \times 0.184)}$

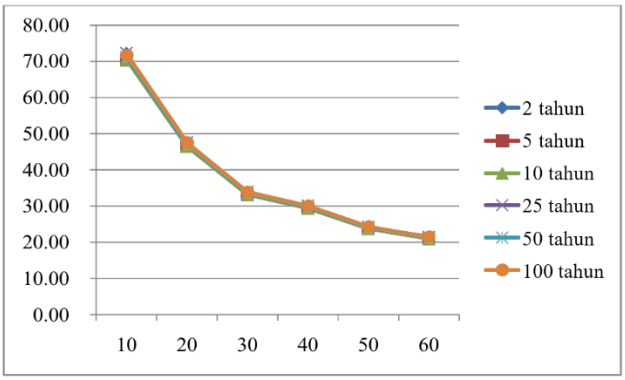
Curah Hujan Rancangan = 62.14 mm.

Tabel 4. Perhitungan curah hujan rancangan probabilitas.

No	Periode Ulang (tahun)	Probabilitas (%)	Faktor frekwensi	Log R rancangan	Curah hujan rancangan (mm)
1	2	50	0	1.794	63.55
2	5	20	0.842	1.949	61.99
3	10	10	1.282	2.030	62.14
4	25	4	1.751	2.117	63.55
5	50	2	2.054	2.173	62.67
6	100	1	2.326	2.223	62.92

Tabel 5. Intensitas hujan Metode Mononobe

t	63.55	61.99	62.14	63.55	62.67	62.92
(menit)	2	5	10	25	50	100
10	72.298	70.523	70.694	72.298	71.297	71.581
20	47.747	46.575	46.687	47.747	47.086	47.273
30	34.082	33.245	33.326	34.082	33.610	33.744
40	30.218	29.476	29.547	30.218	29.799	29.918
50	24.392	23.793	23.851	24.392	24.054	24.150
60	21.570	21.040	21.091	21.570	21.271	21.356



Gambar 4. Grafik intensitas hujan Metode Mononobe

Analisa Hidrolika

Analisa Debit Rancangan Existing Saluran Pengendali Banjir KEK Mandalika.

Perhitungan debit rencana di saluran pengendali banjir KEK Mandalika dengan menggunakan persamaan:

Perhitungan Koefisien Kemencengan Cs :

$$Cs = \frac{2x\ Tc}{(2xTc) + Ts}$$

$$Cs = \frac{2x90.900}{(2x90.900 + 3.989)}$$

$$Cs = 0$$

Dalam hal air buangan kotor, bagian kedua, persentase jumlah limbah yang dihasilkan setiap hari adalah 60% dari kebutuhan air bersih setiap hari, yaitu 150 liter per hari.

Q = Asumsi jumlah anggota × jumlah kebutuhan
= 18 × 150 lt/hari
= 2.700 lt/hari

Banyaknya air buangan (limbah) adalah :
Q = 60% 2.700
= 1,62 lt/hari
= 0.00162 m
= 0.162/(24*60*60) m3/detik
= 0. 162/ 86400 m3/detik
= 0.001875

Jadi, banyak debit buangan pada Sungai Ngolang adalah:
Q = Jumlah rumah Debit Buangan
= 9 0.001875
= 0,0168 m
= 0,0000168

Perhitungan Qrancangan Total :

Qranc total = Q1 + Q2
Qranc total = 0.772 + 0.0000168
Qranc total = 0.772

Perhitungan Q Rancangan Saluran :

$$Qranc = 0.002778 \times C \times I \times A$$

$$Qranc = 0.002778 \times 0.95 \times 62.14 \times 6.6$$

$$Qranc = 1.082\ m^3/dt.$$

Tabel 6. Perhitungan Debit Rancangan

Kode	NamaSaluran	A (km²)	I (mm/jam)	C	Ts (menit)	Tc (menit)	Cs	Q1 (m³/dt)	Q2 (m³/dt)	Qranc/sal	Qranc Total
Saluran A	Sungai Ngolang	6.6	62.14	0.95	3,989	90,900	0	1.082	0.0000168	1.082	1.082
Saluran B	Drainase Ngolang	0.32	62.14	0.95	1,412	87,480	0	0.052	0.0000917	0.052	0.053
Saluran C	Sungai Soker	2.72	62.14	0.95	15,75	321,66	0	0.446	0.000018	0.446	0.446
Saluran D	Drainase Pengendali Banjir	9.64	62.14	0.95	0,269	1,62	0	1.581	0.000302	1.581	1.581
Saluran E	Sungai Lagon	9.64	62.14	0.95	11,14	129,000	0	1.581	0.0000115	1.581	1.581

Perhitungan Kapasitas saluran pada saluran pengendali banjir KEK Mandalika :

Perhitungan luas penampang basah :

A = lebar saluran + Kedalaman air di saluran

A = 7.00 x 2.5 = 17.5 m

Perhitungan keliling basah saluran :

P = lebar saluran + (2 x Kedalaman air di saluran)

P = 7.00 + (2 x 2.5) = 12 m

Perhitungan jari-jari hidrolis

R = luas penampang basah : keliling basah saluran

R = 17.5 : 12

R = 1.458 m

Perhitungan kapasitas saluran :

Q = Kecepatan aliran x Luas penampang basah

Q = 1.89 x 17.5

Q = 32.99

Analisa Kapasitas Existing Saluran Pengendali Banjir KEK Mandalika

Perhitungan Kapasitas saluran pada saluran pengendali banjir di KEK Mandalika ditampilkan pada table 7 dibawah ini :

Tabel 7. Perhitungan kapasitas saluran.

Kode	Nama Saluran	L (m)	Tipe Saluran	Bentuk Penampang	Dimensi Saluran		s	n	A (m)	P (m)	R (m)	V (m/det)	Q (m3/dt)
					B	H							
Saluran A	Sungai Ngolang	127	Terbuka	Segi Empat	7.00	2.5	0.021	0.013	17.5	12	1.458	1.89	32.99
Saluran B	Drainase Ngolang	113	Terbuka	Segi Empat	2.00	1.2	0.024	0.013	2.4	4.4	0.545	0.75	1.8
Saluran C	Sungai Soker	350	Terbuka	Segi Empat	4.00	2.5	0.079	0.013	10	9	1.111	2.70	27
Saluran D	Drainase Pengendali Banjir	3.893	Terbuka & Tertutup	Segi Empat	10.00	2.5	0.0007	0.013	25	15	1.667	4.16	104
Saluran E	Sungai Lagon	324	Terbuka	Segi Empat	14.00	2.7	0.008	0.013	37.8	19,4	1.948	2.06	77.98

Kemampuan Kapasitas Saluran Pengendali Banjir KEK Mandalika

Kemampuan kapasitas saluran dapat dilakukan dengan membandingkan kapasitaas suatu saluran terhadap debit aliran

rencana yang akan masuk pada saluran. Nilai kemampuan kapasitas saluran dapat dilihat pada table 8. Jika Qrancangan > Qsaluran maka saluran tidak dapat memenuhi dan Jika Qrancangan < Qsaluran maka saluran masih memenuhi debit yg mengalir.

Nilai kemampuan kapasitas saluran dapat dihitung dengan membandingkan kapasitas saluran dengan debit aliran rencana yang akan masuk pada saluran. Nilai di table 8 menunjukkan bahwa jika Qrancangan lebih besar dari Qsaluran, saluran tidak dapat memenuhi debit, tetapi jika Qrancangan lebih rendah dari Qsaluran, saluran masih memenuhi debit.

Tabel 8. Kemampuan kapasitas saluran

Kode	Nama Saluran	L (m)	Q Ranc (m^3/det.)	Q Saluran (m3/det.)	Keterangan
Saluran A	Sungai Ngolang	127	1.082	32.99	Memenuhi
Saluran B	Drainase Ngolang	113	0.053	1.80	Memenuhi
Saluran C	Sungai Soker	350	0.446	27.00	Memenuhi
Saluran D	Drainase Pengendali Banjir	3.893	1.581	104.00	Memenuhi
Saluran E	Sungai Lagon	324	1.581	77.98	Memenuhi

Dari tabel hasil analisa kinerja saluran existing diatas diketahui bahwa kelima saluran pengendali banjir mampu menampung debit air hujan dan debit air kotor karena Qrancangan lebih kecil dari Qsaluran sehingga banjir dapat dikendalikan dengan baik.

4. KESIMPULAN

Pembangunan saluran pengendali banjir di Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Mandalika untuk melindungi sirkuit dari terjangan banjir dinyatakan efektif terbukti dengan hasil perhitungan Qrancangan < Qsaluran maka saluran masih memenuhi debit yg mengalir dan kemungkinannya kecil akan terjadi over popping.

Dimensi saluran yang sudah direncanakan telah terbukti dapat menampung debit limpasan yaitu: Sungai Ngolang dengan Qrancangan 0.772 m^3/dt lebih kecil dari pada 32.99 m^3/dt Qsaluran, Sungai Soker dengan Qrancangan 0.318 m3/dt lebih kecil dari pada 27.00 m3/dt Qsaluran, dan Sungai Lagon dengan Qrancangan 1.127 m^3/dt lebih kecil dari pada 77.98 m^3/dt Qsaluran, maka dapat dinyatakan memenuhi debit yang mengalir.

5. DAFTAR PUSTAKA

Ade Irawan, 2020, *Perhitungan Banjir Rancangan Menggunakan Metode Hss Gama I Pada DAS Simujur*, JPS Volume 2 Nomor 1, Februari 2020

A. N. Pramono & P. T. Saputro, 2020. *Efektivitas Kolam Retensi Terhadap Pengendalian Banjir*. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Unika Soegijapranata, Semarang, Universitas Katolik Soegijapranata

A. Reseda, 2012. *Kajian efektifitas pengendalian banjir di das garang*. Program Magister Teknik Sipil, Universitas Diponegoro Semarang.

D. Ferdian & A. Saggaff & Sarino, 2020. *Efektifitas Pengendalian Banjir Dengan Embung: Studi Kasus Taman Firdaus Universitas Sriwijaya*. Program Studi Magister Teknik Sipil FT UNSRI, Graha Bukit Asam, Jl. Srijaya Negara Bukit Besar Palembang

R. Wigati1, 2017. *Model Analisis Efektivitas Saluran Drainase Menggunakan Software Hec-Ras*. Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon

S. S. V. Zafani, B. Sujatmoko, M. Fauz, 2021, *Menentukan Debit Kala Ulang 25 Tahun Untuk Simulasi Profil Muka Air Di Sungai Tande*, Jom FTEKNIK Volume 8 - Edisi 2 Juli s/d Desember 2021

Sobriyah, A. R. I. Setiawan, 2016, *Tinjauan Debit Banjir Kala Ulang Terhadap Tinggi Muka Air Waduk Krisak Kabupaten Wonogiri*, e-Jurnal MATRIKS TEKNIK SIPIL/September 2016/706

S. Ginting & W. M Putuhena, 2016. *Efektivitas Infrastruktur Terpadu Bawah Tanah (Itbt) Untuk Pengendalian Banjir Jakarta*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air

EVALUASI HUJAN SATELIT GMP-IMERG DI DAS HALMAHERA SELATAN UNTUK PREDIKSI BANJIR DAN KEKERINGAN

Ni Made Candra Partarini1[1*], Yayang Saputra[2], Wilhelmina Tjahyadi[1]

[1]Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No.44, Janti, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281*
***e-mail**: made.candra@uajy.ac.id*
[1]Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No.44, Janti, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281
e-mail:220219089@students.uajy.ac.id
[2] Balai Wilayah Sungai Maluku Utara, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jl. Jati Besar No.443, Jati, Kec. Ternate Selatan, Kota Ternate, Maluku Utara
e-mail: yayangsaputra@pu.go.id

ABSTRAK

Ketersediaan data hidrologi menjadi salah satu tantangan dalam pengelolaan sumber daya air (PSDA). Perkembangan penggunaan data curah hujan satelit telah memberikan solusi dengan keunggulan baik dalam skala spasial maupun temporal. Penggunaan data satelit telah banyak digunakan dalam berbagai kepentingan PSDA di berbagai negara khususnya dalam prediksi banjir dan kekeringan. Pengambilan data hujan satelit masih terus mengalami perkembangan sehingga keakuratannya perlu diuji sebelum digunakan dalam PSDA. Penelitian ini bertujuan untuk mengoreksi dan memvalidasi data curah hujan satelit dari *Global Precipitation Measurement - Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM* (GPM-IMERG) terhadap data observasi untuk mengetahui kesesuaian penggunaan data curah hujan satelit. Metode pelaksanaan penelitian ini akan dilaksanakan dengan melakukan evaluasi terhadap data hujan satelit dengan mambandingkan data hujan satelit dan hujan pengamatan pada beberapa lokasi stasiun hujan. Perbandingan dilaksanakan pada setiap stasiun hujan yang tersebar pada wilayah sungai (WS) Halmahera Selatan. Metode evaluasi menggunakan metrik penilaian kinerja satelit berupa *Probability of Detection* (POD), *False Alarm Ratio* (FAR), *Critical Success Index* (CSI), dan akurasi (*fraction correct*). Penelitian dilakukan terhadap data harian sepanjang rentang tahun tertentu serta data harian dengan kategori bulan basah dan bulan kering. Hasil analisis evaluasi ini menunjukan bahwa kinerja data hujan satelit GPM-IMERG memiliki kinerja yang baik ditinjau dari nilai POD dengan rentang 0,8 – 1. Nilai FAR memiliki rentang 0,1 – 0,61, serta nilai CSI dan Akurasi berkisar antara 0,40 – 0,95. Berdasarkan hasil analisis metrik evaluasi ini, dapat disimpulkan bahwa data GPM-IMERG memiliki kinerja yang baik dalam memprediksi data hujan di WS Halmahera Selatan.

Kata kunci: Banjir, kekeringan, PSDA, data hujan, satelit

1. PENDAHULUAN

Curah hujan rata-rata mengacu pada jumlah rata-rata curah hujan selama periode tertentu pada suatu daerah tangkapan air, sehingga sangat penting untuk perencanaan di bidang pertanian, kehutanan, hidrologi, dan pembangunan infrastruktur (Gregory, 2023). Pengukur curah hujan konvensional adalah satu-satunya instrumen yang digunakan untuk merekam curah hujan. Data ini dianggap akurat dan dapat diandalkan pada skala regional dan global karena variabilitas temporal curah hujan yang tinggi. Namun, distribusi temporal dan spasial pengukur curah hujan tidak merata, sehingga sulit untuk menentukan berapa banyak curah hujan di bumi, seringkali tidak memadai untuk studi hidrologi, terutama di daerah dengan heterogenitas curah hujan (Nashwan et al., 2019; Shiru et al., 2018). Pendekatan – pendekatan hujan rata-rata wilayah seringkali digunakan sebagai pendekatan yang dianggap dapat mendekati nilai hujan rerata yang jatuh pada daerah tangkapan. Pendekatan ini memiliki potensi ketidakpastian yang dapat berasal dari berbagai sumber yang mempengaruhi akurasi dan keandalan hasil estimasi seperti ketersediaan data hujan di lapangan (Muthusamy et al., 2017; Prakash et al., 2019).

Teknologi penginderaan jauh mulai dilirik untuk pengamatan curah hujan rerata wilayah sehingga dapat membantu mengatasi kesulitan estimasi data hujan rata-rata untuk sumber daya air. Keunggulan dari estimasi curah hujan berbasis satelit berupa data yang bersifat spasial, peningkatan pemahaman tentang sistem curah hujan, dan kemampuan untuk mencakup area di mana stasiun pengamatan hujan konvensional tidak tersedia (Li et al., 2022). Hal ini dapat meningkatkan estimasi curah hujan rerata wilayah, terutama di daerah dengan pengamatan lapangan yang terbatas (Kidd & Levizzani, 2022).

Perkembangan teknologi satelit untuk pemantauan curah hujan telah secara signifikan memajukan pemahaman tentang pola curah hujan dan meningkatkan akurasi pengukuran curah hujan (Milani & Kidd, 2023). Akurasi, ketidakpastian, dan resolusi spasial tetap ada untuk data hujan satelit sehingga diperlukan penelitian berkelanjutan dan peningkatan estimasi curah hujan berbasis satelit (Masood et al., 2021). Berbagai penelitian telah dikembangkan untuk menguji akurasi data satelit. Penelitian terhadap data satelit *The Climate Prediction Center MORPHing Technique* (CMORPH)

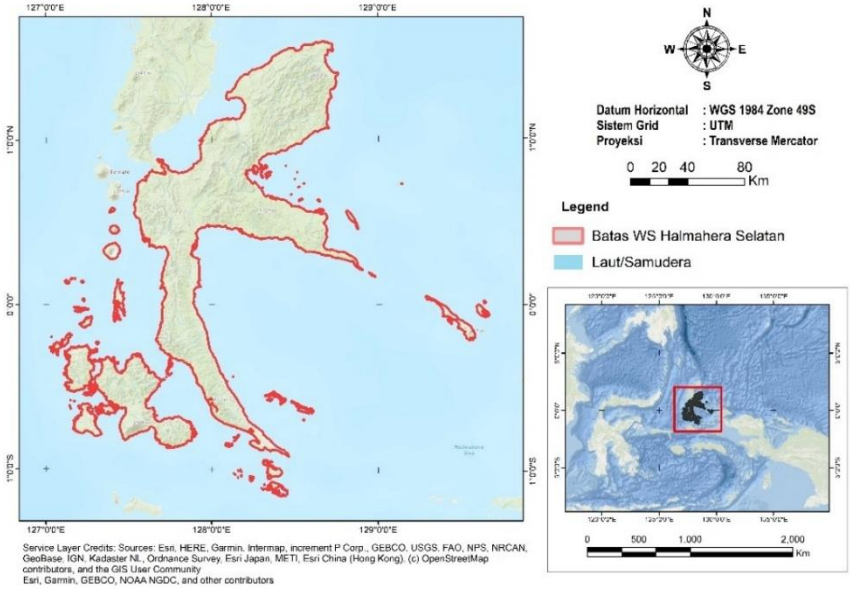
dan *Integrated Multi-SatellitE Retrievals for the Global Precipitation Mission* (GPM) algoritma (IMERG) melihat kinerja data curah hujan berbasis satelit di Uni Emirat Arab. Hasil penelitian ini menemukan bahwa kedua satelit memiliki potensi besar untuk mengisi kesenjangan spasial dalam pengamatan curah hujan dan meningkatkan resolusi temporal. Peningkatan kinerja diperlukan terkait perkiraan yang berlebihan dan meremehkan jumlah curah hujan yang kecil dan besar, masing-masing (Alsumaiti et al., 2020). Gulakhmadov et al., (2023) menguji produk curah hujan IMERG dan PERSIANN untuk Domain Pegunungan Tajikistan, Asia Tengah. Penelitian menunjukkan bahwa data IMERG direkomendasikan untuk aplikasi hidro-iklim di atas domain pegunungan Asia Tengah. Analisis evaluasi kinerja satelit diteliti pada produk curah hujan satelit seperti CHIRPSv2, CMORPH, dan IMERG-06 untuk estimasi curah hujan. Penelitian ini berfokus pada kinerja deteksi dan estimasi curah hujan setiap satelit. Hasil penelitian ini menunjukan bahwa semua data menunjukkan perkiraan curah hujan yang terlalu rendah. Berdasarkan keempat data tersebut, data IMERG-06 menunjukkan kinerja unggul dalam berbagai metrik dan dapat diandalkan untuk analisis iklim dan hidrologi (Muthusamy et al., 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan dalam penggunaan data satelit di wilayah sungai (WS) Halmahera Selatan. Penelitian ini akan menjadi pendekatan pertama untuk membandingkan deteksi dan memperkirakan kinerja satelit khususnya satelit GPM-IMERG. Evaluasi kinerja satelit ini diharapkan dapat menjadi acuan bahwa seumber data ini dapat digunakan di wilayah studi untuk berbagai kepentingan terutapa dalam upaya pengelolaan sumber daya air. Penelitian ini akan melibatkan beberapa satsiun berbasis lapangan yang telah ada disekitar WS Halmahera Selatan dengan menggunakan berbagai metode penilaian kinerja satelit.

2. METODOLOGI

Lokasi Penelitian

WS Halmahera Selatan memiliki luas sebesar 15.695,79 km^2 yang teletak di wilayah Provinsi Maluku Utara yang mencakup Kabupaten Halmahera Timur, Tidore Kepulauan, Halmahera Tengah dan Halmahera Selatan. Pengelolaan bidang sumber daya air (SDA) dilakukan oleh Balai Wilayah Sungai Maluku Utara dengan melaksanakan berbagai upaya pengelolaan, seperti perencanaan, pelaksanaan, operasi, dan pemeliharaan infrastruktur sumber daya air. Batas WS Halmahera Selatan dapat diperhatikan pada Gambar 1.

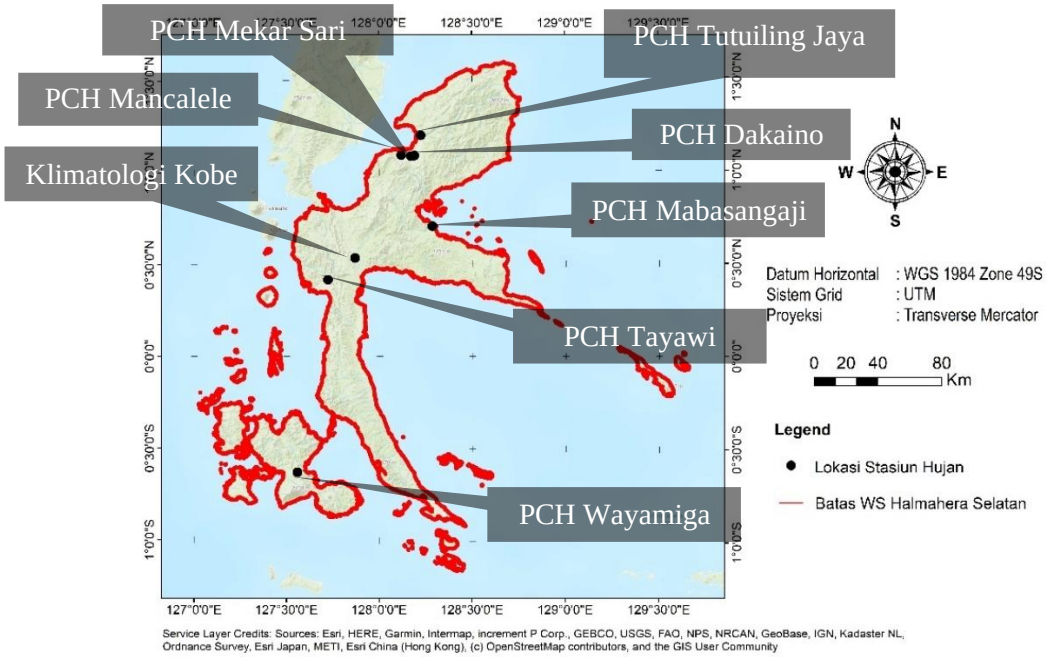


Gambar 1. Batas WS Halmahera Selatan

Kebutuhan Data

Evaluasi data hujan dalam penelitian ini menggunakan dua jenis data hujan seperti, data hujan pengamatan lapangan yang berasal dari stasiun hujan dan data hujan satelit dengan skala harian. Data hujan pengamatan diwakilkan dengan 8 stasiun yang tersebar diseluruh WS seperti yang ditunjukan pada Gambar 2. Data hujan satelit yang digunakan berupa data hujan sateli GPM-IMERG (*Global Precipitation Measurement Mission - The Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM*). Data GPM-IMERG dapat diunduh pada website https://gpm.nasa.gov/data/imerg dan https://giovanni.gsfc.nasa.gov/ giovanni/ dengan resolusi spasial berupa grid berukuran 0,1°×0,1°, tersedia dalam periode data 3-jam, harian, 5 hari, dan bulanan. Lokasi pemilihan grid data hujan satelit menyesuaikan lokasi tiap stasiun hujan. Panjang periode waktu tiap stasiun berbeda-beda sesuai dengan ketersediaan data seperti yang dapat

diperhatikan pada



Gambar 2. Batas WS Halmahera Selatan

Tabel 1. Panjang Data Tiap Stasiun Hujan

Nama Stasiun	Jenis Data	Panjang Data
Klimatologi Kobe	Data harian	2009 - 2023
PCH Wayamiga	Data harian	2009 - 2023
PCH Tutuiling Jaya	Data harian	2011 - 2023
PCH Maba Sangaji	Data harian	2017 - 2023
PCH Tayawi	Data harian	2017 - 2023
PCH Mekarsari	Data harian	2017 - 2023
PCH Dakaino	Data harian	2018 - 2023
PCH Mancalele	Data harian	2018 - 2023

Metode Analisis

Analisis evaluasi kinerja data satelit diawali dengan penilaian atau analisis kategoris (*categorical analysis*). Pada tahap ini, data hujan satelit melibatkan evaluasi kinerja estimasi curah hujan berbasis satelit menggunakan berbagai metrik statistik untuk mengklasifikasikan dan mendeteksi kejadian curah hujan. Adapun analisis yang digunakan berupa *Probability of Detection* (POD), *False Alarm Ratio* (FAR), *Critical Success Index* (CSI), dan akurasi (*fraction correct*). Metode statistik ini banyak diterapkan dalam penilaian kategori statistik kinerja data satelit (Baig et al., 2022; Goudarzi et al., 2020). Metode statistik yang digunakan untuk evaluasi keakuratan data satelit curah hujan, merupakan tantangan utama dalam menilai akurasi data satelit curah hujan, dan implikasi metrik ini terhadap pengambilan keputusan. Analisis dan prakiraan data satelit curah hujan merupakan pertimbangan penting dalam pemanfaatan pengambilan curah hujan berbasis satelit (Anjum et al., 2018; Mahmoud et al., 2018). Penilaian tiap metrik mengguanakan pendekatan seperti pada Tabel 2. Nilai a menyatakan terdapat besaran hujan yang terekam pada kedua jenis pengukur hujan (stasiun dan satelit), b adalah jumlah kejadian curah hujan palsu terdeteksi oleh satelit namun tidak terekam pada stasiun pengamatan lapangan, sedangkan c adalah jumlah curah hujan tidak terekam oleh satelit namun terekam oleh stasiun di lapangan, dan d peristiwa tanpa curah hujan benar terdeteksi (Taye et al., 2023).

Tabel 2. Tabel Persamaan Metrik

Persamaan		Rentang hasil	Nilai maksimal
$POD = \frac{a}{a+c}$	(1)	0 sampai 1	1

Persamaan		Rentang hasil	Nilai maksimal
$FAR = \frac{b}{a+b}$	(2)	0 sampai 1	0
$CSI = \frac{a}{a+b+c}$	(3)	0 sampai 1	1
$\textbf{Akurasi} = \frac{\mathbf{a+d}}{\mathbf{total}}$	(4)	0 sampai 1	1

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi kinerja data satelit terhadap data hujan dalam hal ini menggunakan beberapa metrik dengan melibatkan data harian serta evaluasi data tiap musim. Pembagian musim hujan dan musim kemarau pada WS Halmahera Selatan merujuk kepada peta sebaran pola curah hujan Indonesia yang dikelurkan oleh BMKG. Berdasarkan peta tersebut, WS ini memiliki tipe hujan equatorial dimana curah hujan relatif tinggi dan terjadi sepanjang tahun. Secara umum di Indonesia mengalami musim kemarau dari Bulan Mei hingga Oktober sedangkan musim penghujan pada November – April (Bafdal, 2016; Junnaedhi et al., 2023).

Evaluasi kemampuan satelit dapat merekam kejadian hujan dilakukan dengan menggunakan metrik analisis kategori yang menghasilkan nilai POD, FAR, CSI, dan Akurasi seperti pada Tabel 3. Penilaian kinerja satelit ini dilakukan dengan skala hujan harian dengan rentang tahun yang tersedia serta dikelompokkan pula data harian pada bulan basah, dan bulan kering. Hasil analisis menunjukan setiap stasiun memiliki nilai POD, FAR, CSI, dan Akurasi yg berbeda. Nilai POD pada setiap stasiun relatif baik dalam berbagai skala data terutama pada Stasiun PCH Wayagiwa. Stasiun ini memiliki rentang data dari tahun 2009 – 2023 dengan nilai POD 1 yang merupakan nilai maksimum untuk diberikan kategori memiliki kinerja baik. Metrik ini menunjukkan seberapa baik data satelit dapat mendeteksi kejadian curah hujan sebenarnya. Beberapa studi menunjukan produk satelit seperti CMORPH dan IMERG memiliki nilai POD yang bervariasi tergantung wilayah dan kondisi. Misalnya, IMERG memiliki POD 0,80 di beberapa wilayah, yang menunjukkan kemampuan deteksi yang baik (Jiang et al., 2018). Berdasarkan hasil analisis nilai POD pada setiap stasiun menunjukan bahwa analisis data POD untuk data harian pada bulan kering memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan pada bulan basah. Namun secara keseluruhan hasil analisis menunjukan nilai POD berkisar 0,81 – 0,95 yang masih tergolong baik karena nilai tersebut mendekati nilai 1 pada seluruh kategori.

Tabel 3. Hasil Analisis Evaluasi Kinerja Hujan Harian, Bulan Basah, dan Bulan Kering

Nama Stasiun	Kategori	POD	FAR	CSI	Akurasi
Klimatologi Kobe	Hujan Harian	0,84	0,56	0,41	0,45
	Bulan basah	0,81	0,56	0,40	0,45
	Bulan kering	0,86	0,55	0,42	0,46
PCH Wayamiga	Hujan Harian	1,00	0,10	0,90	0,91
	Bulan basah	1,00	0,10	0,90	0,92
	Bulan kering	1,00	0,10	0,89	0,91
PCH Tutuiling Jaya	Hujan Harian	0,90	0,55	0,43	0,49
	Bulan basah	0,90	0,54	0,44	0,52
	Bulan kering	0,90	0,57	0,41	0,47
PCH Maba Sangaji	Hujan Harian	0,91	0,50	0,48	0,53
	Bulan basah	0,92	0,50	0,48	0,54
	Bulan kering	0,91	0,50	0,48	0,53
PCH Tayawi	Hujan Harian	0,94	0,57	0,42	0,49
	Bulan basah	0,93	0,53	0,45	0,53
	Bulan kering	0,95	0,61	0,38	0,45
PCH Mekarsari	Hujan Harian	0,94	0,55	0,44	0,51
	Bulan basah	0,94	0,54	0,44	0,53
	Bulan kering	0,94	0,56	0,43	0,50
PCH Dakaino	Hujan Harian	0,91	0,41	0,56	0,61
	Bulan basah	0,91	0,39	0,57	0,63
	Bulan kering	0,91	0,43	0,54	0,59
PCH Mancalele	Hujan Harian	0,91	0,58	0,40	0,48
	Bulan basah	0,91	0,58	0,41	0,48
	Bulan kering	0,92	0,59	0,40	0,48

Kategori FAR mengukur frekuensi alarm palsu relatif terhadap jumlah total kejadian yang terdeteksi. Frekuensi palsu memiliki arti, data satelit merekam kejadian hujan sedangkan stasiun hujan di lapangan tidak mencatat adanya hujan Click or tap here to enter text.. Hal ini sangat mungkin terjadi, mengingat satelit memiliki kemampuan mendeteksi potensi hujan di atmosfer.. Nilai FAR yang diperoleh ialah sekitar rentang rerata 0,4 – 0,50 yang mengindikasikan bahwa data satelit masih sangat rentan terhadap perekaman palsu. GPM-IMERG dan produk satelit lainnya sering kali menunjukkan FAR yang lebih tinggi dalam kondisi tertentu, seperti konsentrasi aerosol di atmosfer yang tinggi (Lu, 2022).

Metrik CSI menggabungkan POD dan FAR untuk memberikan gambaran kinerja deteksi yang seimbang. Proposi perekaman palsu dibandingkan dengan semua pendeteksian positif. Evaluasi kinerja satelit melalui metrik CSI menunjukan rentang nilai sebesar 0,4 – 0,50. Nilai ini relatif kecil dengan nilai maksimum sebesar 1. Misalnya, di Etiopia, beberapa produk satelit mencapai skor CSI di atas 0,5, yang menunjukkan keberhasilan moderat dalam menangkap peristiwa curah hujan (Taye et al., 2023). Selain itu, penelitian lain menunjukan nilai CSI sebesar 0,70 untuk data hujan harian di wilayah Sumatera (Ramadhan et al., 2024). Nilai CSI paling tinggi ditunjukan oleh Stasiun Wayamiga dengan nilai 0,90 pada data harian biasa dan data harian bulan basah serta pada bulan kering walaupun memiliki nilai lebih rendah.

Penilaian kinerja berdasarkan metrik akurasi yang mengevaluasi kebenaran data satelit secara keseluruhan. Penilaian ini dapat menyatakan kemampuan satelit, misalnya dalam menangkap pola curah hujan secara umum, namun sering kali kesulitan menghadapi kejadian ekstrem dan kondisi regional tertentu. Penelitian ini menunjukan bahwa nilai akurasi berkisar 0,45 paling rendah pada perbandingan data harian stasiun Klimatologi Kobe dan pada bulan kering stasiun Tayawi. Nilai tertinggi pada stasiun Wayamiga yang menujukan nilai 0,9 pada semua ketegori. Akurasi yang relative baik memang sering kali diperoleh dalam menguji kinerja data GPM-IMERG dengan rentang nilai diatas dari 0,7 (Taye et al., 2023).

Kinerja satelit dengan 4 metrik statistik diatas dengan melihat performa perekaman harian secara umum serta data harian pada kondisi bulan basah dan kering. Berdasarkan hasil analisis tersebut diatas, diperoleh bahwa performa satelit GPM-IMERG memiliki performa yang sama dalam merekam berbagai kondisi hujan. Hasil yang signifikan sangat baik ditunjukan oleh Stasiun Wayamiga sedangkan stasiun lainnya memiliki nilai yg relative lebih rendah namun masih tergolong menunjukan justifikasi yang baik terhadap kinerja data satelit. Penelitian ini dapat digunakan sebagai justifikasi awal dalam menyatakan data satelit GPM-IMERG dapat memberikan gambaran yang baik dalam memprediksi kondisi hujan baik dalam kondisi normal, basah, dan kering. Data-data ini sangat penting dalam berbagai kepentingan pengelolaan SDA khususnya pada prediksi banjir dan kekeringan.

4. KESIMPULAN

Evaluasi kinerja data satelit GPM-IMERG terhadap data hujan di wilayah studi menunjukkan hasil yang cukup baik, terutama untuk stasiun Wayamiga. Metrik POD, FAR, CSI, dan akurasi yang digunakan menunjukkan bahwa satelit mampu mendeteksi kejadian hujan dengan akurasi yang memadai, terutama dalam kondisi normal dan basah bahkan kondisi kering. Kemampuan deteksi satelit GPM-IMERG diwakilkan oleh nilai POD yang tinggi menunjukkan kemampuan satelit dalam mendeteksi kejadian hujan yang sebenarnya terutama di stasiun Wayamiga dengan nilai 1. Tingkat kesalahan deteksi berdasarkan nilai FAR yang relatif rendah mengindikasikan bahwa satelit tidak terlalu sering mendeteksi hujan palsu. Namun, masih ada potensi terjadinya *false alarm*, terutama dalam kondisi tertentu seperti konsentrasi aerosol yang tinggi pada atmosfer. Kinerja menyeluruh satelit dinyatakan oleh metrik CSI yang menggabungkan POD dan FAR menunjukkan kinerja deteksi yang seimbang. Meskipun nilai CSI masih bisa ditingkatkan, namun secara umum kinerja satelit sudah cukup baik. Nilai akurasi yang tinggi menunjukkan bahwa data satelit dapat memberikan gambaran yang baik mengenai pola curah hujan secara umum.

Analisis lebih lanjut masih diperlukan untuk mengetahui ketepatan nilai yang terekam oleh data satelit. Penelitian di masa depan diharapkan dapat mengakomodir kebutuhan ini guna mendapat gambaran yang lebih komprehensif terkait perekaman data satelit khususnya oleh satelit GPM-IMERG. Selain itu, penilaian kinerja data satelit dapat menambah sumber data satelit yang lebih beragam. Penilaian pada berbagai sumber data satelit memungkinkan adanya perbandingan guna memperoleh kinerja satelit paling baik dalam memprediksi curah hujan khususnya pada WS Halmahera Selatan.

DAFTAR PUSTAKA

Alsumaiti, T. S., Hussein, K., Ghebreyesus, D. T., & Sharif, H. O. (2020). Performance of the CMORPH and GPM IMERG products over the United Arab Emirates. *Remote Sensing*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/RS12091426

Anjum, M. N., Ding, Y., Shangguan, D., Ahmad, I., Ijaz, M. W., Farid, H. U., Yagoub, Y. E., Zaman, M., & Adnan, M. (2018). Performance evaluation of latest integrated multi-satellite retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) over the northern highlands of Pakistan. *Atmospheric Research*, *205*, 134–146. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.02.010

Bafdal, N. (2016). *Rainfall Harvesting as Resources of Self Watering Fertigation System with Various*

Growing Medias. *6*(5).
Baig, F., Abrar, M., Chen, H., & Sherif, M. (2022). Rainfall Consistency, Variability, and Concentration over the UAE: Satellite Precipitation Products vs. Rain Gauge Observations. *Remote Sensing*, *14*(22). https://doi.org/10.3390/rs14225827
Goudarzi, F. M., Sarraf, A., & Ahmadi, H. (2020). Assessment of SM2RAIN-ASCAT and CMORPH satellite precipitation products over Maharlu Lake basin in Iran. *Water Science and Technology: Water Supply*, *20*(5), 1799–1806. https://doi.org/10.2166/ws.2020.088
Gregory, S. (2023). Rainfall reliability. In *Environment and Land Use in Africa* (pp. 57–82).
Gulakhmadov, M., Chen, X., Gulakhmadov, A., Nadeem, M. U., Gulahmadov, N., & Liu, T. (2023). Performance Analysis of Precipitation Datasets at Multiple Spatio-Temporal Scales over Dense Gauge Network in Mountainous Domain of Tajikistan, Central Asia. *Remote Sensing*, *15*(5). https://doi.org/10.3390/rs15051420
Jiang, Q., Li, W., Wen, J., Qiu, C., Sun, W., Fang, Q., Xu, M., & Tan, J. (2018). Accuracy evaluation of two high-resolution satellite-based rainfall products: TRMM 3B42V7 and CMORPH in Shanghai. *Water (Switzerland)*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/w10010040
Junnaedhi, I. D. G. A., Inagaki, A., Ferdiansyah, M. R., & Kanda, M. (2023). Seasonal sea breeze variation analysis based on multi-year near-surface observations in Jakarta, Indonesia. *International Journal of Climatology*, *43*(11), 5177–5195. https://doi.org/10.1002/joc.8139
Kidd, C., & Levizzani, V. (2022). Satellite rainfall estimation. In *Rainfall: Modeling, Measurement and Applications* (pp. 135–170).
Li, R., Qi, D., Zhang, Y., & Wang, K. (2022). A new pixel-to-object method for evaluating the capability of the GPM IMERG product to quantify precipitation systems. *Journal of Hydrology*, *613*. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128476
Lu, N. (2022). Evaluation of IMERG Precipitation Products in the Southeast Costal Urban Region of China. *Remote Sensing*, *14*(19). https://doi.org/10.3390/rs14194947
Mahmoud, M. T., Al-Zahrani, M. A., & Sharif, H. O. (2018). Assessment of global precipitation measurement satellite products over Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, *559*, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.015
Masood, M., Nabi, G., Babur, M., Azhar, A. H., & Ullah, M. K. (2021). Disintegration of uncertainties associated with real-time multi-satellite precipitation products in diverse topographic and climatic area in Pakistan. *Journal of Mountain Science*, *18*(March 2021), 716–734.
Milani, L., & Kidd, C. (2023). The State of Precipitation Measurements at Mid-to-High Latitudes. In *Atmosphere* (Vol. 14, Issue 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/atmos14111677
Muthusamy, M., Schellart, A., Tait, S., & Heuvelink, G. B. M. (2017). Geostatistical upscaling of rain gauge data to support uncertainty analysis of lumped urban hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*(2), 1077–1091. https://doi.org/10.5194/hess-21-1077-2017
Nashwan, M. S., Shahid, S., & Wang, X. (2019). Assessment of satellite-based precipitation measurement products over the hot desert climate of Egypt. *Remote Sensing*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/rs11050555
Prakash, S., Seshadri, A., Srinivasan, J., & Pai, D. S. (2019). A new parameter to assess impact of rain gauge density on uncertainty in the estimate of monthly rainfall over India. *Journal of Hydrometeorology*, *20*(5), 821–832. https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0161.1
Ramadhan, R., Marzuki, M., Suryanto, W., Sholihun, S., Yusnaini, H., Hashiguchi, H., & Shimomai, T. (2024). Bias Correction of IMERG Data in the Mountainous Areas of Sumatra Based on A Single Gauge Observation. *Trends in Sciences*, *21*(4). https://doi.org/10.48048/tis.2024.7592
Shiru, M. S., Shahid, S., Alias, N., & Chung, E. S. (2018). Trend analysis of droughts during crop growing seasons of Nigeria. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(3). https://doi.org/10.3390/su10030871
Taye, M., Mengistu, D., & Sahlu, D. (2023). Performance evaluation of multiple satellite rainfall data sets in central highlands of Abbay Basin, Ethiopia. *European Journal of Remote Sensing*, *56*(1). https://doi.org/10.1080/22797254.2023.2233686

EVALUASI KAPASITAS PENAMPANG SUNGAI OESAO AKIBAT DEBIT BANJIR PADA BERBAGAI KALA ULANG

Denik Sri Krisnayanti[1], Partogi H. Simatupang[2], Febrian B Perang[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jalan Adisucipto, Kupang

e-mail: (denik.krisnayanti@staf.undana.ac.id)

[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jalan Adisucipto, Kupang

e-mail: (partogihsimatupang@gmail.com)

[3] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jalan Adisucipto, Kupang

e-mail: (brianp2114@yahoo.com)

ABSTRAK

Daerah aliran sungai oesao memiliki luas sebesar 5 km^2 dan memiliki panjang 30 km. Sungai ini sering terjadi banjir Karen kondisinya yang tidak terawat dengan baik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui debit banjir yang terjadi dan cara memperbaiki sungai tersebut agar tidak terjadi banjir di kemudian hari. Metode penelitian yang dipakai untuk menghitung debit banjir adalah HSS Nakayasu dan untuk kapsitas Tampung adalah aplikasi HECRAS. Dari hasil analisis dengan metode HSS Nakayasu didapatkan Debit banjir yang terjadi adalah 86,506 m^3/det untuk kala ulang 100 tahun dan dengan menggunakan HECRAS, kapasitas tampung adalah 52,98 m^3/det sedangkan kapasitas tampung dari pengkuran langsung sungai adalah 13,909 m^3/det. Selanjutnya dilakukan perbaikan pada alur sungai sehingga kapasitas tampung sungai dapat menampung debit banjir yang terjadi.
Kata Kunci: Evaluasi, Kapasitas Penampang, Sungai, Debit Banjir, Kala Ulang.

PEDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia sampai saat ini. Banjir dapat disebabkan oleh berbagai macam hal, diantaranya ialah curah hujan yang tinggi penyempitan ruas sungai atau pendangkalan akibat sedimentasi. Sungai Oesao terletak di Kupang Timur Kabupeten Kupang memilki luas 40.2 ha dan panjang 30 km. Sungai Oesao sering menimbulkan banjir atau genangan air di musim hujan, titik luapan banjir berada pada jarak 9.9 km dari muara dimana penampang Sungai memiliki dimensi lebar 13,40 m. Hal ini disebabkan karena Sungai Oesao mengalami penyempitan serta pendangkalan pada bagian hilir sungai akibat sedimentasi, sehingga debit air yang di tampung oleh Sungai Oesao tersebut menyebar dan langsung membanjiri atau menggenangi perumahan penduduk, lahan pertanian dan sarana jalan pada bagian hilirnya. Dengan demikian pada Sungai Oesao perlu dibuat pembuangan akhir atau pelebaran daerah aliran Sungai, sehingga debit banjir yang ditampung oleh Sungai Oesao tidak langsung membanjiri bagian hilirnya dan mengakibatkan kerugian harta benda maupun nyawa, serta membuat dan mempertahankan penampang basah yang cukup memadai untuk dapat menampung besarnya debit banjir yang terjadi. Cara yang dilakukan adalah membandingkan debit banjir yang terjadi dan kapsaitas tampung dari Sungai Oesao, apabila kapasitas tampung tidak lebih kecil dari debit banjir yang terjadi maka perlu dilakukan normalisasi agar kedepannya Sungai Oesao dapat menampung debit banjir yang ada.

Metodologi Penelitian

Analisis Hidrologi

Analisa hidrologi sangat dibutuhkan dalam perencanaan bangunan banjir. Analisa Hidrologi dilakukan untuk menentukan besarnya debit banjir rencana (*Design Flood*) sebagian besar yang sangat diperlukan untuk merencanakan dan menetapkan dimensi dari bangunan pengendali banjir atau genangan air. Dengan semakin berkembangnya ilmu bidang hidrologi maka sangat banyak metode perhitungan yang sudah diperkenalkan serta dikembangkan, secara garis besarnya perhitungan hidrologi terdiri dari 3 (tiga) tahapan penting antara lain sebagai berikut:

1. Perhitungan curah hujan maksimum rencana.

2. Perhitungan debit banjir rencana.
3. Pengujian hasil perhitungan debit banjir rencana.

Analisa Curah Hujan

Besarnya banjir yang terjadi dalam suatu daerah biasanya diakibatkan oleh hujan yang merata dalam Daerah Aliran Sungai (DAS) intensitas yang tinggi oleh karena itu perlu dianalisis curah hujan yang mungkin terjadi pada wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) berdasarkan kala ulang tertentu.

1. Hujan Rata-rata Untuk Suatu Daerah Aliran Sungai.

   Rata-rata aritmatika adalah jumlah hujan dari beberapa pos pencatat hujan berbanding dengan jumlah dari pos pencatata hujan tersebut. Cara ini dapat digunakan bila curah hujannya merata diseluruh Daerah Aliran Sungai(DAS).

   $R= 1/n (R1+R2+R3+.....+Rn)$ (1)

   Ketengaran:

   R = Curah hujan rencana DAS (mm)
   N = Jumlah titik-titik pengamatan
   R1, R2, Rn = Curah hujan stasiun refensi (mm)

   Hasil yang diperoleh dengan cara ini tidak berbeda jauh dari hasil yang diperoleh dengan cara lain, jika titik pengamatan itu banyak dan tersebar merata diseluruh daerah tersebut.
2. Pemilihan metode Distribusi Hujan.

   Untuk keperluan analisa probabilitas banjir biasanya dipakai satu dari beberapa jenis distribusi antara lain: Distribusi Normal, Distribusi Log Normal, Distribusi Log Person Tipe III, dan Distribusi Gumbel. Dalam pemilihan dsitribusi hujan yang dipakai dalam perhitungan intensitas curah hujan dengan kala ulang yang ditetapkan, diambil nilai terbesar diantara curah hujan maksimum rencana dari beberapa macam distribusi, adapun penjabaran dari rumus hujan rancangan untuk masing-masing distribusi adalah:

   A Distribusi Normal

   Distribusi normal sering juga disebut distribusi *Gauss*. Persamaannya dapat dihitung dengan menggunakaan rumus sebagai berikut:

   $X_T = \bar{X} + K_T . S$ (2)

   Keterangan:

   X_T = Perkiraan nilai pada periode ulang T tahun
   $\bar{X}$ = Nilai rata-rata hitung
   K_T = Faktor frekuensi
   S = Standar Deviasi

   B. Distribusi Log Normal

   Distribusi Log Normal merupakan hasil transformasi dari distribusi normal, dimana nilai variasi diubah menjadi nilai logaritma. Rumus yang digunakan sebagai berikut:

   $\text{Log } X_T = \text{Log } \bar{X} + (K_T . S . \log x)$ (3)

   atau

   $Y_T = \bar{Y} + (K_T . S \log X)$ (4)

   Keterengan:

   Y_T = Perkiraan nilai pada periode ulang T tahun
   $\bar{Y}$ = Nilai rata-rata logaritma hitung
   K_T = Faktor frekuensi
   S log X = Standar deviasi nilai logaritma

Tabel 1 Hubungan Faktor Frekuensi Ditribusi Normal (K_T) Dengan Periode Ulang

Periode Ulang (tahun)

2	5	10	20	50	100
0	0,84	1,28	1,64	2,05	2,3

Sumber: Suiripin, 2004

C. Distribusi Log Normal

Distribusi Log Normal merupakan hasil transformasi dari distribusi normal, dimana nilai variasi diubah menjadi nilai logaritma. Rumus yang digunakan sebagai berikut:

$\text{Log } X_T = \text{Log } \overline{X} + (K_T \,.\, S \,.\, \log x)$. (5)

atau

$Y_T = \overline{Y} + (K_T \,.\, S \log X)$ (6)

Keterangan:

Y_T = Perkiraan nilai pada periode ulang T tahun

$\overline{Y}$ = Nilai rata-rata logaritma hitung

K_T = Faktor frekuensi

S log X = Standar deviasi nilai logaritma

Tabel 2 Hubungan *Reduced Mean* (Y_n) dengan banyaknya sampel (n)

n	Yn
20	0,5236

Sumber: Soewarno, 1995.

Tabel 1 Hubungan *Reduced* Standar Deviasi (Sn) dengan banyaknya sampel (n)

n	Sn
20	1,0628

Sumber: Soewarno,1995

D. Distribusi Log Person Tipe III

Distribusi Log Person Tipe III banyak digunakan dalam analisis hidrologi, terutama dalam analisis data maksimum (banjir) dan minimum (debit minimum) dengan nilai ekstrim. Persamaan-persamaan yang digunakan dalam Distribusi Log Person Tipe III adalah sebagai berikut:

- Menghitung nilai rata-rata (*Mean*)

$$\text{Log } \bar{X} = \frac{\sum Log\ X}{n} \quad (7)$$

Keterangan:

Log $\bar{X}$ = Harga rata-rata logaritma

X = Nilai curah hujan tiap-tiap tahun (R_{24} Maks)

N = Banyaknya data

- Menghitung Standar Deviasi (simpangan baku)

$$S_{d1} = \sqrt{\frac{\sum (\log X - \log \overline{X})^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$S_{d2} = \sqrt{\frac{\sum (\log X)^2 - logX \,.\log Xi}{n-1}} \quad (9)$$

- Menghitung koefisien skewness

$$C_s = \frac{n \sum (logX - log\bar{X})^2}{(n-1)(n-2)(S_d)^3} \quad (10)$$

- Harga atau nilai untuk berbagai kala ulang atau nilai curah hujan untuk masa ulang tertentu.

$\text{Log } X_T = \text{Log}\bar{X} + G.\ S_d$ (11)

Keterangan:

X_T = Curah hujan rencana periode ulang T tahun

$\bar{X}$ = Nilai rata-rata logaritma hitung

G = Faktor frekuensi

S_d = Standar Deviasi

Tabel 4 Harga G Pada Distribusi Log Person Tipe III

Cs	Kala Ulang											
	1,0101	1,0525	1,1111	1,25	2	5	10	25	50	100	200	1000
	Kemungkinan Terjadinya Banjir (%)											
	99,00	95,00	90,00	80,00	50,00	20,00	10,00	4,00	2,00	1,00	0,50	0,10
0,0	-2,326	-1,645	-1,282	-0,824	0,000	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576	3,090
0,1	-2,252	-1,616	-1,270	-0,846	-0,017	0,836	1,292	1,785	2,107	2,400	2,670	3,325
0,2	-2,175	-1,586	-1,258	-0,850	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472	2,763	3,380
0,3	-2,104	-1,550	-1,245	-0,853	-0,050	0,824	1,309	1,849	2,211	2,544	2,856	3,525
0,4	-2,029	-1,524	-1,231	-0,855	-0,600	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615	2,949	3,670
0,5	-1,955	-1,491	-1,216	-0,856	-0,083	0,808	1,323	1,910	2,311	2,686	3,041	3,815
0,6	-1,880	-1,258	-1,200	-0,857	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755	3,132	3,960
0,7	-1,806	-1,427	-1,183	-0,857	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,824	3,223	4,105
0,8	-1,733	-1,388	-1,166	-0,856	-0,132	0,780	1,336	1,993	2,453	2,891	3,312	4,250
0,9	-1,660	-1,353	-1,147	-0,854	-0,148	0,769	1,339	2,018	2,498	2,957	3,401	4,395
1,0	-1,588	-1,317	-1,128	-0,852	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022	3,489	4,540
1,1	-1,518	-1,280	-1,107	-0,848	-0,180	0,745	1,341	2,006	2,585	3,087	3,575	4,680
1,2	-1,449	-1,243	-1,086	-0,844	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149	3,661	4,820
1,3	-1,388	-1,206	-1,064	-0,838	-0,210	0,719	1,339	2,108	2,666	3,211	3,745	4,965
1,4	-1,318	-1,163	-1,041	-0,832	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271	3,828	5,110
1,5	-1,256	-1,131	-1,018	-0,825	-0,240	0,690	1,333	2,146	2,743	3,330	3,910	5,520
1,6	-1,197	-1,093	-0,994	-0,817	-0,254	0,675	1,329	2,163	2,780	3,388	3,990	5,390
1,7	-1,140	-1,056	-0,970	-0,800	-0,268	0,660	1,324	2,179	2,815	3,444	4,069	5,525
1,8	-1,087	-1,020	-0,945	-0,799	-0,282	0,643	1,318	2,193	2,848	3,499	4,147	5,660
1,9	-1,037	-1,984	-0,920	-0,788	-0,294	0,627	1,310	2,207	2,881	3,553	4,223	5,785
2,0	-0,990	-1,949	-0,895	-0,777	-0,307	0,609	1,302	2,219	2,912	3,605	4,298	5,910
2,1	-0,946	-1,914	-0,869	-0,765	-0,319	0,592	1,294	2,230	2,942	3,656	4,372	6,055
2,2	-0,905	-1,882	-0,844	-0,752	-0,660	0,574	1,284	2,240	2,970	3,705	4,454	6,200
2,3	-0,867	-0,850	-0,819	-0,739	-0,341	0,555	1,274	2,248	2,997	3,753	4,515	6,333
2,4	-0,832	-0,819	-0,795	-0,725	-0,351	0,537	1,262	2,256	3,023	3,800	4,584	6,467
2,5	-0,799	-0,790	-0,771	-0,711	-0,360	0,518	1,250	2,262	3,048	3,845	4,652	6,600
2,6	0,769	-0,762	-0,747	-0,696	-0,368	0,499	1,238	2,267	3,071	3,889	4,718	6,730
2,7	-0,740	-0,736	-0,724	-0,681	-0,376	0,479	1,224	2,272	3,097	3,932	4,783	6,860
2,8	-0,714	-0,711	-0,702	-0,666	-0,384	0,460	1,210	2,272	3,114	3,973	4,874	6,990
2,9	-0,690	-0,688	-0,681	-0,651	-0,390	0,440	1,195	2,277	3,134	4,013	4,909	7,120
3,0	-0,667	-0,665	-0,660	-0,636	0,396	0,420	1,180	2,278	3,152	4,051	4,970	7,250

Sumber: Soemarto,1999

Distribusi Log Person Tipe III mempunyai koefisien kemencengan (*coefisien of skewness)* atau Cs≠0. Setelah pemilihan jenis sebaran dilakukan maka prosedur selanjutnya yaitu mencari curah hujan rencana periode ulang 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, dan 100.

Analisis Debit Banjir

Pada analisis banjir dilakukan pada titik tinjauan untuk mendapatkan debit banjir rencana dengan bebagai kala ulang. Kala ulang yang dihitung pada penelitian ini adalah 2 tahun, 5 tahun, 10 tahun, 15 tahun, 20 tahun, 25 tahun, 50 tahun, dan 100 tahun, besarnya debit banjir yang diperoleh inilah yang akan dipakai dalam perencanaan bangunan pengendali banjir. Dalam analisa hidrologi terdapat banyak cara pendukung, model dan penelitian yang dapat dipergunakan untuk menghitung debit banjir rencana. Dalam penelitian ini digunakan metode Nakayasu, dengan rumus sebagai berikut:

1. Metode Nakayasu

Hidrograf Satuan Sintetik Nakayusa (HSSN) ialah hidrograf aliran langsung (*Direct Run Off*) yang dihasilkan dari curah hujan setinggi rata-rata 1mm yang tersebar merata didaerah aliran dengan suatu laju seragam selama suatu periode atau waktu tertentu. Nakayasu dari Jepang, telah menyelidiki hidrograf satuan pada beberapa sungai di jepang dan oleh beberapa ahli di Indonesia berpendapat bahwa Hidrograf Satuan Nakayasu ini cukup dengan kondisi dan keadaan di Indonesia.

Persamaan metode Nakayasu adalah sebagai berikut:

$$Qp = \frac{C \cdot A \cdot Ro}{3{,}60 \cdot (0{,}30\, Tp + 0{,}30)} \quad (12)$$

Keterangan:

Qp = Debit puncak banjir (m^3/dtk)

C = Koefisien Limpasan

A = luas daerah pengaliran (km^2)

Rp = Hujan harian rencana maksimum (mm)

Tp = Tenggang waktu dari permulaan banjir sampai puncak banjir (jam)

Tp = Tg + 0,80 Tr.....(2.30)

Tr = 0,5 x T_g Satuan waktu hujan (jam)

$T_{0,30}$ = Waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari debit puncak sampai menjadi 30% debit puncak (jam)

$T_{0,30} = \alpha \cdot Tg$ (13)

$$\alpha = \frac{0{,}47 \cdot (A \cdot L)^{0{,}25}}{Tg} \quad (14)$$

α = Parameter yang bernilai 1,50 – 3,50

L = panjang sungai (Km)

Tg di hitung berdasarkan pada panjang sungai:

Tg = 0,40 + 0,58 L (untuk L > 15m)

$Tg = 0{,}21 + L^{0{,}70}$ (untuk L < 15m)

Sisi naik merupakan garis lurus, sedangkan sisi resesi merupakan garis ekonomis dengan persamaan:

1) Pada waktu Naik.

$0 \le t \le Tp$

$Qa = Qmaks\ (t/Tp)^{2{,}40}$ (15)

2) Pada waktu Turun.

$Tp \le t \le (Tp + T_{0,30})$

$$Qa = Qp \cdot 0{,}30^{\frac{(t-Tp)}{T_{0,30}}} \quad (16)$$

$(Tp + T_{0,30}) \le t \le (Tp + T_{0,30} + 1{,}5\ T_{0.3})$

$$Qa = Qp \cdot 0{,}30^{\frac{t-Tp+0{,}50\ T_{0,30}}{1{,}50 T_{0,30}}} \quad (17)$$

$t > (Tp + T_{0,30} + 1{,}5\ T_{0.3})$

$$Qa = Qp \cdot 0{,}30^{\frac{t-Tp+1{,}50\ T_{0,30}}{2.T_{0,30}}} \quad (18)$$

Intensitas Curah Hujan

Intensitas curah hujan adalah besarnya curah hujan maksimum yang akan diperhitungkan dalam perencanaan bangunan pengendali banjir atau genangan air dalam satuan waktu tertentu, untuk memperoleh curah hujan rata-rata dalam waktu tertentu baik yang dinyatakan dalam curah hujan harian dan jam-jaman maka menggunakan rumus Intensitas curah hujan Mononobe dengan persamaan:

$$I = \frac{Rt}{24} \times \left(\frac{24}{tc}\right)^{2/3} \quad (19)$$

Keterangan:

I = Intesitas hujan selama waaktu konsetrasi tc (mm/jam)

Rt = curah hujan dengan kala ulang T tahun (mm)

Tc = Waktu Konsetrasi (jam)

Waktu Konsentrasi

Waktu konsentrasi aliran adalah waktu yang diperlukan oleh satu titik hujan dari tempat terjauh dalam suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) mengalir ketempat yang akan ditinjau/ditetapkan. Waktu konsentrasi dapat dihitung dengan rumus Kirpich dan Giandotti kemudain diambil nilai rata-ratanya. Di bawah ini adalah rumus dari metode Kirpich dan Giandotti yang sering digunakan dalam perhitungan waktu konsentrasi. Dari kedua rumus dibawah ini dapat kita lihat variable-variabel dari waktu konsentrasi suatu daerah tangkapan hujan.

1. Metode Kirpich

$$Tc = \frac{0{,}945 \cdot L^{1{,}156}}{H^{0{,}385}} \quad (20)$$

Keterangan:

Tc = Waktu konsentrasi (Jam)
L = panjang alur daerah tangkapan ketitik tinjau (Km)
H = Beda tinggi antara titik yang ditinjau dan titik tertinggi pada *cathment* area (m)

2. Metode Giandotti

$$TC = \frac{(4A^{0{,}5} + 1{,}50L)}{0{,}80 \cdot H^{0{,}50}} \quad (21)$$

Keterangan:

TC = Waktu konsentrasi (*time of concentration*) (jam)
A = Luas daerah tangkapan (Km^2)
L = Panjang alur daerah tangkapan (Km)
H = Beda tinggi rerata daerah tangkapan

Koefisien Pengaliran

Koefisien pengaliran adalah suatu variable yang didasarkan pada kondisi daerah pengaliran dan karakterisktik hujan yang jatuh didaerah tersebut atau juga suatu koefisien perbandingan antara besarnya jumlah air yang dialirkan oleh suatu jenis permuakaan tanah pada daerah pengaliran terhadap jumlah air yang ada. Koefisien pengaliran sangat dipengaruhi oleh kondisi dan situasi daerah tangkapan hujan seperti kemiringan, kondisi vegetasi dan lain-lain. Koefisien pengaliran (run off -C) dihitung dengan memperhatikan factor iklim dan fisiografi yaitu: dengan menjumlahkan beberapa koefisien C sebagai berikut:

C = Cp + Ct + Co + Cs + Cc (22)

Keterangan:

C = Koefisien pengaliran yang sesuai dengan kondisi permukaan.
Cp = Komponen C yang disebabkan oleh intensitas hujan yang bervariasi.
Ct = Komponen C yang disebabkan oleh keadaan topografi.
Co = Komponen C yang disebakan oleh tampungan permukaan.
Cs = Komponen C yang disebabakan oleh infiltrasi.
Cc = Komponen Cyang disebabkan oleh jenis penutup lahan.

Perhitungan Debit Sungai

Perencanaan suatu bangunan pengendali banjir ataupun genangan air, hal yang sangat perlu kita ketahui adalah besarnya debit yang terjadi pada aliran sungai. Debit maksimum didalam suatu sungai atau debit banjir biasanya terjadi jika curah hujannya berlangsung cukup lama dengan intesitas yang cukup besar. Besarnya debit banjir pada sebuah sungai sangat tergantung oleh bentuk dari daerah pengalirannya, miringnya permukaan tanah serta factor-factor lainnya. Perhitungan debit maksimum yang dapat ditampung oleh penampang sungai untuk memperkirakan rumus hidrolika yang ada dengan beberapa metode untuk memperkirakan besarnya kecepatan aliran air yang berlangsung disungai. untuk menentukan besarnya debit banjir dapat dipergunakan rumus sebagai berikut:

Q = A . V (23)

Keterangan:

A = Luas penampang basah (m^2)

Q = Debit banjir yang terjadi (m^3/dtk)

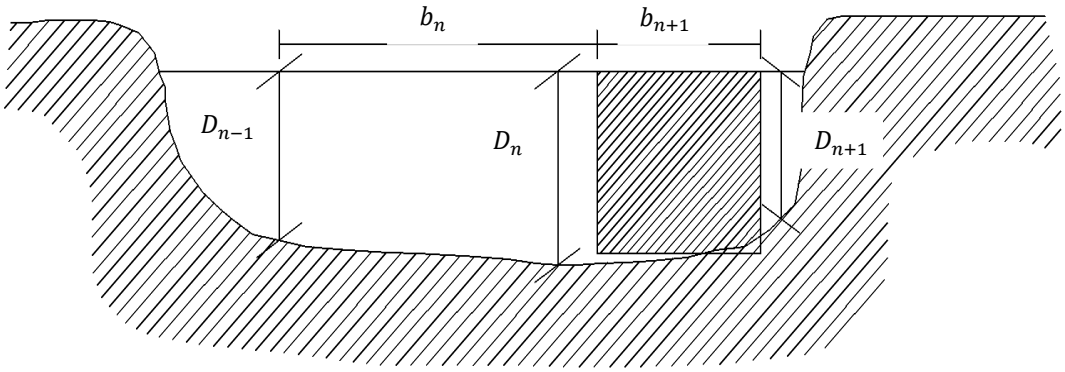
R = $\frac{A}{P}$ (24)

P = Keliling penampang basah melintang aliran (m).

R = Jari-jari (m)

Metode yang sering dipergunakan dalam perhitungan debit banjir di sungai adalah Metode Luas Rata-rata (*Mean Section Methode*)

Metode Luas Rata-rata (*Mean Section Methode*)



Gambar 1 Irisan Luas Rata-rata

Kecepatan Aliran Sungai

Kecepatan aliran pada suatu potongan melintang sungai dapat ditentukan berdasarkan beberapa merode yang sering digunakan berikut ini adalah rumus-rumus yang sering digunakan dalam menghitung kecepatan aliran air sungai.

1. Rumus Manning

   V = $\frac{R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}}{n}$ (25)

   Keterangan:

   V = Kecepatan rata-rata aliran air (m/dtk)

   R = Jari-jari hidrolik (m)

   S = Kemiringan

   N = Koefisien kekerasan manning

2. Rumus Strickler

   V = K . $R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$ (26)

   Keterangan:

   V = Kecepatan rata-rata aliran air (m/dtk)

   K = Koefisien kekerasan Strickler

3. Rumus Bazin

   V = C . $R^{\frac{1}{2}} S^{\frac{1}{2}}$ (27)

   Keterangan:

   V = Kecepatan rata-rata aliran air (m/dtk)

   C = $\frac{87}{1+(\gamma/R^{\frac{1}{2}})}$ (28)

   C = Koefisien kekerasan dinding saluran

γ = Koefisien Bizen (2,9)

Analisi Debit banjir menggunakan Aplikasi HEC-RAS

Istiarto (2014) HEC-RAS merupakan program aplikasi untuk memodelkan aliran sungai, River Analysis Sistem (RAS), yang dibuat oleh Hydrologic Engineering Center (HEC) merupakan suatu divisi di dalam Institute for Water Resources (WR), di bawah US Army corps of

Perbaikan Alur Sungai Dengan Normalisasi

Normalisai ini didefiniskan sebagai suatu proses pada sungai didaerah aliran yang mempunyai sifat berbelok-belok untuk cenderung membuat jalan yang lebih pendek atau lurus jika dibandingkan dengan alur sungainya semula, atau saluran yang dibuat pada alur sungai yang tidak mempunyai pembuangan akhir. Ditinjau dari proses kejadiannya, normalisasi dapat dibagi menjadi dua yaitu:

1. Normalisai Alam
   normalisai alam terjadi secara alamiah sebagai usaha dari sungainya sendiri untuk mencapai keseimbangan baru akbiat dari bertambah penjangnya alur sungai karena adanya perkembangan meander.

2. Normalisasi Buatan
   Untuk merencanakan suatu saluran buatan ada dua hal yang perlu diperhatikan yakni: Rencana alignment saluran dan Rencana pemotongan aliran.

Pengertian Umum Metodologi dan Lokasi Penelitian Menurut Sugiyono (2001) Metodologi adalah suatu cara yang tersusun secara terstruktur dan teratur dalam melakukan penelitian terhadap suatu objek. Metodologi akan menuntun penulis tentang tahap atau langkahlangkah dalam melakukan suatu penelitian sehingga penelitian tersebut akan memiliki suatu keteraturan dan akan mudah dipahami bagi pihak lain selain penulis.

Desa Oesao berada pada Kabupaten Kupang Kecapatan Kupang Timur. Pada Desa Oesao dilalui oleh Sungai Oesao dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2 Peta Lokasi Penelitian

Sumber Dan Data Penelitian.

Sumber data dalam penelitian ada dua yaitu data Primer dan Data Sekunder

Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data data tiga yaitu Studi Pustaka, Studi Dokumen dan Observasi

Teknik Analisa Data

Teknik analisan data adalah menghitung, menyajikan, pengelompokan data-data agar siap untuk dijadikan landasan atau materi bagi analisis. Analisis data yang dilakukan mengacu pada tujuan penelitian ini. Data-data yang diperoleh dari hasil penelitain dihitung dan dievaluasi berdasarkan rumus-rumus dan ketentuan-ketentuan yang ada sehingga dapat diperoleh landasan untuk mengambil kesimpulan terhadap kondisi eksisting yang ada pada lokasi penelitian dan mengusulkan suatu model penanggulangan yang dapat memberikan solusi terhadap permasalahan yang terjadi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Rekapitulasi Hujan Rancangan

Hasil rekapitulasi hujan rancangan dari keempat metode distribusi dapat diliha pada Tabel 5

Tabel 5 Hasil Rekapitulasi Hujan Rancangan

No	Kala ulang (Tahun)	Distribusi			
		Normal	Log Normal	Gumbel	Log Person Tipe III
1	0	0	0	0	0
2	2	106,978	98,076	99,066	91,525
3	5	151,94	137,414	156,149	132,609
4	10	175,491	163,965	193,943	167,997
5	15	185,126	176,253	215,267	187,415
6	20	194,761	189,462	230,196	209,077
7	25	198,418	194,732	241,696	221,052
8	50	216,706	223,364	277,122	274,557
9	100	231,694	249,939	312,286	334,417

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

Hasil Uji persyaratan statistic dapat dilihat pada tabel 6

Tabel 6 Hasil Uji Persyaratan Statistik

Uji Persyaratan Statistik							
Jenis Distribusi	Syarat yang harus dipenuhi			Parameter Statistik dan Distribusi			Keputusan
Normal	Cs	=	0	Cs	=	2,22	Tidak Memenuhi
Log Normal	Cs/Cv	=	3	Cs/Cv	=	12,006	Tidak Memenuhi
Gumbel	Cs Ck	≤ ≤	1,1396 5,4002	Cs Ck	= =	2,22 8,677	Tidak Memenuhi
Log Pearson Tipe III	Cs ≠						Memenuhi

Sumber: Hasil Perhitugan 2022

Perhitungan Intensitas Hujan Rencana

$I_{2thn} = \frac{Rt}{24} \text{ x } (\frac{24}{tc})^{\frac{2}{3}}$

$I_{2thn} = \frac{91,525}{24} \text{ x } (\frac{24}{1,961})^{\frac{2}{3}}$

I_{2thn} = 190,418 mm/jam

Perhitungan besarnya curah hujan yang terkonsetrasi pada kala ulang kala ulang rencanan lainnya dapat dilihat pada Tabel 7

Tabel 7 Perhitungan Intesnitas Curah Hujan Pada Titik Tinjau

T(tahun)	Hujan Rencana	Tc (jam)	Intensitas (I) (mm/jam)
2	91,525	1,961	190,418
5	132,609	1,961	275,893
10	167,997	1,961	349,518
15	187,415	1,961	389,916
20	209,077	1,961	434,984
25	221,052	1,961	459,898
50	274,557	1,961	571,215
100	334,417	1,961	695,754

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

Perhitungan Koefisien Pengaliran Daerah Aliran Sungai Oesao

Koefisien pengaliran untuk kala ulang 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, dan 100 adalah 0,6

Perhitungan Debit Banjir Rencana Dengan Metode Nakayasu

Hasil rekapitulasi Debit Banjir Rencana dengan metode Nakayasu dapat dilihat pada Tabel 8

Tabel 8 Rekapitulasi Bentuk Hidograf HSS Nakayasu

Kala Ulang (Tahun)	HSS Nakayasu
2	23,676
5	34,303
10	43,457
15	48,48
20	54,084
25	57,181
50	71,022
100	86,506

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

Perhitungan Penampang Basah Sungai Oesao

Berdasarkan hasil perhitungan penampang pada titik tinjau Sungai Oesao diperoleh luas penampang basah (A) adalah 7,2 m^2 dan keliling basah (p) adalah 28,181 m.

Kecepatan Aliran Air di Sungai Oesao

Kecepatan aliran masing masing metode dan kecepatan aliran yang terpakai dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9 Kecepatan Aliran Terpakai Masing Masing Metode

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

Manning	Strickler	Bazin	V (Terpakai)
2,585	2,676	1,932	1,932

Perhitungan debit yang mamapu ditampung oleh sungai Oesao.

Besarnya debit air yang mampu ditampung oleh sungai oesao dapat dilihat pada perhitungan dibawah:

Q = A x v

Q = 7,200 x 1,932

Q = 13,909 m^2/det

Analisa Debit Banjir Rencana dengan menggunakan HEC-RAS

Besarnya debit banjir dari perhitungan dengan menggunakan program HEC-RAS dapat diliha tpada Tabel 10

Tabel 10 Rekapitulasi Debit Penampang Dengan HEC-RAS

Kala Ulang (Tahun)	**HECRAS**
2	17.43
5	24
10	29.48
15	31.97
20	34.66
25	37.64
50	44.81
100	52.98

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

Perbandingan Debit Banjir Rencana Dengan Kasitas Tampung Sungai Oesao

Perbandingan dari debit banjit dengan kapasitas tampung sungai dapat dilihat pada Tabel 11

Tabel 11 Perbandingan Debit Banjir Rencana dengan Debit Yang Mampu Ditampung Oleh Penampang Sungai Oesao.

kala Ulang	Perbandingan Debit (Q) m^3/det		
(Tahun)	**HSS Nakayasu**	**HECRAS**	**Penampang**
2	23,676	17.43	13,909
5	34,303	24	13,909
10	43,457	29.48	13,909
15	48,48	31.97	13,909
20	54,084	34.66	13,909
25	57,181	37.64	13,909
50	71,022	44.81	13,909
100	86,506	52.98	13,909

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

Perencanaan normalisasi

Normalisai yang dapat dibuat ada dua jenis, yaitu normalisasi dari tanah yang dapat dilihat pada Tabel 12 dan normalisasi dari pasangan yang dapat dilihat pada Tabel 13

Tabel 12 Dimensi Normalisai Tanah Penampang Trapesium

Kala Ulang (Tahun)	Debit Banjir Rencana (m^3/det)	h_0 (m)	n'	b (m)	A_0 (m2)	P (m)	R (m)	V_1 (m/det)	V_2 (m/det)	V_3 (m/det)	V Terpakai (m/det)	A1 (m^2)	H1 (m)	Ket
2	23,68	0,88	5,7	5,03	6,00	8,98	0,67	4,54	3,95	4,14	3,95	6,00	0,88	OK
5	34,30	0,87	9	7,84	8,35	11,73	0,71	4,73	4,11	4,34	4,11	8,34	0,87	OK
10	43,46	0,95	9	8,57	9,97	12,83	0,78	5,02	4,37	4,64	4,37	9,96	0,95	OK
15	48,48	0,99	9	8,92	10,80	13,35	0,81	5,15	4,48	4,78	4,48	10,81	0,99	OK
20	54,08	1,03	9	9,30	11,74	13,92	0,84	5,30	4,61	4,93	4,61	11,73	1,03	OK
25	57,18	1,06	9	9,50	12,24	14,21	0,86	5,37	4,67	5,00	4,67	12,23	1,06	OK
50	71,02	1,14	9	10,30	14,40	15,41	0,93	5,67	4,93	5,31	4,93	14,40	1,14	OK
100	86,51	1,23	9	11,09	16,70	16,60	1,01	5,96	5,18	5,61	5,18	16,69	1,23	OK

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

Tabel 13 Dimensi Normalisai Pasangan Penampang Trapesium

Kala Ulang (Tahun)	Debit Banjir Rencana (m^3/det)	h_0 (m)	n'	b (m)	A_0 (m2)	P (m)	R (m)	V_1 (m/det)	V_2 (m/det)	V_3 (m/det)	V Terpakai (m/det)	A1 (m^2)	H1 (m)	Ket
2	23,68	0,72	9	6,47	5,69	9,69	0,59	6,94	4,16	7,34	4,16	5,69	0,72	OK
5	34,30	0,83	9	7,44	7,52	11,14	0,68	7,61	4,57	7,91	4,57	7,51	0,83	OK
10	43,46	0,90	9	8,13	8,97	12,17	0,74	8,07	4,84	8,29	4,84	8,97	0,90	OK
15	48,48	0,94	9	8,47	9,74	12,68	0,77	8,30	4,98	8,47	4,98	9,74	0,94	OK
20	54,08	0,98	9	8,82	10,56	13,20	0,80	8,53	5,12	8,66	5,12	10,57	0,98	OK
25	57,18	1,00	9	9,01	11,02	13,49	0,82	8,65	5,19	8,75	5,19	11,02	1,00	OK
50	71,02	1,09	9	9,77	12,97	14,63	0,89	9,13	5,48	9,14	5,48	12,97	1,09	OK
100	86,51	1,17	9	10,52	15,03	15,75	0,95	9,59	5,75	9,51	5,75	15,04	1,17	OK

Sumber: Hasil Perhitugan,2022

SIMPULAN

1. Debit banjir yang terjadi pada Sungai Oesao berkisar antara 23,676 m^3/det sampai 86,506 m^3/det sedangkan kapsitas tampung sungai hanya 13.909 m^3/det.
2. Berdasakan hasil analisa diperoleh maka Daerah Aliran Sunagi Oesao perlu dilakukan Normalisasi agar dapat menampung debit banjir yang terjadi mendatang.
3. Dari hasil analisa, maka Normalisasi yang dapat dibuat ada 2 jenis yaitu Normalisasi dengan menggunakan tanah dapat dilihat pada Tabel 12 dan atau Normalisasi dengan menggunakan pasangan dapat dilihat pada Tabel 13.

DAFTAR PUSTAKA

Maulana, Muhammad & Asmaranto, Runi & Dermawan, Very. (2021). Analisa Banjir Kali Pekalen Kabupaten Probolinggo Menggunakan Aplikasi HEC-RAS. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air. 1. 549-561.

Pukan, Mariano & Pattiraja, Agustinus & Seran, Sri. (2022). Analisa Model Kapasitas Tampung Sungai Manikin Dengan Menggunakan Aplikasi Hec-Ras. Eternitas: Jurnal Teknik Sipil. 1. 32-40.

Ikhsan, Cahyono. (2020). Analisis Kapasitas Tanggul Sungai Kali Lamong Akibat Banjir Tahunan dalam Kondisi Terendam Sebagian dan Seluruhnya dengan Software Hec-Ras 5.0. Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil. 13. 26-29.

Misbah, Zulkarnain & Ahadian, Edward. (2020). Normalisasi Sungai Aru Untuk Menanggulangi Banjir Di Kecamatan Galela

Asdak, C. 2014. Hidrologi dan Pengelolaan daerah Aliran Sungai, Gadjah Mada Press, Yogyakarta. Triatmodjo, B. 2008. *Hidrologi Terapan*, Beta Offset, Yogyakarta

Asdak, C. 2002: *Hidrologi dan pengelolaan Daerah Aliran Sungai dalam Direktorat Kehutanan dan Konservasi Sumberdaya Air*. (2016). Kajian model pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) terpadu. Digital Library Universitas Nasional. Jakarta Selatan

Sri Harto BR.IR.Dipl. H 1981, *Mengenal Dasar Hidrologi Terapan* KMTS.

SNI, 2. (2016). Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana. Kementrian PUPR Dirjen SDA Balai Bendungan.

Soemarto, C., D. 1986. *Hidrologi Teknik*, Usaha Nasional, Surabaya.
Astriyana, M., Indriana, D., dan Purwadi, O.T. 2016: *Analisis hidrograf satuan terukur sub-DAS Way Besai*. Jurnal JRSDD, 4, (2), 224-235.
Depertemen Pekerjaan Umum, SKSNI.M-18-1989F. *metode Perhitungan Debit Banjir Rencana, Yayasan LPMB Bandung.*

EVALUASI SALURAN DRAINASE MENGGUNAKAN APLIKASI *EPA SWMM* 5.2 DI KELURAHAN KEFA SELATAN KOTA KEFAMENANU

EVALUATION OF DRAINAGE CHANNELS USING THE EPA SWMM 5.2 APPLICATION IN KEFA SELATAN VILLAGE KEFAMENANU CITY

Carol do R. Pakaenoni[1)], Denik Sri Krisnayanti [2)], Remigildus Cornelis [3)] dan John H. Frans[4)]

1,2,3,4) Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto, Penfui, Kupang, NTT, Indonesia,
*Correspondence email: denik.krisnayanti@staf.undana.ac.id

Accepted: ;Revised: ; Approved:

ABSTRACT

The development of development in an area causes empty land to absorb water naturally, which decreases because the surface of the land is covered by asphalt and residential areas, coupled with poor drainage system conditions, this will increase excess runoff water which is not wasted. The drainage conditions in Kefamenanu City, North Central Timor Regency, especially in Kefa Selatan Village, are not yet well systemized. This is because some of the existing channels are filled with sedimentation and overgrown with grass, thereby inhibiting water runoff which results in flooding in several channels. Drainage channel evaluation was carried out to determine the runoff discharge and determine whether the drainage channel in South Kefa Village is still capable of carrying runoff water. Evaluation of this drainage channel using SWMM 5.2 software with rainfall designed with a return period of 10 years using the Log Pearson Type III method of 62,28 mm and peak hour intensity of 34,32 mm/hour using the Mononobe method and 30,672 mm/hour using Alternating Block Method method. The peak runoff discharge from the simulation results is 0,028 – 0,736 m^3/second. Based on the simulation of 21 channels, 11 channels overflowed during maximum runoff so repairs were needed. The influencing factor is the small channel capacity. Repairs were carried out on 11 channels, namely channels C2, C.1, C.6, C.7, C.9, C.10, C.11, Gg.2, Gg.3, Gg.4 and Gg.5.

Keywords: *Kefa Selatan District, EPA SWMM 5.2, flood, rainfall, drainage channels, runoff*

ABSTRAK

Perkembangan pembangunan pada suatu kawasan menyebabkan lahan kosong untuk meresapkan air secara alami akan semakin berkurang karena permukaan tanah yang tertutup oleh aspal dan pemukiman ditambah dengan kondisi sistem drainase yang buruk hal ini akan menambah kelebihan air limpasan yang tidak terbuang. Kondisi drainase di Kota Kefamenanu Kabupaten Timor Tengah Utara khususnya pada Kelurahan Kefa Selatan belum tersistem dengan baik. Hal tesebut dikarenakan pada beberapa saluran yang ada dipenuhi dengan sedimentasi dan ditumbuhi dengan rumput sehingga menghambat limpasan air yang mengakibatkan terjadinya banjir pada beberapa saluran. Evaluasi saluran drainase dilakukan untuk mengatahui debit limpasan dan mengetahui saluran drainase di Kelurahan Kefa Selatan masih mampu atau tidak mengalirkan air limpasan. Evaluasi saluran drainase ini menggunakan perangkat lunak SWMM 5.2 dengan curah hujan yang dirancang dengan kala ulang 10 tahun mengunakan metode Log Pearson Type III sebesar 62,28 mm dan intensitas jam puncak yaitu 34,32 mm/jam mengunakan metode Mononobe dan 30,672 mm/jam menggunakan metode *Alternating Block Method*. Puncak debit limpasan hasil simulasi sebesar 0,028 – 0,736 m^3/detik. Berdasarkan simulasi dari 21 saluran ada 11 saluran yang meluap saat limpasan maksimum sehingga perlu dilakukan perbaikan. Faktor yang mempengaruhi adalah kapasitas saluran yang kecil. Perbaikan dilakukan pada 11 saluran yaitu saluran C2, C.1, C.6, C.7, C.9, C.10, C.11, Gg.2, Gg.3, Gg.4 dan Gg.5.

Kata Kunci: Kelurahan Kefa Selatan, *EPA SWMM 5.2*, banjir, curah hujan, saluran drainase, limpasan

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Kelurahan Kefa Selatan merupakan salah satu Kelurahan yang terletak di wilayah administrasi Kecamatan Kota Kefamenanu, Kabupaten Timor Tengah Utara, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Secara geografis lokasi penelitian yang terletak Kelurahan Kefa Selatan terletak di 9°28'13.96"S dan 128°28'50.92"T di sebelah utara dan 9°28'43.68"S dan 124°29'04.64"T di sebelah utara, luas daerah tangkapan hujan sebesar 9038 ha.

Pengalihan fungsi tata guna lahan menjadi aspal, beton dan pemukiman penduduk ataupun pusat perbelanjaan sangat berdampak pada laju infiltrasi tanah, sehingga ketika terjadi hujan dalam kurun waktu tertentu akan terjadi genangan air pada wilayah tertentu akibat air limpasan yang tidak dapat masuk ke dalam tanah. Kota Kefamenanu, khususnya Kelurahan Kefa Selatan, mengalami masalah serius terkait manajemen air hujan dan sistem drainase yang kurang efektif. Seiring dengan pertumbuhan populasi yang pesat dan pengembangan tata guna lahan yang tidak terkendali, permukaan lahan yang semula berfungsi sebagai daerah resapan air telah beralih menjadi pemukiman penduduk dan pusat perbelanjaan. Perubahan ini mengakibatkan penurunan kemampuan alami tanah untuk menyerap air hujan, yang pada gilirannya meningkatkan risiko genangan air dan banjir di wilayah tersebut. Pengalihan fungsi lahan menjadi aspal, beton, dan permukiman juga telah mengubah karakteristik aliran air permukaan, menyebabkan air hujan tidak dapat diserap dengan efisien oleh tanah. Kurangnya infrastruktur drainase yang memadai memperburuk situasi ini, dengan saluran-saluran yang tidak mampu menangani volume air yang tinggi saat terjadi hujan dengan intensitas tinggi. Dalam konteks ini, evaluasi yang komprehensif terhadap sistem drainase di Kelurahan Kefa Selatan sangatlah penting. Melalui penelitian ini, akan dikaji efektivitas saluran drainase yang ada dalam menangani limpasan air selama periode hujan.

Drainase merupakan salah satu komponen infrastruktur yang penting untuk menyalurkan kelebihan air. Pembangunan drainase yang memadai dapat menjadi solusi dari meningkatnya limpasan karena pengurangan daerah resapan air akibat adanya pembangunan. Namun sering kali drainase masih dianggap sebagai pekerjaan yang kurang penting. Untuk dimensi eksisting penampang saluran drainase yang ada di Kelurahan Kefa Selatan memiliki dimensi yang bervariasi dengan dimensi minimum sebesar 0,5 x 0,4 m dan dimensi maksimumnya sebesar 1,83 x 1,43 m. Hal ini menyebabkan drainase yang sudah dibuat tidak dapat menampung air buangan sesuai kebutuhan sehingga walaupun wilayah tersebut sudah memiliki jaringan drainase namun masih saja terdapat banyakgenangan air atau bahkan terjadi banjir.

Perangkat lunak EPA SWMM 5.2 dapat digunakan untuk melakukan evaluasi dengan lebih cepat serta dapat meminimalisir peluang kesalahan dalam perhitungan dan mempermudah penyelesaian persamaan – persamaan yang cukup rumit. Selain itu, perangkat lunak ini dapat menampilkan bentuk grafis yang memudahkan dalam pembacaan hasil simulasi sehingga sangat memudahkan untuk mencari titik yang mengalami banjir.

Berdasarkan permasalahan tersebut maka perlu dilakukan evaluasi mengenai besarnya limpasan yang terjadi dan kesesuaiannya dengan saluran drainase yang tersedia menggunakan perangkat lunak EPA SWMM 5.2. Penggunaan aplikasi EPA SWMM 5.2 dianggap sebagai solusi yang tepat karena kemampuannya untuk memodelkan sistem drainase secara rinci dan menghasilkan simulasi yang akurat.

2. Tujuan

a. Untuk mengetahui kapasitas *eksisting* dan rencana
b. Untuk mengetahui debit banjir rencana pada saluran drainase di kelurahan Kefa Selatan berdasarkan simulasi EPA SWMM 5.2
c. Untuk mengetahui banyaknya saluran yang perlu diperbaiki berdasarkan simulasi EPA SWMM 5.2

TINJAUAN PUSTAKA

1. Periode Ulang dan Analisa Frekuensi

Hujan rancangan dihitung dengan periode ulang tertentu yang diperoleh dari analisis frekuensi. Periode ulang merupakan waktu dimana hujan dengan besaran waktu tertentu akan disamai atau dilampui sekali dalam jangka waktu tertentu (Bambang Triatmojo, 2009). Tujuan analisis frekuensi mencari hubungan antara besarnya kejadian ekstrim terhadap frekuensi kejadian melalui penerapan distribusi (Suripin, 2004).

Ada 4 metode yang digunakan dalam analisis frekuensi yaitu Distribusi Normal, Distribusi Log Normal, Distribusi Gumbel, dan Distribusi Log Pearson III (Bambang Triatmojo, 2009). Parameter statistik dasar yang digunakan adalah nilai rata-rata (X) , standar deviasi (sd), Koefisien *Skewness* (Cs), Koefisien *Variasi* (Cv) dan Koefisien *Kurtosis* (Ck).

Untuk menguji apakah jenis distribusi yang dipilih sesuai dengan data yang ada yaitu dengan uji Chi-Kuadrat dan Smirnov-Kolmogorov sebagai berikut:

a. Uji Chi–Kuadrat mengunakan parameter X^2 dapat dihitung dengan rumus:

$$X^2 = \sum_{i=1}^{n} \frac{(OF - EF)^2}{EF} \quad \text{.....(1)}$$

Keterangan:
X^2 = Parameter Chi-Kuadrat terhitung
N = Jumlah Sub Kelompok dalam satu grup
Of = Frekuensi yang terbaca pada kelas yang sama
Ef = Frekuensi yang diharapkan sesuai dengan pembagian kelas

b. Uji Smirnov-Kolmogorov
Uji ini sering juga disebut juga uji kecocokan non parametik, karena pengujiannya dengan memperhatikan kurva dan penggambaran data pada kertas probabilitas. Apabila nilai D maksimum lebih kecil dari D_0, maka distribusi teoritis yang digunakan untuk menentukan persamaan distribusi dapat diterima.

Intensitas hujan adalah tinggi atau kedalaman air persatuan waktu. Apabila data hujan yang diketahui hanya data hujan harian maka digunakan Metode Mononobe (Suripin, 2004) dirumuskan sebagai berikut:

$$I = \frac{R_{24}}{24}\left(\frac{24}{t}\right)^{\frac{2}{3}} \quad \text{.....(2)}$$

Keterangan:
I = Intensitas curah hujan (mm)
R_{24} = Curah hujan maksimum untuk 24 jam (mm)
T = lamanya curah hujan (jam)

2. *Storm Water Management Model* (SWMM)

Untuk menghitung debit rencana pada saluran drainase dan kapasitas saluran mengunakan alat bantu berupa *software* EPA SWMM 5.2. SWMM (*Storm Water Management Model)* adalah model simulasi dinamis hubungan antara curah hujan dan limpasan yang dikembangkan oleh U.S. *Environmental Protection Agency* (EPA). Pemodelan dengan SWMM berdasarkan berbagai proses hidrologi seperti curah hujan dengan variasi waktu, evaporasi pada permukaan air, curah hujan pada daerah tampungan dan infiltrasi dari curah hujan yang masuk ke lapisan tanah tak jenuh air yang memperhatikan limpasan dan sistem drainase.

METODE PENILITIAN

Lokasi penelitian ini dilakukan di Kelurahan Kefa Selatan, Kecamatan kota Kefa, Kabupaten Timor Tengah Utara. Pemilihan lokasi ini dilakukan karena di lokasi ini setiap tahunnya pada musim penghujan selalu terjadi genangan yang menghambat mobilisasi.

Tahapan pertama dari penelitian ini melakukan pengumpulan data primer dan sekunder. Selanjutnya dilakukan analisis data yang meliputi analisis debit saluran dan kapasitas saluran drainase eksisting dengan bantuan *software* SWMM. Penanganan genangan didapatkan melalui simulasi ulang analisis kapasitas saluran drainase menggunakan *software* SWMM agar dapat menampung debit rencana dengan penambahan kapasitas saluran dengan cara penambahan lebar dan penambahan kedalaman saluran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hujan Harian Maksimum

Data hujan harian maksimum menggunakan data dari dua stasiun penakar hujan yaitu: Stasiun Oelninaat dan Data NASA dengan periode pengamatan data curah hujan yang digunakan selama 10 (sepuluh) tahun dari tahun 2006 sampai 2015.

2. Hujan Rancangan

Penentuan metode analisis frekuensi dihitung menggunakan 4 metode yaitu metode normal, metode gumbel, metode Log normal, dan metode log pearson tipe III. Kemudian dilakukan uji persyaratan statistik sehingga diperolehlah metode log pearson tipe III yang memenuhi persyaratan. Setelah itu dilakukan uji kecocokan distribusi terhadap metode log pearson tipe III dengan menggunakan Uji Chi Kuadrat Dan Uji Smirnov-Kolmogorov, yang dimana dari hasil uji menggunakan keduanya metode log pearson tipe III dapat

diterima.hasil uji menggunakan Uji Chi Kuadrat Dan Uji Smirnov-Kolmogorov dapat dilihat pada tabel-tabel berikut:

Tabel 1. Perhitungan Uji Chi Kuadrat

Interval kelas	Frekuensi Harapan (EF)	Frekuensi tiap kelas (OF)	(EF - OF)	$(EF - OF)^2$	$(EF - OF)^2/EF$
X≤45,25	2,50	7	-4,50	20,25	8,10
45,25<X≤55,00	2,50	1	1,50	2,25	0,90
55,00<X≤64,75	2,50	1	1,50	2,25	0,90
64,75<X≤74,50	2,50	1	1,50	2,25	0,90
	10,00	10,00	0,00	27,00	10,80

Tabel 2. Perhitungan Uji Smirnov-Kolmogorov

m	**x**	**Px (m/(n+1)**	**p(x<)**	**ft = (m-$\bar{x}$)/slogx**	**P'(x) = m/(n-1)**	**p'(x<)**	**D**
	2	3	4 = 1 - 3	5	6	7 = 1-6	8=7-4
1	74,50	0,09	0,91	-6,50	0,11	0,89	-0,02
2	55,00	0,18	1,82	3,37	0,22	1,78	-0,04
3	52,00	0,27	2,73	13,23	0,33	2,67	-0,06
4	51,00	0,36	3,64	23,10	0,44	3,56	-0,08
5	45,00	0,45	4,55	32,96	0,56	4,44	-0,10
6	41,00	0,55	5,45	42,82	0,67	5,33	-0,12
7	40,00	0,64	6,36	52,69	0,78	6,22	-0,14
8	37,00	0,73	7,27	62,55	0,89	7,11	-0,16
9	36,50	0,82	8,18	72,42	1,00	8,00	-0,18
10	35,50	0,91	9,09	82,28	1,11	8,89	-0,20
$\bar{x}$	1,66					Dmax	-1,11
Slogx	0,10138						

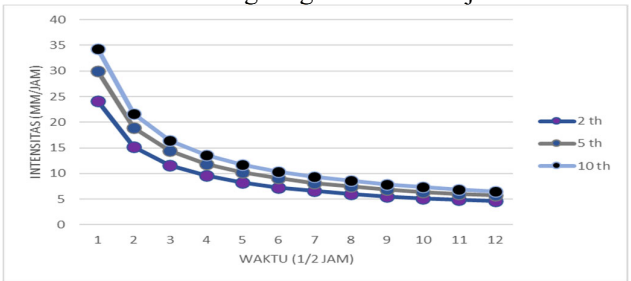
3. Intensitas Hujan

Perhitungan dilakukan menggunakan kala ulang 2, 5 dan 10 tahun dengan data hasil perhitungan hujan rancangan metode distribusi Log Pearson Tipe III, yang telah dihitung sebelumnya. Setelah dilakukan perhitungan intensitas hujan yang dapat dilihat pada Tabel 3, kemudian data tersebut dibuat ke dalam kurva IDF (Intensitas, Durasi, Frekuensi) yang dapat dilihat pada Grafik 1.

Tabel 3. Perhitungan Intensitas Hujan

Durasi		Intensitas (mm/jam)		
		2 th	5 th	10 th
Menit	Jam	44	54	62
0	0	0	0	0
30	0,5	24	30	34
60	1	15	19	22
90	1,5	12	14	16
120	2	10	12	14
150	2,5	8	10	12
180	3	7	9	10
210	3,5	7	8	9
240	4	6	7	9
270	4,5	6	7	8
300	5	5	6	7
330	5,5	5	6	7
360	6	5	6	7

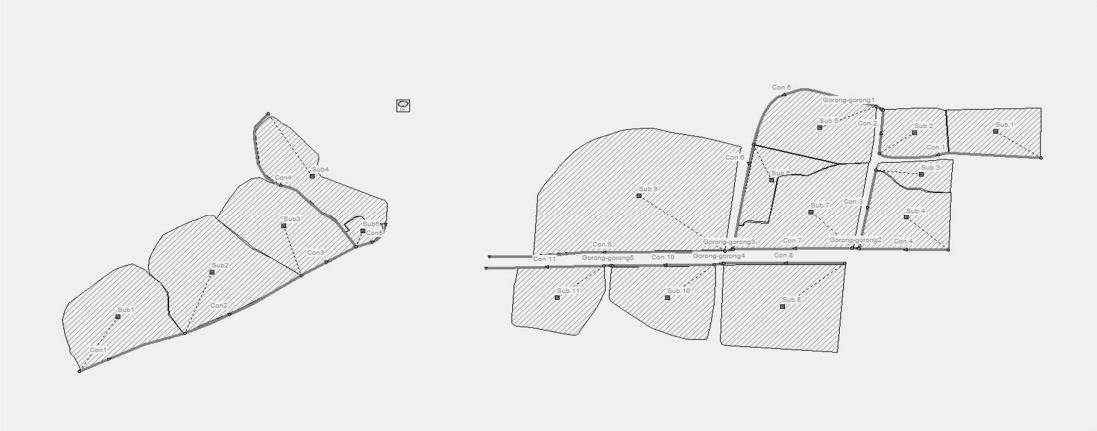
Grafik 1. Lengkung Intensitas Hujan



4. Simulasi Kapasitas Saluran Drainase Eksisting dengan SWMM 5.2

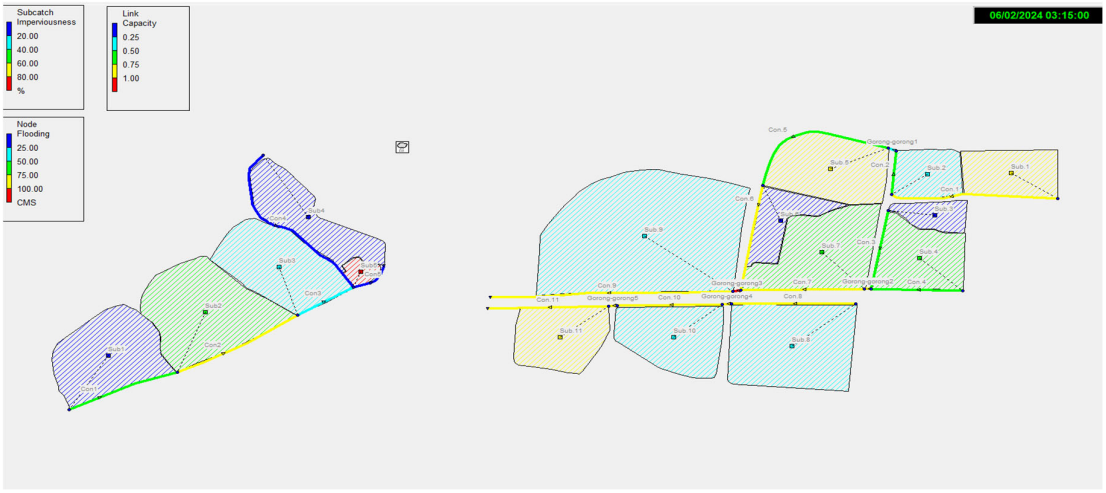
Sistem drainase yang ada dimodelkan ke dalam software SWMM. Terdapat 16 Subcatchment Area, 21 Junction, 21 Conduit, dan 3 Outfall. Model skema jaringan drainase ditampilkan dalam Gambar 1.

Gambar 1. Skema Jaringan Drainase



Dengan mengunakan model jaringan dan *time series* mengunakan waktu konsentrasi 6 jam, dengan intensitas hujan dengan kala ulang 10 tahun menghasilkan hasil kualitas simulasi yang cukup baik. Dimana *continuity error* untuk limpasan dan penelusuran aliran masing- masing sebesar -0,40 % dan -0,16%. Kualitas dikatakan kurang baik jika *continuity error* > 5%. Hasil simulasi ditampilkan dalam Gambar 2

Gambar 2. Kondisi Saluran Hasil Simulasi



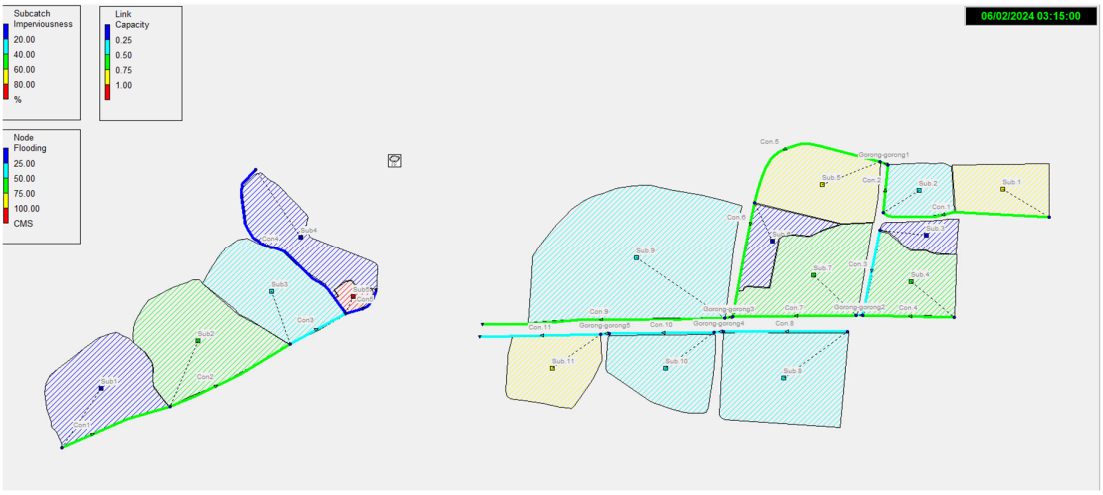
Berdasarkan simulasi dari 21 saluran ada 11 saluran yang meluap saat limpasan maksimum, yaitu saluran C2, C.1, C.6, C.7, C.9, C.10, C.11, Gg.2, Gg.3, Gg.4 dan Gg.5.
Setelah itu dilakukan perbaikan dimensi pada saluran-saluran yang mengalami masalah tersebut yang dimana hasil perbaikannya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perbaikan pada Saluran yang Meluap

Conduit	Tipe Saluran	L	Q_{banjir}	Data Saluran							Kecepatan	Q tampung saluran	Kontrol
			(m^3/s)	h(m)	b(m)	A(m)	P(m)	R(m)	*Slope*	n	V(m/s)		
C2	Terbuka	108	0,191	0,75	0,65	0,4875	2,05	0,24	0,008	0,025	1,34	0,289	Tidak Meluap
C.1	Terbuka	166	0,166	0,70	0,60	0,42	1,9	0,22	0,024	0,025	2,27	0,512	Tidak Meluap
C.6	Terbuka	120	0,331	0,80	0,60	0,48	2	0,24	0,010	0,025	1,54	0,344	Tidak Meluap
C.7	Tertutup	122	0,407	0,70	0,70	0,49	2,1	0,23	0,025	0,025	2,38	0,628	Tidak Meluap
C.9	Tertutup	240	0,715	0,80	0,60	0,48	2	0,24	0,017	0,013	3,84	0,930	Tidak Meluap
C.10	Tertutup	105	0,223	0,70	0,70	0,49	2,1	0,23	0,010	0,025	1,48	0,334	Tidak Meluap
C.11	Tertutup	120	0,375	0,70	0,70	0,49	2,1	0,23	0,025	0,025	2,40	0,635	Tidak Meluap
Gg.2	Tertutup	4	0,195	0,70	0,70	0,49	2,1	0,23	0,013	0,025	1,69	0,400	Tidak Meluap
Gg.3	Tertutup	4	0,736	0,70	0,70	0,49	2,1	0,23	0,013	0,013	3,26	0,769	Tidak Meluap
Gg.4	Tertutup	4	0,124	0,70	0,70	0,49	2,1	0,23	0,013	0,025	1,69	0,400	Tidak Meluap
Gg.5	Tertutup	4	0,227	0,70	0,70	0,49	2,1	0,23	0,013	0,025	1,69	0,400	Tidak Meluap

Setelah dilakukan perbaikan dimensi pada saluran-saluran yang meluap, kemudian dilakukan simulasi ulang menggunakan dimensi baru yag telah diperbaiki pada aplikasi SWMM, yang hasil simulasi setelah perbaikan dimensi dapat dilihat pada Gambar 3.

Gambar 3. Kondisi Saluran Hasil Simulasi Setelah Perbaikan Dimensi



Setelah dilakukan simulasi ulang menggunakan dimensi saluran yag sudah diperbaiki dapat dilihat bahwa tidak ada lagi saluran yang meluap pada hasil simulasi setelah perbaikan dimensi sehingga hasil perbaikan yang dilakukan dapat dianggap aman.

KESIMPULAN

Berdasarkan pengolahan dan analisis data pada penelitian ini, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Perhitungan debit banjir rencana dengan kala ulang 2, 5 dan 10 tahun menggunakan metode Log Pearson Type III, memiliki debit maksimum berturut-turut sebesar 0,46 m^3/detik, 0,57 m^3/detik dan 0,65 m^3/detik, sedangkan debit minimum untuk ketiga kala ulang yang dipakai memiliki debit yang sama besar yaitu 0,02 m^3/detik.
2. Dimensi eksisting penampang saluran drainase yang ada di Kelurahan Kefa Selatan memiliki dimensi yang bervariasi dengan dimensi minimum sebesar 0,5 x 0,4 m dan dimensi maksimumnya sebesar 1,83 x 1,43 m.
3. Dari hasil simulasi menggunakan aplikasi EPA SWMM 5.2 pada 21 saluran yang ada di Kelurahan Kefa Selatan menunjukan 11 saluran yang meluap pada kala ulang ulang 10 tahun dengan debit limpasan minimum terjadi di saluran C.1 lokasi 2 sebesar 0,106 m^3/detik dan debit limpasan maksimum terjadi di saluran C.9 lokasi 2 sebesar 0,715 m^3/detik. Kemudian dilakukan pendimensian ulang pada saluran-saluran yang meluap, sehingga saluran tidak lagi meluap setelah dilakukan simulasi ulang.
4. Kapasitas rencana saluran drainase yang ada di Kelurahan Kefa Selatan memiliki daya tampung yang bervariasi dengan kapasitas minimum sebesar 0,030 m^3/detik dan kapasitas maksimum sebesar 1,779 m^3/detik. Karena terjadi banjir pada saluran maka dilakukan pendimensian ulang pada saluran sehingga kapasitas rencana minimum menjadi 0,289 m^3/detik dan kapasitas maksimum sebesar 1,779 m^3/detik.

DAFTAR PUSTAKA

Adiwijaya. 2016. Modul Perencanaan Drainase Permukaan Jalan. https://simantu.pu.go.id/epel/edok/66dbb_Perencanaan_Drainase_Permukaan_Jalan.pdf.

Arj, Ezza Qodriatullah dan Dwiarani, Fitri. 2019. Menentukan Stasiun Hujan dan Curah Hujan Dengan Metode Polygon Thiessen Daerah Kabupaten Lebak. Jurnalis. 2 (2): 139-146.

Al Amin, M. Baitullah. 2020. *Pemodelan Sistem Drainase Perkotaan Menggunakan SWMM.* Yogyakarta: Penerbit Deepublish.

Bakhtiar & Yahya, Dede Muhammad. 2019. Analisis Pengendalian Air PermukaanDi Bawah Fly Over dengan Sistem Drainase Terpadu Pada Kasus Ruas JalanMekar Mukti – Cibarusah Dengan Pendekatan Model Hidrolik Ekperimen Laboratorium. *Jurnal Techno – Socio Ekonomika*. 12 (1): 34-46.

Fairizi, Dimitri. 2015. Analisis dan Evaluasi Saluran Drainase Pada Kawasan Perumnas Talang Kelapa di Subdas Lambidaro Kota Palembang. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*. 3 (1): 755-765. ISSN: 2355-374X.

Gaghana, Marvel Ighnatius Sasundung, dkk. 2019. Analisis Kapsaitas Penampang Sungai di

Kelurahan Tona 1 Kabupaten Sangihe. *Jurnal Sipil Statik*. 7 (4): 449-462. ISSN: 2337-6732.

Haris, Virgo Trisep, dkk. 2016. Perencanaan Dimensi Ekonomis Saluran PrimerDaerah Irigasi di Bunga Raya. *Jurnal Teknik Sipil Siklus.* I2 (1): 47-57.

Jaelani, Jenal, dkk. 2014. Evaluasi Teknis Sistem Drainase di Kawasan Kampus Universitas Islam 45 Bekasi. *Jurnal BENTANG.* 2 (1): 9-23.

Kastamto. 2012. Prediksi Morfologi Dasar Sungai Akibat Variasi Tutupan VegetasiTebing Sungai Way Sekampung. *Jurnal Teknik Sipil UBL.* 3 (2): 306-330.

Krisnayanti, Denik S, dkk. 2017. Perencanaan Drainase Kota Seba. *Jurnal Teknik Sipil.* VI (1): 89-102.

Lengkong, Jeanifer Claudia, dkk. 2018. Penataan Sistem Saluran Drainase di Kompleks Perumahan Minanga Permai Kelurahan Malalayang Dua Kecamatan Malalayang Kota Manado. *Jurnal Sipil Statik*. 6 (5): 323-338. ISSN: 2337-6732.

Monica, La'la. 2017. Penataan Drainase di Kawasan Kantor Badan Pusat Statistik Kelurahan Bumi Nyiur Kota Manado. *Jurnal Sipil Statistik.* 5 (3): 151-166. ISSN: 2337-6732.

Nahak, Priska Gardeni, dkk. 2017. Studi Identifikasi dan Penanggulangan Genangan Banjir di Jalan Cak Doko Kelurahan Oetete_Kota Kupang. *JurnalTeknik Sipil (JUTEKS).* 2 (2): 108-121.

Pangaribuan, Jauhari, dkk. 2019. Analisis Daerah Rawan Bencana Tanah Longsordi Kabupaten Magelang Menggunakan Sistem Geografis dengan Metode Standart Nasional Indonesia dan *Analythical Hierarchy Prosess. Jurnal Geodesi Undip.* 8 (1): 288-297. ISSN: 2337-845X.

Putra, M. Rizky M. 2022. *Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air Bersih Di Kelurahan Rabangodu Utara Kecamatan Raba Kota Bima.* Mataram : Universitas Muhammadiyah Mataram.

Sarbidi. 2014. Kriteria Desain Drainase Kawasan Permukiman Kota Berwawasan Lingkungan. *Jurnal Permukiman.* 9 (1): 1-16.

Satria, Indra, dkk. 2020. Identifikasi Pola Aliran di Sekitar Daerah Genangan Banjir. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan (JARSP).* 3 (3): 220- 226. E-ISSN: 2615-1340.

Suripin. 2004. *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. Jakarta: Andi.

Tahir, Muh dan Musa, Ratna. 2020. Kajian Koefisien Kekasaran Manning (n) Pasangan Batu dan Beton Berdasarkan Kuantifikasi Kekasaran Hidrolis (Studi Kasus Daerah Irigasi Wawotobi Kab. Konawe Sultra). 5 (2): 101-115.e-ISSN: 2720-9199.

Triadmojo, Bambang. 2008. *Hidrologi Terapan.* Yogyakarta : Beta Offset.

Upomo, Togani Cahyadi dan Kusumawardani, Rini. 2016. Pemilihan Distribusi Probabilitas Pada Analisa Hujan dengan Metode *Goodness Of Fit Test*.*Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan.* 2 (18): 139-148.

Wismarini, Th. Dwiati dan Ningsih, Handayani Untri. 2010. Analisis Sistem Drainase Kota Semarang Berbasis Sistem Informasi Geografi Dalam Membantu Pengambilan Keputusan Bagi Penanganan Banjir. *Jurnal Teknologi Informasi DINAMIK*. XV (1): 41-51.

INTEGRATING LOW-IMPACT DEVELOPMENT TECHNIQUES IN HERITAGE SITES: INSIGHTS FROM THE DIENG TEMPLE COMPLEX

Agustina Kiky Anggraini[1*], William Wijaya[1] dan Donny Priatmaja[2]

[1]Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta*
***e-mail**: agustina.kiky@uajy.ac.id*
[1]Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Yogyakarta
e-mail: william.wijaya@uajy.ac.id
[2]Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika Kampus No. 2, Yogyakarta
e-mail: donnypriatmaja@mail.ugm.ac.id

ABSTRACT

The Dieng Temple Complex is a significant archaeological site representing ancient Hindu influences, located on the Dieng Plateau, Central Java. Due to its high elevation and associated environmental conditions, the complex faces specific hydro-geotechnical challenges. This study assesses the impacts of proposed development activities within the complex, especially on the hydrological parameters. Field evaluations and modelling by Environmental Protection Agency Stormwater Management Model (EPA SWMM) software are conducted during the study. The results indicate that the current conditions exhibit minimal hydrological impacts. However, the proposed developments could substantially increase the impervious surface and modify surface runoff patterns. Along with the development plan, sustainable practices to minimise the risks are to be implemented. Implementing Low-Impact Development (LID) techniques may mitigate the effects mentioned earlier. It is recommended that the integration of sustainable practices be stressed to preserve the cultural and environmental integrity of the Dieng Temple Complex. This approach balances developmental aspirations with conservation imperatives, ensuring that the site's historical and cultural significance is preserved. By adopting these measures, the Dieng Temple Complex can maintain its status as a vital site for researchers, historians, and tourists interested in Indonesia's early history while also supporting the local community's economic welfare through sustainable development practices.

Keywords: LID, infiltration technology, surface runoff, Dieng Plateau, Wonosobo

1. INTRODUCTION

The Dieng Temple Complex represents one of the earliest Hindu temple complexes in Central Java. It is located at an elevation of approximately 2,000 meters above sea level on the Dieng Plateau. Constructed between the 7th and 8th centuries AD during the nascent period of Hindu kingdoms in Java, the complex exemplifies the profound influence of Hinduism in the region during that era. The Dieng Temple Complex comprises several temples made from andesite stone, including the Arjuna, Bima, Srikandi, Puntadewa, and Sembadra Temples, named after characters from the Mahabharata epic, reflecting the integration of Hindu narratives into ancient Javanese culture. The architectural style of the temples is indicative of Ancient Java, featuring simplistic structures with significant historical and archaeological value.

The Dieng Plateau is also notable for its natural phenomena, such as sulfuric craters, hot springs, and other attractions that attract numerous visitors (Listyorini et al., 2023). Additionally, the region is celebrated for its natural beauty, encompassing verdant hills and extensive agricultural activities. The Dieng Temple Complex holds archaeological and historical significance and spiritual and cultural importance for the local community. Dieng is one of the few locations in Indonesia where remnants of ancient Hindu culture are well-preserved, making it an essential site for researchers, historians, and tourists interested in Indonesia's early history.

The Minister of Education and Culture of the Republic of Indonesia has officially designated the area as a National Cultural Conservation Area through Decree Number 007/M/2017 (Gumelar and Rully, 2022). It is a crucial component of the National Strategic Tourism Area of Borobudur-Dieng. Optimising the primary potential of the Dieng Area is necessary to preserve the vital functions of the natural and cultural conservation areas and to enhance the economic welfare of the local community.

The study reported the hydro analyses in the developed areas, specifically the Arjuna and Aswatama Temple Area, Telaga Warna Area, Sikidang Area, and Sikunir Area. The study focuses on the impact of development on surface runoff and its effects on existing attributes in the reviewed areas.

2. DRAINAGE SYSTEM AND LEGAL BASIS

According to Malinay et al. (2023), the drainage system plays a crucial role in the development or expansion of an area. It is necessary in developed areas due to the interaction between human activities and the natural water cycle (Butler et al., 2018). This interaction primarily involves the diversion of rainwater from natural drainage systems due to impermeable land cover.

In Indonesia, the drainage system is critical in urban planning and environmental management, especially in flood prevention. Regulations at both the national and local levels provide a legal framework for the operation and management of effective drainage systems in Indonesia. The legal foundations applicable to the implementation of drainage systems include, but are not limited to, the following:

- Law Number 17 of 2019 concerning Water Resources
- Government Regulation Number 42 of 2008 concerning the Management of Water Resources
- Ministerial Regulation of Public Works Number 12/PRT/M/2014

These regulations are supported by the Indonesian National Standard (SNI), which dictates drainage procedures, specifically SNI 8153: 2015, accommodating technological advances and national development. Local regulations also play a significant role in managing drainage systems, indicating that local governments are vital in regulating and managing drainage systems in their respective areas.

The basic principle of a drainage system involves collecting, channelling, treating, and disposing of water, primarily rainwater or wastewater. Drainage services require both minor and major systems (Grigg, 2012). The minor system includes the collection and channelling networks, while the major system involves larger piping and various types of flow channels.

Most developed areas result in increased land cover, thus reducing permeable land which subsequently increases surface runoff. Rainwater, if not properly drained, can cause discomfort, flood damage, and further health risks. This water contains pollutants from rain, air, and catchment surfaces. The primary function of a drainage system is the disposal of surface water originating from both natural and man-made sources (Lestari et al., 2017).

With time, conventional drainage systems that rely on discharge channels have shown limitations in handling the increased volume of rainwater. Since the 1980s, the paradigm in rainwater management has seen significant evolution (Radcliffe, 2019). Retention approaches aimed at holding rainwater for longer durations and reintegrating it into the urban hydrological cycle through natural hydrological processes have begun to be adopted. In this context, technologies aligned with this approach have developed, including Low Impact Development (LID), Green Infrastructures (GI), Sustainable Urban Drainage Systems (SuDS), Water Sensitive Urban Design (WSUD), Low Impact Urban Design and Development (LIUDD), and Water Sensitive Cities (WSC). LID is recognized as one of the more widely applied methodologies (Guo et al., 2019).

3. METHODS

The impact of site management on flooding was analysed using the Environmental Protection Agency Stormwater Management Model (EPA SWMM) software, a tool for simulating rainfall-runoff processes. This comprehensive analysis is divided into six stages, each involving a series of stages to thoroughly examine and evaluate surface runoff.

Initially, data collection and preparation are undertaken. This involves gathering topographic, hydrologic, and land use data relevant to the area under study. Additionally, information on existing and planned drainage systems is essential for modelling. Precipitation data from 2012 to 2021, sourced from the Central Java Climatology Station, is analysed to determine the precipitation intensity for a 10-year return period. This data is then converted into hourly precipitation distributions for modelling purposes. Satellite imagery from Google Maps and Google Earth provides detailed information on infiltration areas and land cover conditions, while topographic data, particularly elevation, is accessed and analysed using Google Earth.

Next, the EPA SWMM model is configured by inputting the collected data. This setup includes defining the drainage network, which consists of pipes, channels, and other control structures, and subdividing the area into subcatchments based on surface flow conditions and infiltration capacity.

The third stage involves simulating the existing conditions to understand the current state of the area. This includes modelling flooding and surface flow under rainfall conditions with a 10-year return period to establish a baseline. Following this, the model is modified to reflect site management plans, including integrating new drainage infrastructure and changes in land use. Mitigation measures to reduce potential flooding risks are also incorporated.

In the fifth stage, management scenarios are simulated based on the planned changes. The results of these simulations are compared with the baseline to assess the effectiveness of the management interventions in reducing flooding risks.

Finally, the results are analysed and interpreted to determine changes in the hydrological behaviour of the area. The focus is identifying significant changes in the frequency or intensity of flooding before and after site management.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The results and discussion are divided into two parts, i.e. existing conditions and impact assessment. Results from modelling and the recommendations are presented herein.

Existing Conditions

Direct evaluations of the current conditions in the area indicate that surface runoff and ponding do not significantly impact the environment. This assessment is based on the observation that the land cover area is highly limited. From a hydrological standpoint, this limitation suggests that the volume of ponding is likely insufficient to pose a substantial risk to the surrounding environment. Consequently, it can be inferred that the existing ponding, although present, does not reach levels that threaten either the environment or infrastructure. Furthermore, this suggests that the current natural absorption and drainage capacity in the area is adequate to manage rainfall volumes, thereby mitigating the potential for flooding or related environmental damage. However, it is crucial to acknowledge that these conditions could change with further development, which may increase land cover and potentially alter the hydrological dynamics in the future.

Modelling and simulations conducted on the developed areas indicate that the generated surface runoff is insignificant. The modelling encompasses the existing conditions of the Buffer Zone of the Arjuna and Aswatama Temple Area, Telaga Warna Area, Sikidang Area, and Sikunir Area.

Simulations of the existing conditions in the Arjuna and Aswatama Temple Area reveal that the surface runoff generated is 25 mm and 27 mm, respectively. Figure 1 illustrates that the land cover in the Buffer Zone of the Arjuna and Aswatama Temple Area, which is under development, remains very limited. This results in minimal surface runoff as the soil absorbs most of the rainfall. These existing conditions do not impact the Outstanding Universal Value (OUV) or attributes in the Arjuna and Aswatama Temple Area.

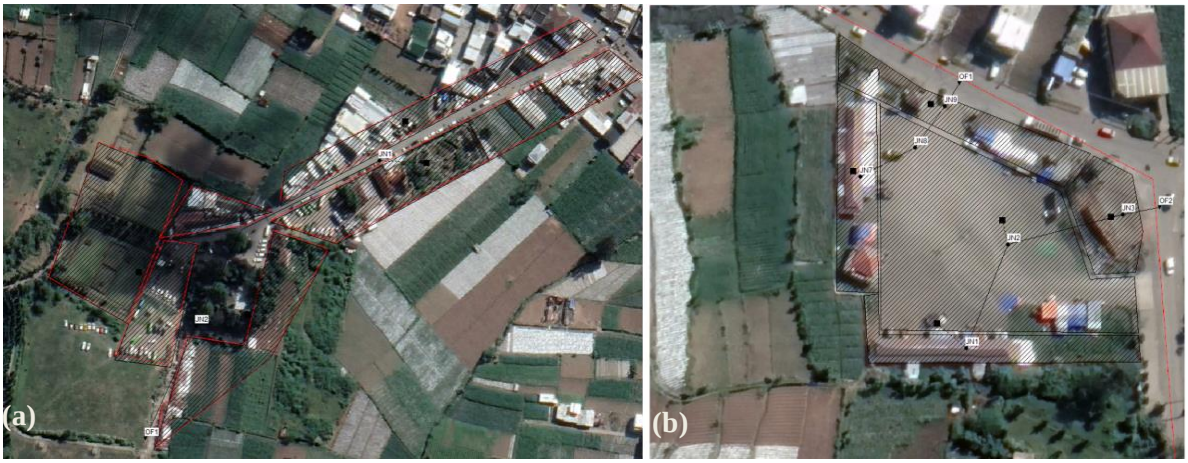


Figure 1. Existing condition of (a) the Buffer Zone of the Arjuna Temple and (b) Aswatama Temple Area

The simulation results for the existing conditions in the Telaga Warna Area are comparable to those observed in the Buffer Zone of the Arjuna and Aswatama Temple Area. The surface runoff in the Telaga Warna Area, as determined by the simulation, measures 31 mm. These runoff conditions do not significantly impact the surrounding environment. The extensive absorption area effectively manages the surface runoff (refer to Figure 2).

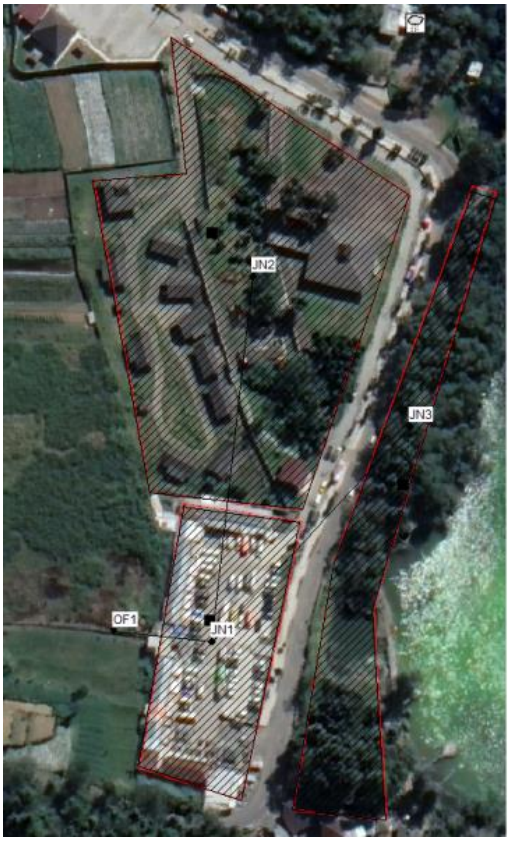


Figure 2. Existing condition of Telaga Warna Area

Prior to any modifications, the Sikidang Area possesses a substantial absorption area (refer to Figure 3). This extensive absorption capacity is beneficial for the environment. Additionally, the presence of existing channels facilitates the management of surface runoff in this area. Simulation results for the current conditions in the Sikidang Area indicate that the depth of surface runoff is 32 mm.



Figure 3. Existing condition of Sikidang Area

Simulations of the existing conditions in the Sikunir Area produce results that align with predictions from field surveys. The surface runoff generated in this area is approximately 40.5 mm. This significant runoff is attributed to the lack of existing drainage channels. Despite the depth of 40.5 mm, the surface runoff does not adversely affect the

surrounding environment. Similar to other areas, the Sikunir Area maintains a sufficiently large absorption capacity (refer to Figure 4).



Figure 4. Existing condition of Sikunir Area

Impact Assessment

The development within the Dieng Temple Complex area has potential implications for both hydrological parameters. Introducing impermeable surfaces due to construction activities increases surface runoff, potentially leading to reduced infiltration and increased water flow during rainfall events, which could exacerbate soil erosion and sedimentation issues.

The anticipated development in the area is expected to substantially increase impervious surfaces, leading to heightened surface runoff, as highlighted by Kaykhosravi et al. (2020). This runoff surge could exceed existing drainage systems' capacity, causing more frequent and severe ponding. To address these challenges, it is recommended to expand drainage infrastructure, incorporate green infrastructure to enhance infiltration, and install permeable paving materials to facilitate water absorption. These strategies effectively manage the runoff and bolster the urban area's resilience and environmental sustainability by integrating natural water management solutions with traditional infrastructure upgrades.

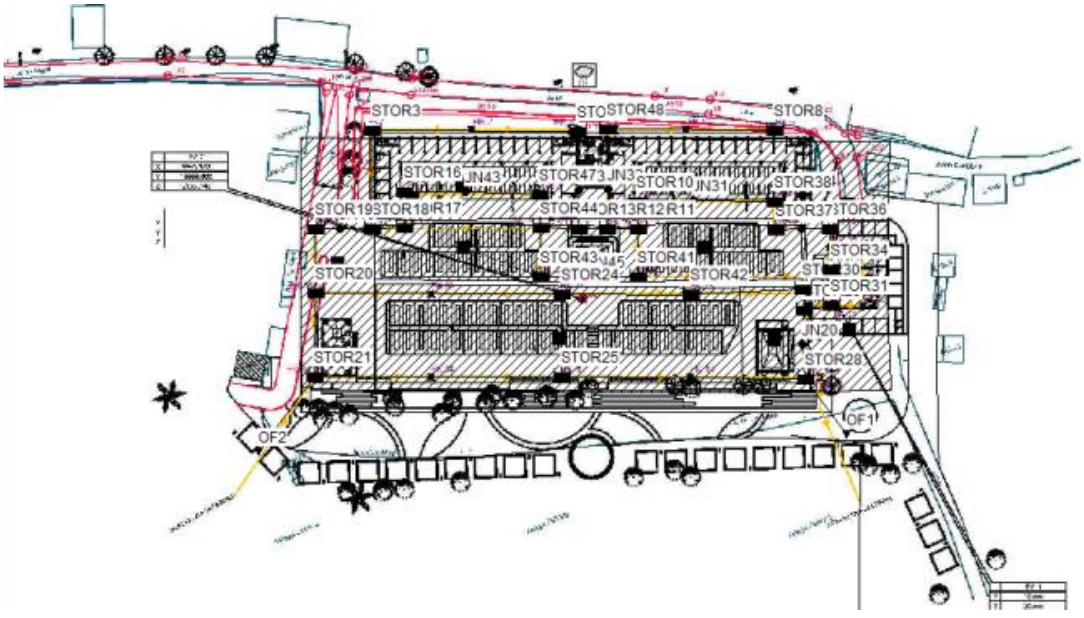


Figure 5. Planning of the development of Sikunir Area

According to the plan, the area's development will be completed with one of the LID techniques, i.e. infiltration wells.

Infiltration wells are increasingly important in advancing sustainable urban water management practices (Malinay et al., 2023). These systems effectively augment groundwater recharge—a critical process undermined by urbanisation and excessive water extraction activities. By facilitating the percolation of rainwater and surface runoff into the subsoil layers, infiltration wells significantly contribute to the replenishment of underground aquifers. This process is vital for maintaining the availability of groundwater, which serves as an essential resource for drinking water, agricultural irrigation, and various industrial applications. The strategic implementation of infiltration wells thus plays an indispensable role in urban hydrological systems, enhancing water security and resilience. Furthermore, studies, such as those reported by Netzer et al. (2024), demonstrate that infiltration wells can substantially decrease urban drainage demands by up to 40%, underscoring their utility in densely populated urban areas.

The simulation modeling conducted shows that the introduction of infiltration wells can effectively manage the increased surface runoff resulting from additional land cover. This control is crucial for mitigating the impact of urban expansion on natural water systems. Taking Sikunir Area as an example, the increase in surface runoff observed in the Sikunir Area is a predictable outcome due to the extensive land coverage alterations implemented in the area (see Figure 5). Land that was previously open and allowed for water infiltration has been sealed, preventing water from being absorbed into the soil. The runoff increment was measured, rising from an initial 40.5 mm to 43 mm. Nevertheless, the planned drainage systems and infiltration wells are designed to effectively manage this increase in runoff, ensuring it does not adversely impact the area as no flooding is detected in the model.

To align the development with sustainable practices, it is recommended to adopt an integrated approach that combines modern engineering solutions with traditional knowledge:

- Adopt Low Impact Development (LID) Techniques: These techniques are designed to mimic natural hydrological conditions, which helps in managing the runoff at its source. Examples include green roofs, rain gardens, and permeable pavements.
- Implement Renewable Energy Solutions: The installation of solar panels or small-scale hydro turbines can reduce the dependency on non-renewable energy sources and decrease the carbon footprint of the development.
- Cultural Heritage Conservation: Any development within the area should be conducted with a focus on conserving and enhancing the site's cultural and archaeological significance. This includes the use of materials and construction techniques that do not adversely affect the existing structures and landscapes.

5. CONCLUSION

The comprehensive study conducted on the hydrological impacts of proposed developments in the Dieng Temple Complex area highlights the need for careful planning and implementation of mitigation strategies. By adhering to the recommendations provided and continuously monitoring the impact, it is possible to ensure that the development not only meets the economic objectives but also preserves the invaluable cultural and environmental heritage of the area for future generations.

REFERENCES

Butler, D., Digman, C., Makropoulos, C. and Davies, J.W. (2018). *Urban drainage*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis.

Aztrianto, Y., Maarif, S., Kurniawan, L. and Pramono, S.A. (2024). “Analysis of The Effectiveness of Infiltration Wells in Disaster Risk Reduction: Literature Study”. *International Journal of Humanities Education and Social Sciences*, Vol. 3, No. 5, 2361-2368.

Gumelar, G.K. and Rully, R. (2022). “Evaluasi Kebijakan Pelestarian Zonasi dan Cagar Budaya di Kawasan Dataran Tinggi Dieng”. *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, Vol. 27, No. 1, 1-10.

Grigg, N.S. (2012). *Water, wastewater, and stormwater infrastructure management*, Second Edition. Boca Raton: CRC Press.

Guo, X., Du, P., Zhao, D. (2019). “Modelling Low Impact Development in Watersheds Using the Storm Water Management Model”. *Urban Water Journal*, Vol. 16, No. 2, 146–155.

Kaykhosravi, S., Khan, U.T. and Jadidi, M.A. (2020). “The Effect of Climate Change and Urbanization on the Demand for Low Impact Development for Three Canadian Cities”. *Water*, Vol.12, No. 5, 1280.

Lestari, L.B., Mayang, A.Y., Budieny, H. and Darsono, S. (2017). “Perencanaan Sistem Drainase Kabupaten Magelang”. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, Vol. 6, No. 1, 356–365.

Listyorini, H., Hakim, A.R. and Bawaulu, E.A. (2023). “The Pattern of Travel Decisions and Tourist Expenditures for Local Tourism Revenue in Wonosobo Regency”. *International Conference On Digital Advanced Tourism Management And Technology*, Vol. 1, No. 2, 284-299.

Malinay, G.L.C., Santos, C.D., Sarmiento, G.A.M.B., Santos, F.D. and Sanson, D.B. (2023). “A Review of Approaches to Drainage System Management: Current Status and Future Research Directions”. *International Civil Engineering and Architecture Conference* (Springer Nature Singapore, Singapore), pp. 707-719.

Netzer, L., Kurtzman, D., Ben-Hur, M., Livshitz, Y., Katzir, R. and Nachshon, U. (2024). “Novel Approach to Roof Rainwater Harvesting and Aquifer Recharge in An Urban Environment: Dry and Wet Infiltration Wells Comparison”, *Water Research* 252, p.121183.

Radcliffe, J. C. (2019). History of water sensitive urban design, Low Impact Development adoption in Australia and internationally, in Approaches to Water Sensitive Urban Design, pp. 1–24, Elsevier.

GELOMBANG LAUT (STUDI KASUS: PULAU MAKALEHI, PROVINSI SULAWESI UTARA)

Asep Irwan[1*], Muhammad Fatkhurrozi[2], Adinda Maharani[3] dan Arif Bagas Kesuma[4]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sains Bandung, Kota Deltamas Lot-A1 CBD, Jl. Ganesha Boulevard No.1 Blok A, Pasirranji, Kec. Cikarang Pusat, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat*
***e-mail**: asepirwan.marine@gmail.com*
[2]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung
e-mail: fatkhurrozi@windowslive.com
[3] Program Studi Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat
e-mail: adndamahrani@gmail.com
[4]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera, Jl. Terusan Ryacudu, Way Huwi, Kec. Jati Agung, Kabupaten Lampung Selatan, Lampung
e-mail: arifbagas03@gmail.com

ABSTRAK

Pelabuhan Penyeberangan merupakan pelabuhan umum yang melayani penyeberangan antar pulau dan merupakan pelabuhan umum yang sangat vital menggerakkan roda ekonomi Indonesia secara umum. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi peran pentingnya pelabuhan penyeberangan yang ditinjau berdasarkan dari aspek pola musim gelombang laut, dimana lokasi studi kasus dilakukan di Pulau Makalehi, Provinsi Sulawesi Utara. Pulau Makalehi ini merupakan Pulau yang berada di wilayah pemerintah Kabupaten Siau Tagulandang Biaro Provinsi Sulawesi Utara. Pulau ini diduga merupakan puncak gunung berapi laut yang muncul ke permukaan di masa silam. Hal tersebut didukung oleh topografi wilayahnya yang berupa kerucut terpancung berlereng terjal dengan bekas kawah di tengah yang sekarang berupa danau. Metode penelitian yang dilakukan adalah survei lapangan dan analisis hindcasting serta pemodelan gelombang, kemudian dilakukan analisis probabilitas kejadian gelombang terhadap nilai *calm* sehingga didapatkan pola musim gelombang setiap tahunnya. Berdsarkan hasil dari simulasi data gelombang 10th di Pulau Makalehi maka dapat disimpulkan pola musim gelombang di Pulau Makalehi cenderung dominan dari sisi Timur Laut dengan masa pola musim dalam satu tahun adalah 5 bulan yaitu bulan Januari, Februari, Maret, April, Mei, Juni. Kemduian musim selatan terjadi hanya 2 bulan yaitu bulan Juli s.d Agustus, selanjutnya musim barat terjadi pada bulan Desember. Meskipun musim barat hanya terjadi satu bulan dalam satu tahun ketinggian gelombang berdasarkan analisis selama 10th musim barat ini merupakan gelombang tertinggi dari musim lainnya yaitu dapat mencapai ketinggian gelombang sampai 4.8 m.

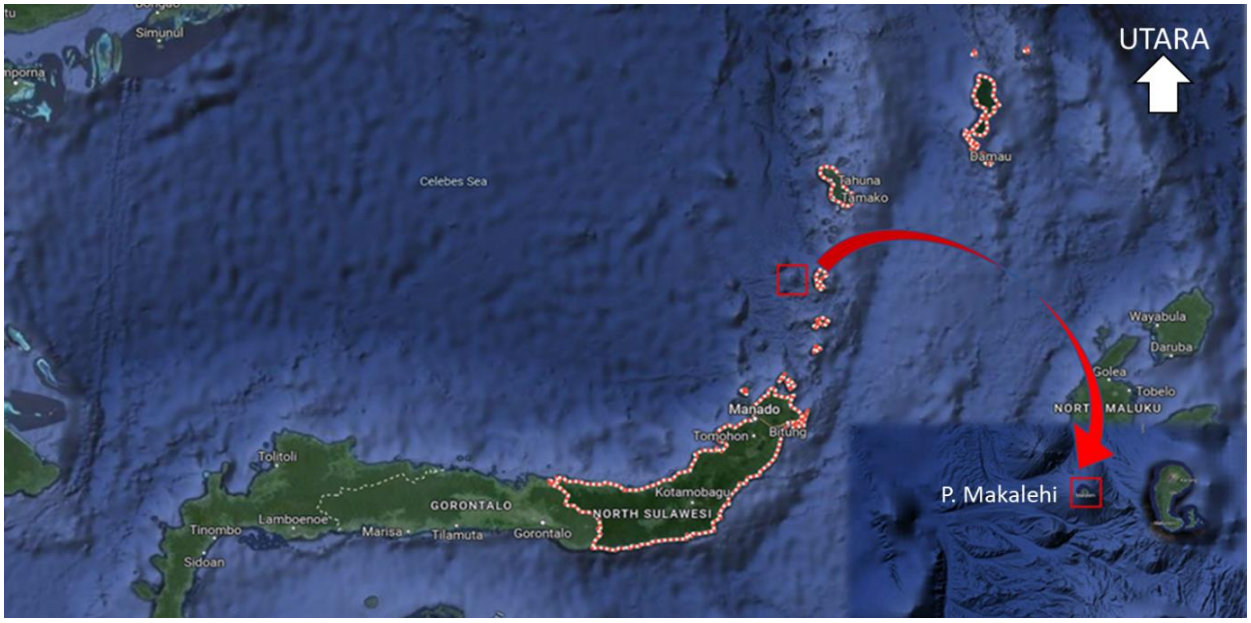
Kata kunci: Pelabuhan Penyeberangan, Makalehi, Gelombang Laut

1. PENDAHULUAN

Pelabuhan merupakan salah satu bagian dari sistem transportasi yang berfungsi sebagai tempat bongkar muat arus barang dan penumpang. Dengan adanya pelabuhan diharapkan dapat memenuhi kebutuhan akan fasilitas bongkar muat barang dan penumpang, yang menunjang pembangunan/perkembangan wilayah belakangnya (*hinterland*). Pembangunan pelabuhan bukanlah merupakan kegiatan yang dapat berdiri sendiri, tapi berkaitan erat dengan aspek-aspek ekonomi dan sosial yang berada dalam jangkauan pelayanan angkutan pelabuhan tersebut. Pelabuhan penyeberangan dipergunakan untuk melayani angkutan penyeberangan. Angkutan penyeberangan dimaksudkan untuk melayani angkutan penumpang dan kendaraan pada lintas penyeberangan. Lintas penyeberangan tidak selalu menghubungkan antar dua pelabuhan penyeberangan, dan dimungkinkan juga menghubungkan antar dua pelabuhan laut atau sungai atau menghubungkan antara pelabuhan laut dengan pelabuhan penyeberangan yang dilayani sebagai angkutan penyeberangan dan hanya untuk melayani kepentingan umum. Penetapan pelabuhan penyeberangan dilakukan dalam hal pembangunan dan pengoperasiannya ditujukan untuk itu dan memenuhi persyaratan sebagai pelabuhan. Penentuan rencana titik pelabuhan tentunya tidak akan lepas pada aspek oseanografi, salah satunya adalah gelombang laut. Dalam analisis nya untuk mendapatkan pola dan musim gelombang dapat dilakukan dengan mentransformasikan data angin selama 10 tahun dilokasi kajian kemudian dilakukan penentuan titik pembangkitan gelombang lalu di kalkulasikan dengan metode probabilitas secara statistik. Selanjutnya berdasarkan Irwan, A., Oktavia, P., & Rusdiana, D. (2021) hasil dari analisis probabilitas tersebut dapat dilanjutkan pada tahap simulasi model matematik secara numerik dengan persamaan kekekalan massa dan momentum. Dalam merencanakan sebuah pelabuhan selanjutnya terdapat kriteria ketahanan kapal terhadap besar gelombang, ditentukan berdasarkan besaran kapal yaitu semakin besar ukuran kapal maka semakin besar tinggi gelombang yange disyaratkan aman (Soejono Kramadibrata. 2001).

Pulau Makalehi adalah salah satu pulau luar Indonesia yang mempunyai peranan penting sebagai kawasan sempadan negara (Marschiavelli, M. I. C. 2007). Pulau Makalehi adalah pulau terluar Indonesia yang terletak di Laut Sulawesi dan berbatasan dengan negara Filipina. Tahun 2017 Pulau Makalehi ditetapkan sebagai Pulau-Pulau Kecil Terluar,

Terluar. Pelabuhan penyeberangan makalehi terletak di Pulau Makalehi tepatnya di Kabupaten Kepulauan Siau Tagulandang Biaro, Provinsi Sulawesi Utara. Berdasarkan Keputusan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor KM 217 Tahun 2022 Tentang Perubahan Ketiga Atas Keputusan Menteri Perhubungan Nomor KP 432 Tahun 2017 Tentang Rencana Induk Pelabuhan Nasional, Pelabuhan Penyeberangan Makalehi merupakan Pelabuhan Penyeberangan Kelas III. Namun sampai saat ini lokasi atau pelabuhan penyeberangan makalehi tersebut belum terbangun dilokasi rencana. Pulau Makalehi terdapat 3 Kampung yaitu, Makalehi Induk, Makalehi Timur dan Makalehi Utara. Saat ini di lokasi terdapat pelabuhan eksisting yang merupakan Pelabuhan Laut yang berada di Desa Makalehi Induk dan sisi Utara terdapat tambatan perahu yang berada di Desa Makalehi Utara.



Sumber: Google Earth 2024, diolah kembali.

Gambar 1. Orientasi Lokasi Pulau Makalehi

Sehingga menjadi penting keberadaan Pelabuhan Penyeberangan di Pulau Makalehi yang ditinjau dari aspek pola musim gelombang. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi peran pentingnya pelabuhan penyeberangan yang ditinjau berdasarkan dari aspek pola musim gelombang laut yang juga dapat digunakan sebagai gambaran awal dalam penentuan pola operasi pelabuhan penyeberangan nantinya.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan adalah dengan menggunakan survei lapangan yang digunakan sebagai visualisasi kondisi dan karekteristik Pulau Makalehi. Selain itu peneliti menggunakan metode kuantitatif karena informasi yang diperoleh akan lebih terperinci serta sesuai dengan sasaran dengan melakukan observasi secara mendalam di lokasi penelitian tersebut. Selanjutnya dilakukan analisis *hindcasting* atau transformasi gelombang laut dari data angin lalu dilakukan tahap simulasi model matematik secara numerik dengan persamaan kekekalan massa dan momentum.

Data dalam penelitian ini menggunakan data angin digunakan sebagai data masukan perhitungan tinggi gelombang yang terjadi di sekitar Pulau Makalehi. Data angin yang digunakan adalah data angin dari ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) pada perairan Sulawesi Utara tepatnya di perairan Pulau Makalehi.

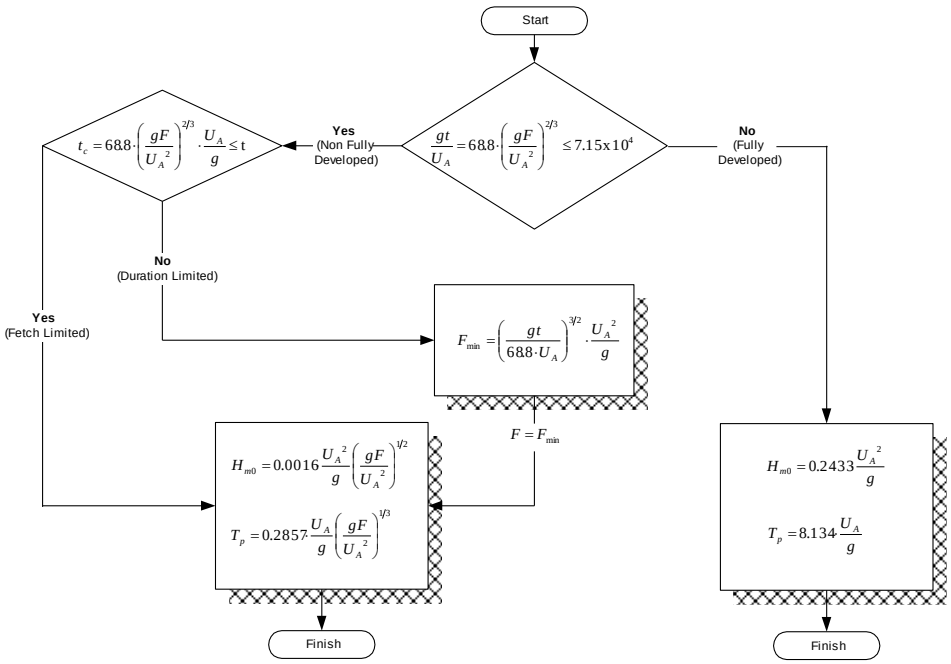
Untuk melakukan peramalan gelombang di suatu perairan diperlukan masukan berupa data angin dan peta batimetri. Peta perairan lokasi dan sekitarnya diperlukan untuk menentukan besarnya “fetch” atau kawasan pembentukan gelombang. Fetch adalah daerah pembentukan gelombang yang diasumsikan memiliki kecepatan dan arah angin yang relatif konstan. Adanya kenyataan bahwa angin bertiup dalam arah yang bervariasi atau sembarang, maka panjang fetch diukur dari titik pengamatan dengan interval 5°. Panjang fetch efektif dihitung untuk 8 arah mata angin dan ditentukan berdasarkan rumus berikut.

$$Lf_i = \frac{\sum Lf_i . \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i} \quad (1)$$

dimana

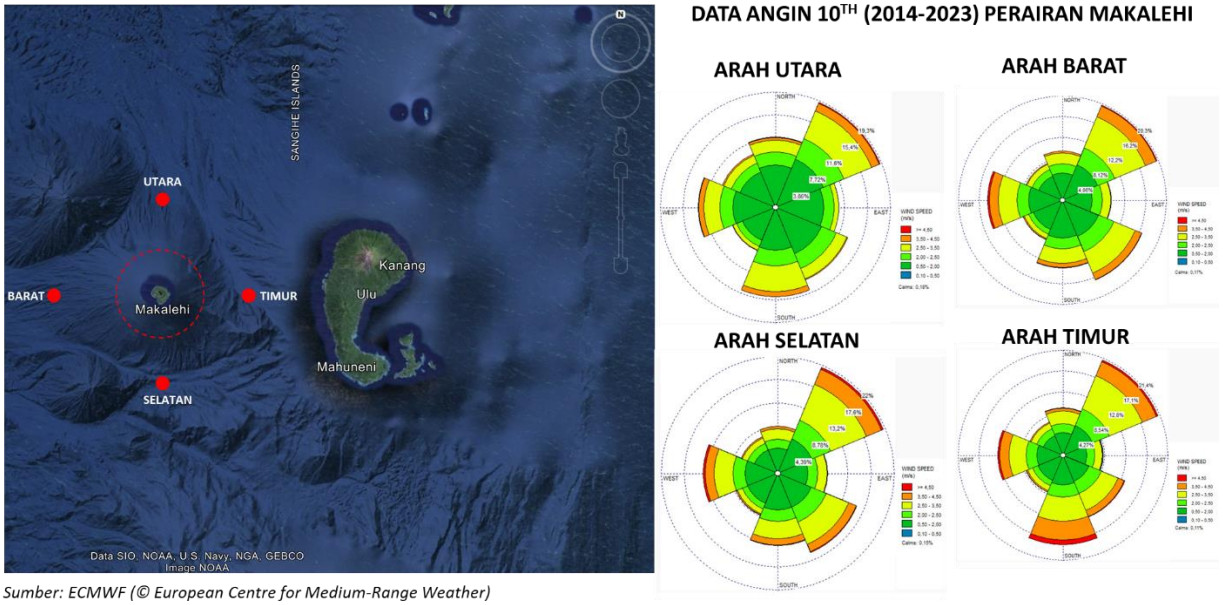
Lfi	=	panjang fetch ke-i
αi	=	sudut pengukuran fetch ke-i
i	=	jumlah pengukuran fetch

fetch (22,5° searah jarum jam dan 22,5° berlawanan arah jarum jam dari masing-masing arah mata angin). Pembentukan gelombang di perairan dalam (*deep water waves*) dianalisa dengan formula-formula berikut. Prosedur peramalan ini berlaku untuk kondisi gelombang tidak terbentuk penuh (*non-fully developed sea*), baik untuk kondisi fetch terbatas (*fetch limited condition*), maupun kondisi durasi terbatas (*duration limited condition*). Namun nilai jarak fetch melebihi dari 200 km maka jarak fetch dibatasi, berdasarkan Penaksiran Gelombang (Goda, 2010).



H_S = tinggi gelombang signifikan
T_P = periode puncak gelombang
F = panjang efektif *fetch*
U_A = faktor tekanan angin
t = durasi angin

Gambar 2. Diagram alir proses peramalan gelombang berdasarkan data angin



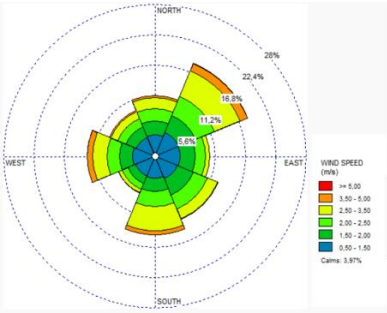
Sumber: ECMWF (© European Centre for Medium-Range Weather)

Gambar 3. Titik dan Mawar Angin setiap Arah dari ECMWF di Sekitar Pulau Makalehi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

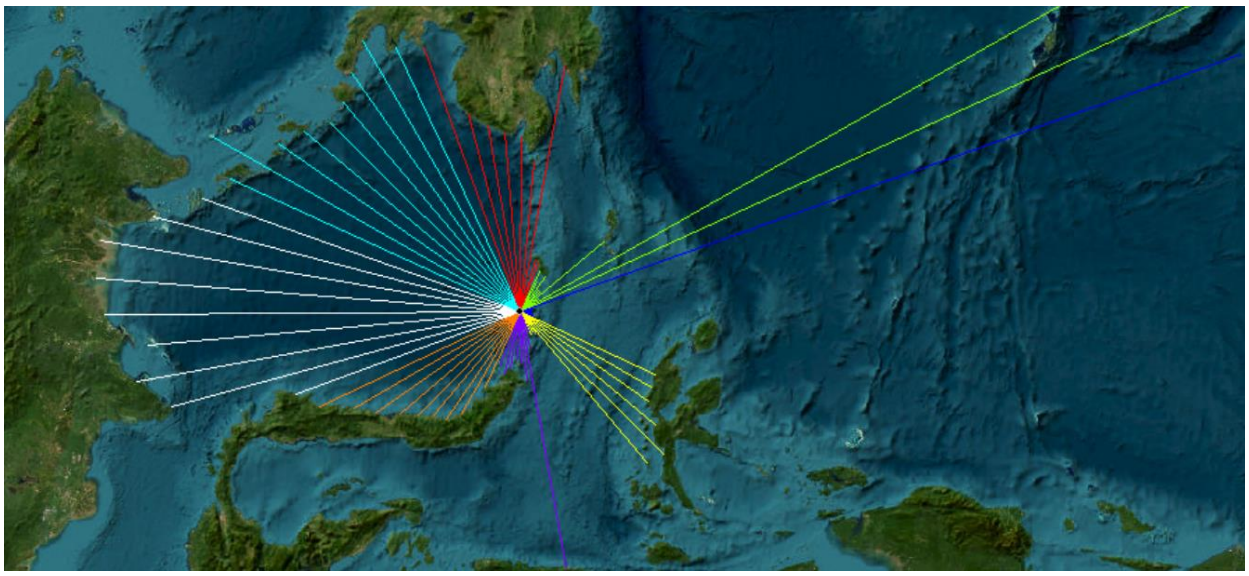
Berdasarkan data diagram mawar dan tabel distribusi frekuensi selama 10 tahun terlihat angin dominan berasal dari arah Timur luat dan Selatan dengan frekuensi sebesar 14-18.5 %. Kecepatan angin tertinggi mencapai 12.74 m/s. Sementara kecepatan angin dengan intensitas tertinggi berada pada kisaran 0.5-3.5 m/s. Setelah melihat sebaran angin

kondisi angin ketika terjadi perbedaan musim. Pada musim barat yang terjadi pada bulan Desember-Februari angin dominan bergerak dari arah barat, utara dan timur laut dengan kecepatan 2-3.5 m/s. Sementara saat musim timur yang terjadi pada bulan Juni-Agustus angin cenderung bergerak dari arah Selatan dan tenggara 2.5-3.5 m/s.



Directions	Wind Classes (m) Frequency Distribution						Total (%)
	0,50-1,50	1,50-2,00	2,00-2,50	2,50-3,50	3,50-5,00	>=5,00	
N	4,0	2,6	2,2	2,0	0,5	0,0	11,2
NE	4,8	3,4	3,8	5,1	1,5	0,0	18,5
E	4,7	2,8	1,8	0,8	0,0	0,0	10,1
SE	4,5	3,2	2,8	1,9	0,1	0,0	12,6
S	4,0	2,5	2,7	4,4	0,8	0,0	14,5
SW	3,9	1,5	1,1	0,7	0,1	0,0	7,4
W	4,2	2,4	2,3	2,7	1,0	0,0	12,6
NW	3,8	2,1	1,7	1,4	0,2	0,0	9,2
Sub-Total	33,9	20,4	18,4	19,0	4,2	0,1	96,0
Calms							4,0
Total							100,0

Gambar 4. Windrose Total 10th dan Prosentase Angin di perairan Pulau Makalehi (2014-2023)



Sumber: Google Earth 2024, diolah kembali.

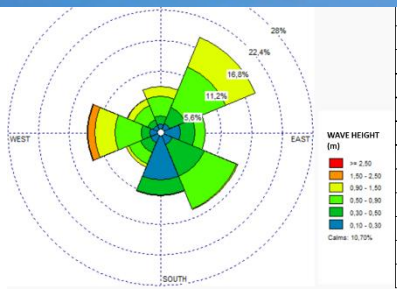
Gambar 5. Titik Fetch di Pulau Makalehi

Didapatkan hasil total jarak fetch setiap arah :

Tabel 2. Kesimpulan Total Panjang Fetch Efektif Pulau Makalehi

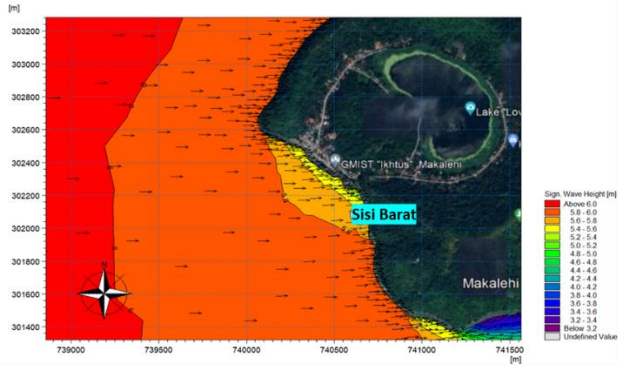
Arah	Fetch Efektif (m)
N	**333484.0659**
NE	**392178.5009**
E	**180842.4626**
SE	**243680.0996**
S	**41550.86077**
SW	**298140.3267**
W	**735605.0739**
NW	**585930.0401**

Pulau makalehi yang merupakan pulau kecil dengan karakteristik perairan terbuka dan semi terbuka di segala sisinya menyebabkan sumber gelombang berasal dari 8 sisi mata angin. Sisi Barat dan Utara berbatasan dengan perairan sangat terbuka yaitu Laut Celebes dan Philipina. Sementara sisi timur dan selatan karakteristik perairannya semi terbuka karena berbatasan dengan daratan Pulau Siau dan sekitarnya, Sumatera Utara. Berdasarkan hasil pemodelan gelombang dari delapan arah mata angin yang kemudian di analisis ketinggian gelombang di Pulau Makalehi. Sisi Barat makalehi gelombang tenang dari sisi timur, sisi selatan tenang dari arah gelombang utara, begitupun sisi timur tenang ketika musim gelombang dari barat.



	0,10-0,30	0,30-0,50	0,50-0,90	0,90-1,50	1,50-2,50	>=2,50	(%)
N	1,5	1,5	3,6	1,8	0,0	0,0	8,4
NE	1,9	3,1	8,0	5,8	0,0	0,0	18,7
E	3,6	2,7	1,9	0,0	0,0	0,0	8,3
SE	2,4	6,3	6,5	0,1	0,0	0,0	15,3
S	8,6	2,9	0,1	0,0	0,0	0,0	11,6
SW	2,1	1,9	2,3	0,6	0,0	0,0	6,9
W	2,0	1,5	4,9	3,6	1,3	0,1	13,4
NW	1,5	1,1	2,7	1,2	0,1	0,0	6,7
Sub-Total	23,7	21,0	29,9	13,2	1,4	0,1	89,3
Calms							10,7
Total							100,0

Gambar 6. Waverose Total 10th dan Prosentase Angin di perairan Pulau Makalehi (2014-2023)



Arah Gelombang	Gelombang Maksimum 50th di perairan Sisi Barat	Gelombang Maksimum 50th di perairan Sisi Utara	Gelombang Maksimum 50th di perairan Sisi Timur
	(m)	(m)	(m)
Utara	0	1.95	0
Timur Laut	0	2.4	2.2
Timur	0	0.96	1.1
Tenggara	0	0	1.58
Selatan	0.95	0	1.05
Barat Daya	1.88	1.2	1.35
Barat	5.6	5.6	0
Barat Laut	4.0	5.0	0

Gambar 7. Titik dan Mawar Angin setiap Arah dari ECMWF di Sekitar Pulau Makalehi

Tabel 3. Prosentase Musim Gelombang yang terjadi selama 10th di Pulau Makalehi

Directions		Persentase Kejadian [%] Gelombang Bulanan di Pulau Makalehi											
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Agu	Sep	Okt	Nov	Des
337.5 - 22.5 Derajat	N	23.0%	19.0%	18.1%	8.3%	1.6%	0.6%	0.2%	0.4%	0.6%	1.2%	10.9%	18.1%
22.5 - 67.5 Derajat	NE	33.0%	50.6%	51.1%	34.2%	7.9%	1.6%	0.4%	0.2%	1.2%	3.0%	19.5%	24.3%
67.5 - 112.5 Derajat	E	3.5%	3.4%	5.4%	12.4%	20.1%	11.9%	4.6%	3.4%	6.5%	13.3%	10.2%	4.1%
11.5 - 157.5 Derajat	SE	0.3%	0.3%	0.3%	2.2%	21.5%	30.5%	33.1%	34.9%	32.5%	23.9%	2.8%	0.2%
157.5 - 202.5 Derajat	S	0.1%	0.0%	0.5%	0.8%	7.0%	15.9%	33.7%	41.4%	26.2%	11.0%	0.6%	0.4%
202.5 - 247.5 Derajat	SW	2.1%	1.0%	1.8%	4.2%	8.3%	11.7%	12.3%	6.7%	11.8%	11.5%	7.2%	3.9%
247.5 - 292.5 Derajat	W	18.5%	12.3%	10.4%	19.9%	11.0%	9.4%	5.6%	3.3%	6.9%	16.5%	18.7%	28.9%
292.5 - 337.5 Derajat	NW	16.4%	10.4%	8.0%	5.9%	2.7%	2.1%	0.9%	0.9%	1.8%	3.5%	12.1%	15.6%
Calm		3.1%	3.0%	4.4%	12.1%	19.9%	16.3%	9.2%	8.8%	12.5%	16.1%	18.0%	4.5%
Total		96.9%	97.0%	95.6%	87.9%	80.1%	83.7%	90.8%	91.2%	87.5%	83.9%	82.0%	95.5%
Arah Dominan		NE	NE	NE	NE	SE	SE	S	S	SE	SE	NE	W
Tinggi Gelombang (Max. Bulanan) 10TH		2.8 m	2.8 m	2.8 m	2.8 m	1.7 m	1.7 m	1.1 m	1.1 m	1.7 m	1.7 m	2.8 m	4.8 m

Berdsarkan hasil dari simulasi data gelombang 10th di Pulau Makalehi maka dapat disimpulkan pola musim gelombang di Pulau Makalehi cenderung dominan dari sisi Timur Laut dengan masa pola musim dalam satu tahun adalah 5 bulan yaitu bulan Januari, Februari, Maret, April, Mei, Juni. Kemduian musim selatan terjadi hanya 2 bulan yaitu bulan Juli s.d Agustus, selanjutnya musim barat terjadi pada bulan Desember. Meskipun musim barat hanya terjadi satu bulan dalam satu tahun ketinggian gelombang berdasarkan analisis selama 10th musim barat ini merupakan gelombang tertinggi dari musim lainnya yaitu dapat mencapai ketinggian gelombang sampai 4.8 m.

4. KESIMPULAN

Berdsarkan hasil penelitian yang dilakukan didapatkan hasil kesimpulan pola musim gelombang yang terjadi di Pulau Makalehi yaitu dominansi kejadian musim gelombang terjadi pada musim timur laut yang terjadi pada bulan Januari, Februari, Maret, April, Mei, Juni sedangkan gelombang tertinggi terjadi pada bulan Desember yang bergerak dari arah barat. Sehingga dalam hal ini Pulau makalehi secara keseluruhan

pelabuhan penyeberangan melihat hasil dari pola musim gelombang sisi barat atau barat daya lebih mendapatkan masa operasi yang cukup baik dibandingkan sisi-sisi wilayah lainnya. Namun demikian, Pulau Makalehi ini tidak hanya cukup satu pelabuhan jika ingin mendapatkan kunjungan kapal selama satu tahun penuh. Sehingga pelabuhan satunya menjadi sebagai alternatif untuk menunjang pola pergerakan penyeberangan yaitu dapat direkomedasikan sisi selatan atau sisi barat.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penelitian yang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Coastal Engineering Manual – Part II, US Army Corps of Engineers (Download: http://chl.erdc.usace.army.mil)

Dean, R.G. and Dalrymple, R. A. (1991). "Water waves mechanics for engineers and scientists". World Scientific.

DHI : Denmark. DHI. 2017. Spectral Wave Module Scientific Document. DHI : Denmark.

DHI Water and Environtment.. MIKE 21 Hydrodinamic, Denmark.

DHI. 2017. Flow Model FM Module Scientific Document.

Dishidros TNI AL. (2009). Peta nomor 400 dan 340, Minahasa Utara

Goda, Y. (2010). Random Seas and Design of Maritime Structures, 3rd Edition. London: World Scientific.

Irwan, A., Oktavia, P., & Rusdiana, D. (2021). Kajian Hidro-Oseanografi Untuk Rehabilitasi Suaka Margasatwa Muara Angke–Jakarta Utara. *JOURNAL OF APPLIED SCIENCE (JAPPS)*, *3*(2), 057-068.

Marschiavelli, M. I. C. (2007). Penilaian keterancaman terhadap bencana bagi Pulau Makalehi, Sulawesi Utara, Indonesia.

Soejono Kramadibrata. 2001. "Perencanaan Pelabuhan", Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indones

Perencanaan Sistem Air Bersih Tahan Perubahan Iklim Desa Hambalang

Feril Hariati, Dini Aryanti, Tedi Triana
Program Studi Teknik Sipil, Universitas Ibn Khaldun Bogor

ABSTRAK

Sistem penyediaan air bersih di wilayah perdesaan sangat rentan terhadap perubahan iklim. Perubahan kekerapan dan intesitas hujan berdampak pada ketersediaan air baku. Perencanaan sistem air bersih harus direncanakan dengan memperhitungkan fluktuasi air baku. Seperti halnya perencanaan air bersih di RT14 RW05 Desa Hambalang, yang mengandalkan mata air sebagai sumbernya. Hasil pengukuran yang dilakukan pada 1 Juni 2024, menunjukkan debit mata air 1,00 l/dtk. Data curah hujan dari Stasiun Citeko, pada rentang waktu Mei dan Juni, tinggi hujan rata-rata hanya mencapai 23 mm, dengan nilai terendah nol atau tidak terdapat hujan sama sekali, termasuk pada saat pengukuran debit. Dengan demikian, nilai debit pengukuran dianggap sebagai debit dasar yang dipakai dalam perencanaan. Agar sistem perencanaan tahan terhadap perubahan iklim, maka ditetapkan jumlah warga yang dilayani adalah jumlah warga RT 14 RW05 pada 10 tahun yang akan datang, dengan cakupan pelayanan mencapai 100%. Struktur *broncaptering* dan resevoir direncanakan untuk melindungi mata air dan menyimpan kelebihan air dari mata air yang tidak dimanfaatkan oleh warga, sebagai cadangan air bersih, dengan volume mencapai 45 m^3. *Hydrant* umum sebanyak 6 unit direncanakan sebagai tempat warga mengambil air secara langsung, atau memasang pipa untuk mengalirkan air ke rumah warga. Langkah terakhir dalam merencanakan sistem air bersih tahan perubahan iklim adalah, memastikan bahwa sistem jaringan dari reservoir ke hydrant umum dapat mengalirkan air dengan baik, dengan menggunakan pendekatan analisis hidrolika perpipaan. Perangkat lunak EPANET 2.0 digunakan sebagai alat bantu dalam memeriksa tekanan serta kecepatan aliran air dalam pipa.

Kata kunci: Desa Hambalang, air bersih, perubahan iklim, EPANET 2.0

1. PENDAHULUAN

Penyediaan air bersih saat ini masih menjadi masalah bagi Perintah Daerah Kabupaten Bogor. Di beberapa wilayah, terutama di pedesaan, penyediaan air bersih masih mengandalkan sumur dan mata air. Meskipun demikian, saat musim kemarau, ketinggian air dalam sumur dan debit mata air cenderung berkurang. Warga mengalami kekeringan. Terlebih beberapa tahun terakhir ini, dampak perubahan iklim tampak jelas terjadi di Kabupaten Bogor, yaitu hujan dengan intensitas tinggi namun durasinya pendek, distribusi curah hujan tidak merata dan kemarau panjang (Susanto dkk., 2020). Oleh karena itu, desa-desa yang masyarakatnya tidak terlayani dengan pelayanan air bersih sistem perpipaan rentan terhadap kekurangan air bersih, krisis kesehatan akibat konsumsi air yang tidak higienis, dan konflik sosial akibat perebutan sumber air.

Desa Hambalang merupakan wilayah pedesaan di Kabupaten Bogor yang masyarakatnya masih mengandalkan pemenuhan air bersihnya dari sumur gali dan mata air. Berdasarkan data yang diperoleh dari kantor desa, sumber air bersih masyarakat meliputi mata air sejumlah 18 unit yang dimanfaatkan oleh 1.600 KK, sumur gali sebanyak 713 unit yang dimanfaatkan oleh 900 KK, dan sumur pompa sebanyak 520 unit yang dimanfaatkan oleh 600 KK. Berdasarkan data tersebut, dapat dikatakan mata air menjadi sumber utama pemenuhan kebetuhan air bersih bagi masyarakat Desa Hambalang. Salah satunya oleh warga RT 14 RW 05, yang memiliki 2 mata air. Akan tetapi salah satu mata air berada pada lahan pribadi, yang dijadikan sebagai area rekreasi Agrowisata Bukit Hambalang, berdasarkan Peraturan Daerah Kabupaten Bogor Nomor 2 Tahun 2022 tentang Rencana Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Kabupaten Bogor Tahun 2022-2052. Dengan demikian, warga RT 14 RW 05, dengan jumlah sekitar 100 KK mengandalkan mata air sebagai sumber air bersih. Oleh karena itu, perlu dilakukan perencanaan pemanfaatan mata air di sekitar RT 14 RW 05, Desa Hambalang, agar kebutuhan air bersih bagi warga dapat terpenuhi dari segi kuantitas.

2. KONDISI TERKINI PENYEDIAAN AIR BERSIH WARGA DESA HAMBALANG

Mata air adalah sumber air alami yang muncul ke permukaan tanah dari lapisan air bawah tanah melalui celah-celah batuan atau tanah (Adiningrum, 2017, Lestari & Suprapto., 2019). Mata air sering kali terletak di daerah pegunungan atau perbukitan dan telah digunakan sebagai sumber air bersih oleh masyarakat sejak zaman dahulu. Dengan kualitas air yang relatif lebih bersih dan segar, mata air memainkan peran penting dalam memenuhi kebutuhan air sehari-hari, terutama di daerah pedesaan dan pinggiran kota yang belum terjangkau oleh jaringan distribusi air modern. Sebagai sumber air bersih, mata air memiliki beberapa keunggulan, antara lain kualitas air yang baik dan debit yang cenderung stabil, serta membutuhkan

infrastruktur yang sederhana dalam pemanfaatannya.
Umumnya mata air muncul dari permukaan tanah atau celah-celah batuan dalam bentuk semburan, dan membentuk satu genangan. Hal yang sama ditemukan pada mata air di kawasan RT 14 RW 05 Desa Hambalang (Gambar 1). Kondisi mata air terbuka tanpa perlindungan, sehingga rentan terkontaminasi oleh zat yang berbahaya. Selain itu, pemanfaatan mata air oleh warga dilakukan dengan cara menanam pipa PVC dengan diameter ½" di sekitar mata air, untuk disalurkan ke rumah-rumah warga. Tidak ada pengaturan khusus terhadap aliran air, sehingga apabila kebutuhan air warga telah terpenuhi, air dibiarkan terbuang begitu saja.



Gambar 1. Mata air di kawasan RT 14 RW 05, Desa Hambalang. (A) kondisi genangan mata air, (B) saluran yang mengalirkan mata air ke pipa-pipa warga

Masalah terjadi saat musim kering. Seiring dengan berkurangnya imbuhan, debit mata air juga mengalami penurunan, bahkan hilang. Untuk mengatasi kekurangan pasokan air bersih, Pemerintah Kabupaten Bogor melalui Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) memasok air bersih dengan menggunakan truk tangka bagi warga. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi mata air di Desa Hambalang sangat rentan terhadap perubahan iklim.

3. MODEL INFRASTRUKTUR AIR BERSIH TAHAN PERUBAHAN IKLIM

Perencanaan infrastruktur air bersih berbasis masyarakat saat ini harus mempertimbangkan faktor perubahan iklim, seperti perubahan intensitas dan frekuensi curah hujan, serta perubahan tutupan lahan di daerah imbuhan (Purnomo dkk., 2021, Juliansyah, 2023). Model infrastruktur air bersih yang adaptif terhadap perubahan iklim harus mencakup beberapa aspek, antara lain:

1. Diversifikasi sumber air dengan cara memanfaatkan berbagai sumber air seperti air tanah, air permukaan, air hujan, dan air daur ulang. Diversifikasi sumber air ini membantu mengurangi ketergantungan pada satu jenis sumber air yang mungkin terdampak oleh perubahan iklim. Selain itu pengumpulan dan penyimpanan air hujan (rainwater harvesting) saat ini telah menjadi salah satu alternatif, terutama di wilayah yang mengalami musim hujan singkat dengan intensitas tinggi, untuk memenuhi kebutuhan air bersih masyarakat.
2. Infrastruktur air bersih dirancang untuk dapat beradaptasi dengan perubahan pola curah hujan dan suhu. Salah satunya adalah menambah kapasitas untuk menangani limpasan air akibat curah hujan ekstrem yang semakin sering terjadi. Jaringan perpipaan juga direncanakan untuk dapat beradaptasi terhadap bencana yang dipicu oleh perubahan iklim, seperti banjir, longsor, serta suhu tinggi, yang dapat merusak jaringan perpipaan, dan mengganggu suplai air bersih untuk warga.
3. Pengurangan konsumsi air dengan menggunakan alat-alat sanitair yang lebih hemat air, seperti pemilihan toilet jongkok dibandingkan toilet duduk yang membutuhkan air lebih banyak untuk flushing.
4. Berbasis komunitas, yaitu dengan memberdayakan masyarakat untuk berpartisipasi dalam pengelolaan sumber daya air di tingkat lokal, termasuk menjaga mata air dan sumber air lainnya agar tetap lestari, dapat memperkuat ketahanan terhadap perubahan iklim.

Sistem penyediaan air bersih untuk warga RT 14 RW 05 direncanakan agar tahan terhadap perubahan iklim,

antara lain pemanfaatan sumber mata air seefisien mungkin, serta pemakaian material ramah lingkungan, dan tahan lama. Tahapan perencanaan adalah sebagai berikut:

1. Perhitungan proyeksi jumlah penduduk 10 tahun yang akan datang
2. Kebutuhan air masyarakat berdasarkan jumlah penduduk tahun ke-10
3. Pengukuran debit mata air
4. Perencanaan kapasitas bangunan broncaptering
5. Perencanaan kapasitas bak penampung
6. Perencanaan jalur pipa dan keran hidran umum

4. HASIL DAN BAHASAN

Perhitungan proyeksi jumlah penduduk RT 14 RW 05

Berdasarkan data pertumbuhan penduduk yang dikeluarkan oleh Badan Pusat Statistik Kabupaten Bogor tahun 2023, pertumbuhan penduduk rata-rata di Desa Hambalang sebesar 0,47%, dan jumlah warga RT 14 RW 05 504 jiwa. Dengan menerapkan persamaan geometrik dalam menghitung pertambahan jumlah penduduk, pada tahun 2033, warga RT 14 RW 05 berjumlah 528 jiwa. Selanjutnya, kebutuhan air dihitung untuk 528 warga.

Kebutuhan Air

Analisis kebutuhan air bersih dibedakan menjadi 2 jenis; (1) kebutuhan air domestik, (2) kebutuhan air untuk fasilitas umum. Menurut kriteria perencanaan Permen PU NO. 18/PRT/M/2007 tentang Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum, untuk desa dengan jumlah penduduk kurang dari 3.000 jiwa, standar kebutuhan air per individu adalah 70 liter/hari. Dengan perkiraan cakupan pelayanan 100%, maka jumlah kebutuhan air domestik untuk warga RT 14 RW 05 adalah:

Q_{dom} = Jumlah penduduk x 100% x standar kebutuhan air domestik
= 528 jiwa x 100% x 70 l/jiwa/hari = 36.960 liter/hari

Untuk fasilitas umum, kawasan RT 14 RW 05 saat ini memiliki 3 musholla untuk 504 jiwa. Dengan jumlah penduduk mencapai 528 pada tahun 2033, maka dengan menerapkan perhitungan proyeksi fasilitas umum, naka jumlah musholla yang diperlukan pada tahun 2033 adalah:

N_{mus} = Jumlah musholla saat ini x (jumlah penduduk tahun 2033/jumlah penduduk saat ini)
= 3 x (528/504) = 3,14 unit ≈ 3 unit

Untuk 10 tahun yang akan datang, tidak ada pertambahan fasilitas musholla. Dengan jumlah kebutuhan air untuk fasilitas umum musholla adalah 2.000 l/unit/hari, maka kebutuhan air total untuk 3 unit musholla adalah 6.000 l/hari. Dengan demikian, jumlah kebutuhan air total untuk kebutuhan warga adalah 43.960 l/hari atau digenapkan menjadi 44.000 l/hari.

Pengukuran Debit Mata Air

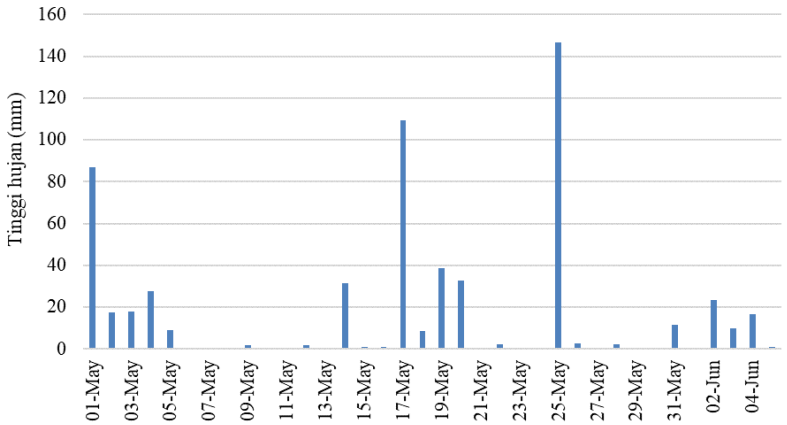
Untuk mengetahui debit mata air, dilakukan pengukuran debit dengan menggunakan metode benda apung pada saluran yang terdapat setelah titik sumber keluarnya air (Gambar 1-B). Lebar saluran dan tinggi muka air diukur untuk mendapatkan luas penampang. Kecepatan aliran dihitung dengan menggunakan bola sebagai benda apungnya. Hasil pengukuran menunjukkan lebar saluran adalah 0,4 m dan ketinggian air di dalam saluran 0,05 m. Dengan demikian luas penampang adalah 0,02 m^2. Dari hasil pengukuran debit diperoleh kecepatan aliran di dalam saluran 0,06 m/dtk, sehingga debit yang dikeluarkan sebesar 0,001 m3/dtk atau 1,00 l/dtk. Pengukuran dilakukan hanya satu kali pada bulan Juni 2024. Untuk mendapatkan gambaran kondisi iklim Kabupaten Bogor pada saat pengukuran, maka diperlukan data curah hujan rentang waktu Mei sampai dengan Juni 2024 seperti yang disajikan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, saat pengukuran, yaitu pada 1 Juni 2024 tidak terdapat hujan. Beberapa hari sebelumnya, tinggi hujan cenderung rendah. Dengan demikian, debit yang terukur merupakan debit minimum. Oleh karena itu, perencanaan selanjurnya berdasarkan kondisi debit minimum.

Perencanaan *Broncaptering*

Broncaptering merupakan bangunan penangkap mata air untuk melindungi dan menangkap air dari mata air agar dapat ditampung dan disalurkan ke reservoir (Singal & Jamal, 2022). Broncaptering umumnya dibangun dengan konstruksi beton. Debit mata air dan waktu tinggal air di dalam broncaptering menentukan rencana kapasitas bangunan. *Broncaptering* menstabilkan tekanan air sebelum masuk ke pipa transmisi sehingga tekanan air yang akan melalui pipa transmisi tetap. Selain itu, *broncaptering* melindungi mata air

dari pencemaran.



Gambar 2 Tinggi hujan di Stasiun Pengukur Hujan di Citeko

Untuk mata air RT 14 RW 05, dengan debit 1,00 l/dtk, dalam satu hari akan terkumpul 86.400 l air atau sekitar 86,40 m^3. Perhitungan kapasitas *broncaptering* dan desain rencana mengacu pada aturan yang dikeluarkan oleh Dirjen Cipta Karya, yaitu dengan waktu detensi 15 menit dan freeboard sebesar 0,5 m. Untuk debit mata air sebesar 1,00 l/dtk, dan kebutuhan air maksimum sebesar 0,79 l/dtk (pada jam 07.00-08.00), maka volume broncaptering yang dibutuhkan adalah 711 l atau 0,8 m3. Ketinggian air di broncaptering didesain setinggi 1,00 m, dengan dimensi panjang dan lebar masing-masing 1,50 m, maka diperoleh volume broncaptering 3,38 m^3.Desain broncaptering disajikan pada Gambar 3.

Perencanaan kapasitas bak penampung

Bak penampung harus dapat melayani kebutuhan air warga secara kontinu, yaitu ketersediaan air bersih yang terus menerus tanpa henti, 24 jam sehari, 7 hari seminggu. Meskipun demikian, PUPR telah menetapkan load factor untuk setiap jam, seperti yang disajikan pada Tabel 1.

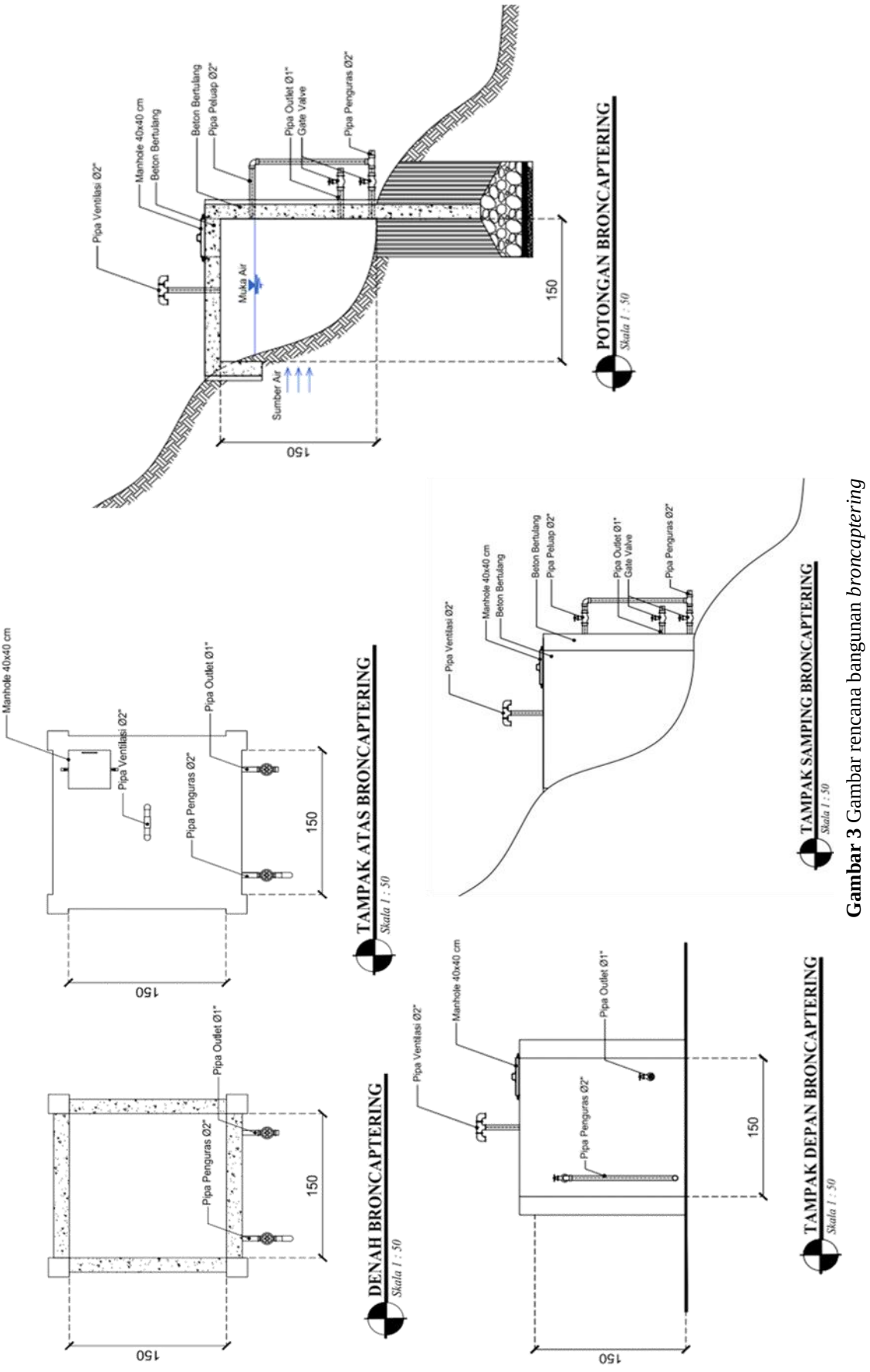
Tabel 1. Load factor untuk setiap jam pemakaian

Jam	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
LF	0,31	0,37	0,45	0,64	1,15	1,40	1,53	1,56	1,42	1,38	1,27	1,20
Jam	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
LF	1,14	1,17	1,18	1,22	1,31	1,38	1,25	0,98	0,62	0,45	0,37	0,25

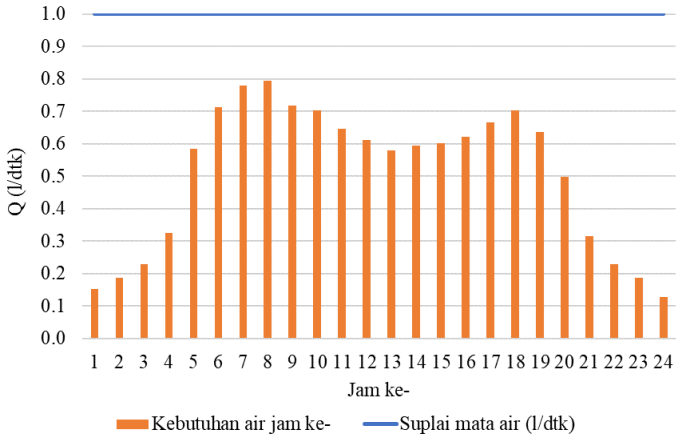
Sumber: Dirjen Cipta Karya, 1994

Load factor menunjukkan jumlah air yang diperlukan oleh masyarakat berdasarkan waktu. Kebutuhan warga saat pagi sebelum melakukan aktivitas (pukul 05.00-08.00) lebih besar dibandingkan kebutuhan waktu istirahat (pukul 22.00-24.00).

Dengan mengalikan jumlah kebutuhan air warga per hari dengan load factor untuk tiap waktu, akan diperoleh jumlah air yang diperlukan warga pada jam-jam tertentu. Besarnya kebutuhan air bagi warga per waktu kemudian dibandingkan dengan suplai air dari mata air. Hasil analisis perbandingan disajikan pada Gambar 4.

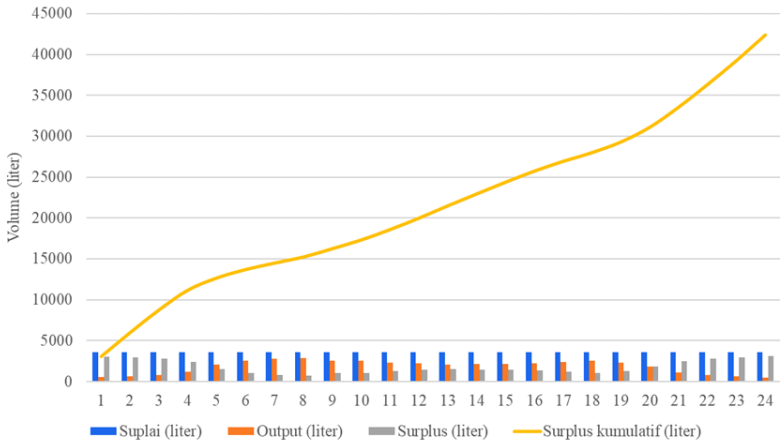


Gambar 3 Gambar rencana bangunan *broncaptering*



Gambar 4 Perbandingan antara kebutuhan air per jam dengan debit yang dikeluarkan oleh mata air

Berdasarkan Gambar 4, kebutuhan air warga per jam masih dapat dipenuhi oleh mata air. Debit yang dibutuhkan masih berada di bawah debit yang dikeluarkan oleh mata air. Meskipun demikian, dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, diperlukan satu kebijakan untuk menampung kelebihan air dari mata air, sebagai cadangan pada saat kritis. Salah satunya adalah dengan menyediakan resevoir. Untuk mendapatkan dimensi resevoir yang efektif, maka perlu dilakukan analisis neraca air per jam. Keseimbangan antara air yang masuk, yang dikeluarkan, akan menghasilkan besar kelebihan air yang dapat disimpan dalam reservoir. Hasil analisis disajikan pada Gambar 5.

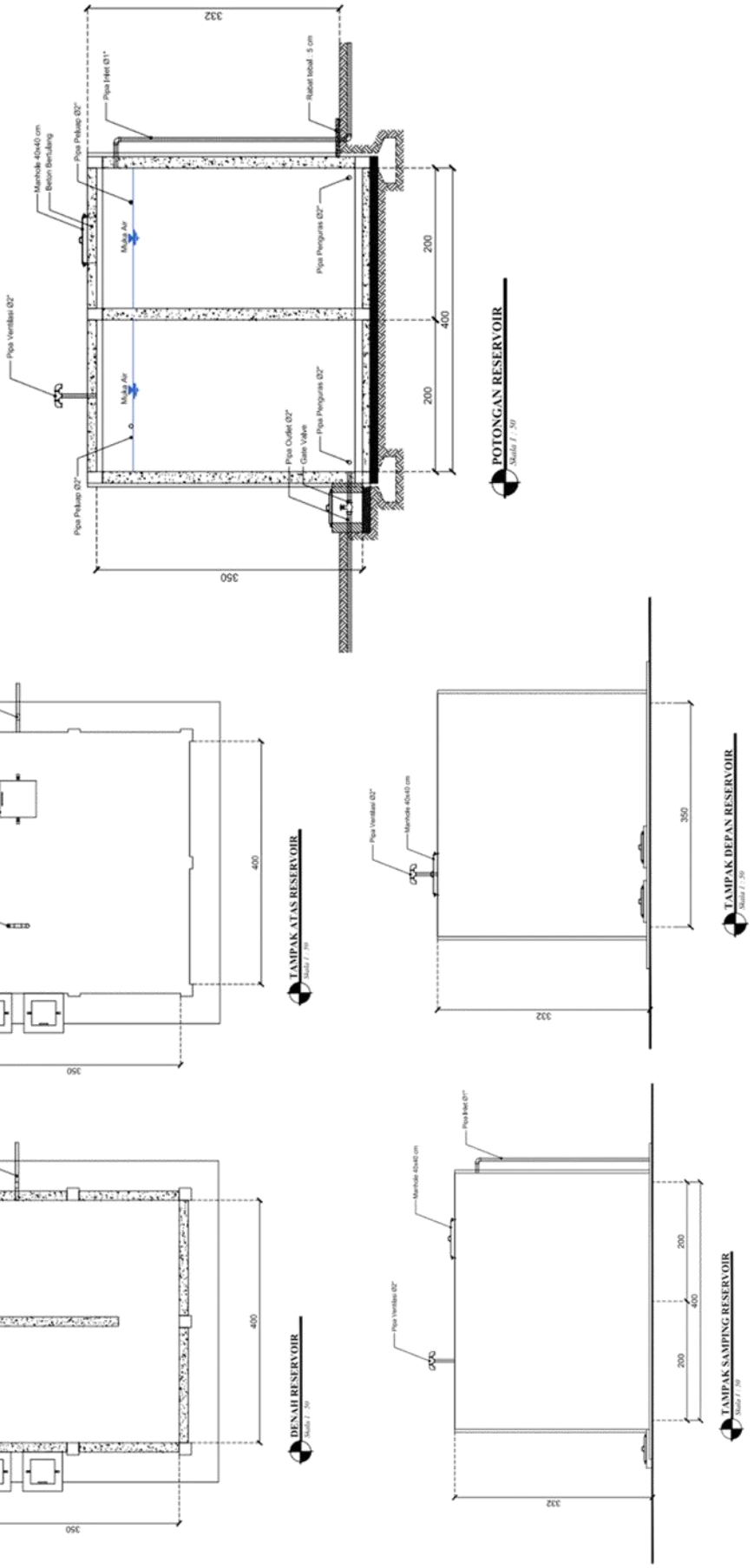


Gambar 5 Neraca air dan potensi air yang dapat disimpan selama 24 jam

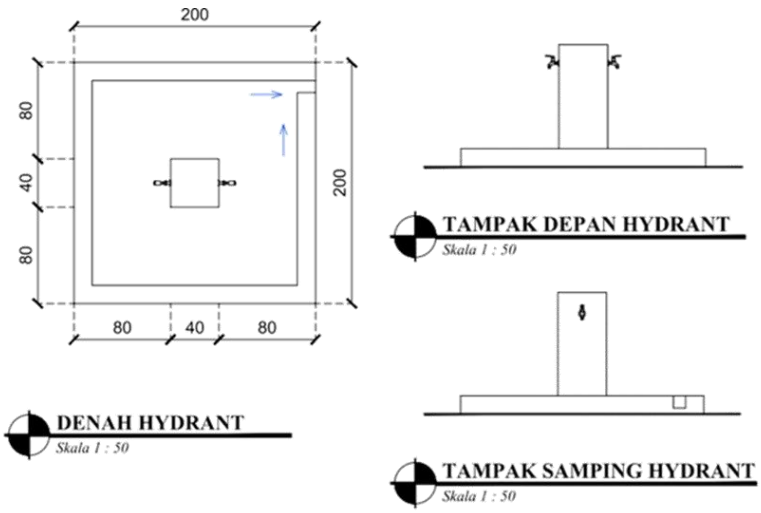
Dalam waktu 24 jam, surplus air yang diperoleh dari aliran mata air mencapai 41.436,67 liter atau sekitar 42 m^3. Direncanakan tinggi reservoir 3,5 m, dengan tinggi air 3 m dan freeboard 0,5 m. Maka diperoleh dimensi reservoir 3,5 m x 4 m dengan tinggi 3,5 m. Gambar desain resevoir disajikan pada Gambar 6.

Perencanaan *Hydrant* Umum

Berdasarkan Pedoman Perencanaan Air Bersih PU Cipta Karya, untuk kawasan dengan jumlah penduduk di bawah 20.000 jiwa, seperti pedesaan, jumlah *hydrant* umum adalah 100 jiwa/unit. Dengan demikian, untuk warga RT 14 RW 05, jumlah hidran umum yang diperlukan adalah 6 unit. Hydrant umum untuk RT 14 RW 05 berfungsi sebagai titik distribusi air untuk ke rumah-rumah warga. Desain hydrant umum disajikan pada Gambar 7.



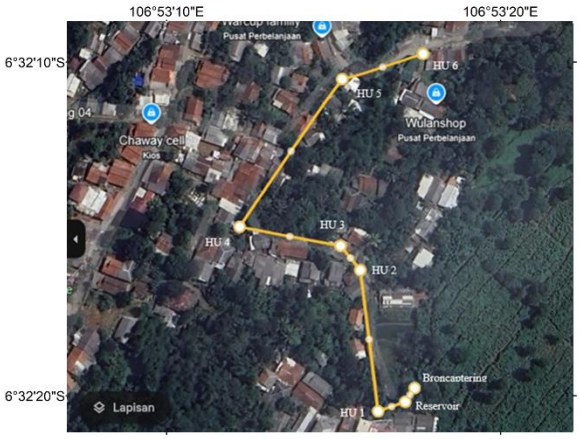
Gambar 6 Gambar rencana bangunan reservoir



Gambar 7 Desain *hydrant* umum

Sistem Jaringan Pipa

Pipa distribusi dipilih pipa HDPE yaitu pipa yang terbuat dari material plastic jenis High Density Polythene, yang memiliki beberapa kelebihan; (1) fleksibilitas tinggi, (2) tahan benturan, (3) tahan terhadap temperatur rendah bahkan temperatur air beku, (4) ringan, mudah dalam penanganan dan transportasi, (5) metode penyambungan yang cepat dan mudah, (6) tahan terhadap korosi dan abrasi, (7) permukaan halus sehingga akan meminimalkan hilangnya tekanan, dan (8) jangka waktu pemakaian cukup lama sekitar 50 tahun. Perencanaan jaringan pipa disajikan pada Gambar 8.



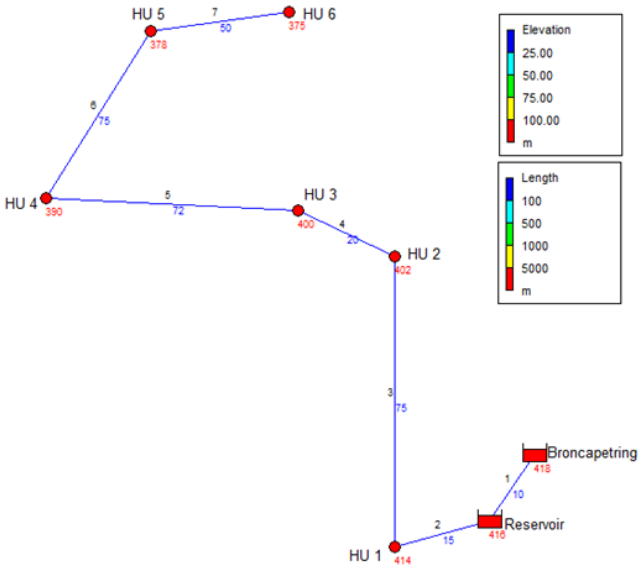
Gambar 8. Perencanaan jaringan pipa Desa Hambalang RT 14 RW05

Air mengalir dari *broncaptering* ke resevoir secara gravitasi. Kemiringan rata-rata jalur pipa dari mulai broncaptering sampai dengan kran umum antara 10% sampai 14%, sehingga memungkinkan untuk mengalirkan air dengan tekanan dan kecepatan yang stabil. Kelebihan dari sistem yang direncanakan ini adalah tidak menggunakan pompa yang membutuhkan daya listrik saat operasional, serta biaya perawatan untuk menjamin pompa tetap jalan dan air dapat terdistribusi dengan merata. Untuk memudahkan proses perencanaan, perangkat lunak EPANET versi 2.0 digunakan untuk mengolah data. EPANET 2.0 menggunakan persamaan Hazen-Willian untuk menghitung hidrolika pipa. Untuk pipa HDPE, koefisien kekasaran Chezy yang digunakan adalah 130. Kecepatan aliran dibatasi dengan faktor- faktor tertentu, kecepatan yang terlalu tinggi bisa mengakibatkan penggerusan permukaan pipa, sebaliknya, kecepatan aliran yang terlalu rendah dapat mengakibatkan pengendapan pada jalur perpipaan. Beberapa standar yang perlu diperhatikan dalam mengolah aplikasi EPANET 2.0 adalah; (1) batas kecepatan aliran 0,3 – 3,0 m/dtk, (2) kehilangan tinggi tekan yang diizinkan antara 0 sampai 10 m/km, (3) serta tekanan antara 10 m sampai

dengan 100 m. Input parameter untuk perencanaan jaringan pipa serta hasil running dari EPANET 2.0 disajikan pada Tabel 2, dan Gambar 9, yang menunjukkan bahwa kecepatan aliran serta headloss untuk setiap node dan pipa berada dalam nilai kisaran nilai batas yang telah ditetapkan.

Tabel 2. Input parameter dan output EPANET 2.0

Pipa	Panjang pipa (m)	Diameter Pipa (mm)	C	Node	Elevasi	Base Demand (l/dtk)	Output	
							Kecepatan (m/dtk)	Headloss (m/km)
P1	10	25	130	Reservoir	416	0	1,89	9,45
P2	15	50	130	HU 1	414	0,129	0,39	4,88
P3	75	25	130	HU 2	402	0,129	0,33	3,48
P4	15	50	130	HU 3	400	0,129	0,41	6,83
P5	72	25	130	HU 4	390	0,129	0,31	4,01
P6	70	25	130	HU 5	378	0,129	0,32	5,61
P7	50	30	130	HU 6	375	0,129	0,26	5,17



Gambar 9. Diagram kecepatan

5. KESIMPULAN

Perencanaan sistem jaringan air bersih harus mampu beradaptasi dengan isu perubahan iklim. Perubahan intensitas dan kekerapan curah hujan sangat mempengaruhi ketersediaan air baku. Oleh karena itu, standar perencanaan harus disesuaikan dengan kondisi ini, seperti cakupan pelayanan, penggunaan bangunan penyimpan air, serta penggunaan *hydrant* umum yang sekaligus sebagai hub pelayanan air bersih ke rumah warga. Perencanaan sistem jaringan air bersih di RT 14 RW05 Desa Hambalang menerapkan prinsip tersebut, meskipun secara analisis, debit mata air masih dapat melayani kebutuhan masyarakat secara langsung. Salah satunya adalah dengan membangun reservoir yang berfungsi menampung air dari mata air, sehingga tidak terbuang percuma. Air dari resevoir kemudian dialirkan dengan ke *hydran*t umum, dengan menggunakan pipa jenis HDPE yang lebih lentur dan tahan terhadap perubahan cuaca. *Hydrant* umum disediakan sebagai tempat pengambilan air bagi warga sekaligus tempat untuk menyambung pipa yang akan mengalirkan air ke rumah warga bagi yang membutuhkan. Pemakaian air yang efektif menjadi kata kunci dalam merencanakan sistem penyediaan air bersih tahan perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

Cita, Adiningrum. (2017). 1. Analysis of Spring Development and Gravity Flow System to Capture Water for Local Communities. Available from: 10.1051/MATECCONF/201713806009

Juliansyah, F. (2023). Analisis Perubahan Iklim Dalam Ketersediaan Air Baku Dan Penyediaan Air Minum Pada Daerah Terpencil. International Journal of Evaluation and Research in Education. Diakses melalui: www. researchgate.net/publication/374133280_Analisis_Perubahan_Iklim_Dalam_Ketersediaan_Air_Baku_Dan_Penyediaan_Air_Minum_Pada_Daerah_Terpencil.

Lestari, D. T. B., & Suprapto, H. (2019). Analisis pemanfaatan mata air sebagai sumber air baku di Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor. Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi, 16(2).

Purnomo, S., Halik, G., & Dhokhikah, Y. (2021). Penilaian Bencana Kekeringan dan Strategi Penyediaan Air Bersih di Wilayah Utara Kabupaten Lumajang. Jurnal Teknik Pengairan: Journal of Water Resources Engineering, 12(2), 92-103.

Singal, R. Z., & Jamal, N. A. (2022). Perencanaan sistem jaringan distribusi air bersih (Studi kasus Desa Panca Agung Kabupaten Bulungan). Selodang Mayang: Jurnal Ilmiah Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Kabupaten Indragiri Hilir, 8(2), 108-119.

Perencanaan Sistem Jaringan Perpipaan Air Bersih Menggunakan Software Epanet 2.0 (Studi Kasus: Dusun I Naet Desa Nekmese Kecamatan Amarasi Selatan Kabupaten Kupang Nusa Tenggara Timur)

Alfis Paulis Notti

Ir. I Made Udiana, MT.

Dr. Ir. Judi K. Nasjono, ST., MT.

Civil Engineering, Nusa Cendana University, NTT
***e-mail**: alfis.p.notti@gmail.com*

ABSTRAK

Air merupakan salah satu kebutuhan sangat penting bagi kehidupan manusia. Kekurangan suplai air bersih akan sangat berpengaruh pada berbagai faktor kehidupan manusia, baik kesehatan, ekonomi, dan lain sebagainya. Dusun I Naet, Desa Nekmese, Kecamatan Amarasi Selatan, Kabupaten Kupang memiliki sumber air yang cukup, dan sudah memiliki bak penampung serta jaringan perpipaan yang telah dibuat dengan memanfaatkan grafitasi. Namun yang menjadi permasalahan adalah kurangnya jaringan perpipaan yang baik, sehingga masyarakat yang lokasi rumahnya lebih rendah dari mata air saja yang terlayani jaringan air ini, dan masih banyak masyarakat membeli air atau pergi mengambil air langsung dari sumber air. Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan sistem jarigan perpipaan distribusi air bersih dengan sistem pengaliran pompa, memakai bantuan Software Epanet 2.0. Metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perhitungan debit menggunakan Metode Volume Metrik, menghitung proyeksi jumlah penduduk dengan Metode Aritmatik, Metode Geometrik, Metode Least Square, menghitung pertambahan jumlah fasilitas, analisis jaringan perpipaan, dan pembuatan simulasi jaringan perpipaan distribusi air bersih dengan menggunakan Software Epanet 2.0. Hasil proyeksi jumlah penduduk Dusun I Naet pada tahun 2032 digunakan metode dengan Standar Deviasi terkecil dan koefisien korelasi mendekati satu sehingga proyeksi penduduk yaitu dengan Metode Aritmatik yaitu sebesar 606 jiwa. Berdasarkan hail perhitungan kebutuhan rata – rata air di Dusun I Naet pada tahun 2032 adalah 0,656 ltr/dtk dengan jam puncak mencapai 0,984 ltr/dtk. Spesifikasi pompa yang digunakan adalah 65 x 50X2 -5 15. Berdasarkan hasil perencanaan jaringan perpipaan dibutuhkan 354 meter dengan diameter 50mm pipa GIP untuk jaringan pipa transmisi, sedangkan untuk pipa distribusi dibutuhkan 1732,2 meter diameter 50mm, 390,91 meter diamter 32mm, dan 1079,06 meter diameter 25mm pipa HDPE.

Kata kunci: Jaringan, Perpipaan, Mata Air, Air Bersih, Pompa, Epanet 2.0.

1. PENDAHULUAN

Air bersih dalam kehidupan sehari-hari sangatlah penting, yang menjadi kebutuhan dasar bagi manusia. Air bersih yang mencukupi akan berdampak pada peningkatan produktivitas masyarakat baik dalam sektor sosial maupun ekonomi. Pertumbuhan penduduk yang semakin harinya bertambah, maka kebutuhan akan air bersih juga akan semakin meningkat. Oleh karena itu, sistem penyediaan air bersih haruslah memenuhi agar dapat mencukupi seluruh kebutuhan manusia (Triatmadja,2008).

Desa Nekmese merupakan salah satu desa yang berada di Kecamatan Amarasi Selatan, Kabupaten Kupang. Desa ini terdiri dari V dusun yaitu Dusun I Naet, Dusun II Korooto 1, Dusun III Korooto 2, Dusun IV Tuamese, dan Dusun V Faos. Dusun I Naet memiliki jarak ± 2 kilometer dari IV dusun lainnya. Desa Nekmese merupakan daerah dengan karakterisitik perbukitan rendah berbatas langsung dengan kawasan hutan lindung, oleh karena itu dusun ini mempunyai sumber mata air yang keluar langsung dari pangkal pohon. Sumber mata air pada dusun I berada dibawah pemukiman masyarakat setempat.

Sumber mata air pada dusun ini bernama Oe Mathitu, yang saat ini di kelola langsung oleh BUMDes dalam penyediaan sistem distribusi air bersih kepada masyarakat. Mata air ini berada di bawah bukit dengan elevasi 460 meter di atas permukaan laut (10°16'0.70"S dan 123°52'4.70"E), dibroncaptering dengan pipa jenis GIP dengan diameter 4” ke bak penampung mata air dengan kapasitas 13000 liter (Res 1/BPMA) elevasi 443 meter di atas permukaan laut (10°16'0.50"S dan 123°52'4.70"E), dimana pada reservoir ini juga dipasang jaringan transmisi dengan pipa jenis GIP diameter 3” dengan hanya memanfaatkan sistem gravitasi. Namun yang menjadi permasalahanya jaringan ini tidak dapat melayani semua masyarakat yang tinggal pada dusun tersebut dengan baik, akibatnya masyarakat masih mengambil air secara langsung dari sumber mata air dan juga membeli air. Oleh karena itu, berdasarkan kondisi yang ada pada desa ini, maka penulis ingin melakukan penelitian dengan judul “Perencanaan Sistem Jaringan Perpipaan Air Bersih Menggunakan Softwere Epanet 2.0 (Studi kasus : Dusun I Naet Desa Nekmese Kecamatan Amarasi Selatan Kabupaten Kupang Nusa Tenggara Timur).”

2. TINJAUAN PUSTAKA

Metode Pengukuran Debit Sumber Air

Debit dihitung dengan rumus:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Dengan, Q = Debit (ltr/dtk), V = Volume ember atau wadah (ltr), T = Waktu saat pengisian ember atau wadah (dtk). Pelaksanaan pengukuran dilakukan beberapa kali, sehingga dapat memperoleh ketepatan pengukuran. Hasil pengukuran tersebut dirata-ratakan untuk mendapatkan harga definitif.

Standar Kebutuhan Air Berih

Tabel 1. Standar Kebutuhan Air Domestik

No	Uraian	Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Jiwa				
		> 1.000.000	**500.000 S/D 1.000.000**	**100.000 S/D 500.000**	**20.000 S/D 100.000**	**<20.000**
		METRO	**BESAR**	**SEDANG**	**KECIL**	**DESA**
1	Konsumsi unit sambungan rumah (SR) l/o/h	190	170	130	120	80
2	Konsumsi unit hidran umum (HU) l/o/h	30	30	30	30	30
3	Konsumsi unit non domestik l/o/h (%)	20-30	20-30	20-30	20-30	20-30
4	Kehilangan air	15-20	15-20	15-20	15-20	15-20
5	Faktor hari maksimum	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
6	Faktor jam puncak	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
7	Jumlah jiwa per SR	5	5	5	5	5
8	Jumlah jiwa per HU	100	100	100	100	100
9	Sisa tekan di penyediaan distribusi (mka)	10	10	10	10	10
10	Jam operasi	24	24	24	24	24

No	Uraian	Kategori Kota Berdasarkan Jumlah Jiwa				
		> 1.000.000	500.000 S/D 1.000.000	100.000 S/D 500.000	20.000 S/D 100.000	<20.000
		METRO	BESAR	SEDANG	KECIL	DESA
11	Volume reservoir (% max day demand)	20	20	20	20	20
12	SR : HR	50:50 s/d 80:20	50:50 s/d 80:20	80:20	70:30	70:30
13	Cakupan Pelayanan (%)	90	90	90	90	70

Sumber : Ditjen Cipta karya Dinas PU, 2000:9. (Dalam Boelan, S. A. 2022.)

Jumlah Pengguna Air Besrih

1. Metode Aritmatik

$$Pn = Po + Ka(Tn - To)$$

$$Ka = \frac{(P2 - P1)}{(T2 - T1)}$$

2. Metode Geometrik

$$Pn = Po \,.\, (1+q)^n$$

3. Metode Least Square

$$Y = a + bX$$

Untuk menentukan pilihan rumus metode proyeksi yang akan dipergunakan dengan hasil yang paling mendekati kebenaran dalam perhitungan jumlah penduduk, maka harus dilakukan perhitungan koefisien korelasi dan standar deviasi dari ketiga metode tersebut (Permen PU No 18, 2007:71). Berikut ini rumus untuk menghitung nilai standar deviasi (SD) yaitu pada Persamaan 2.12. (Permen PU No 18, 2007:71):

$$SD = \frac{\sqrt{\sum(Xi - Xmean)}}{n}$$

Berikut ini rumus untuk menghitung nilai koefisien korelasi (r) yaitu pada Persamaan 2.13. (Permen PU No 18, 2007:71):

$$r = \frac{(n.(\sum xy)) - (\sum x - \sum y)}{\sqrt{((n.\sum y^2) - (\sum y)^2)((n.\sum x^2) - (\sum x)^2)}}$$

Jumlah Fasilitas Pemakai Air Besrih

$$Fn = K \,.\, Fo$$

$$K = Pn / Po$$

Setelah diketahui jumlah pengguna rencana (Pn) dan jumlah fasilitas tahun rencana (Fn) maka dapat diketahui jumlah kebutuhan air domestik dan non domestik suatu wilayah atau debit rencana (Qrata-rata), yaitu dengan rumus (Lambe, 1982):

Qrata-rata = Qdomestik + Qnon-domestik + Kehilangan air 20%.

Dengan Qrata-rata = Debit rata (ltr/dtk), Qdomestik = Jumlah kebutuhan air domestik, Qnon-domestik = Jumlah kebutuhan air non-domestik.

Kehilangan Energi Pada Pompa

Untuk menghitung kehilangan total pompa digunakan rumus (Sularso, Harou. T, 1996:6):

$$h = ha + \Delta hp + h1 + \frac{Vd^2}{2g}$$

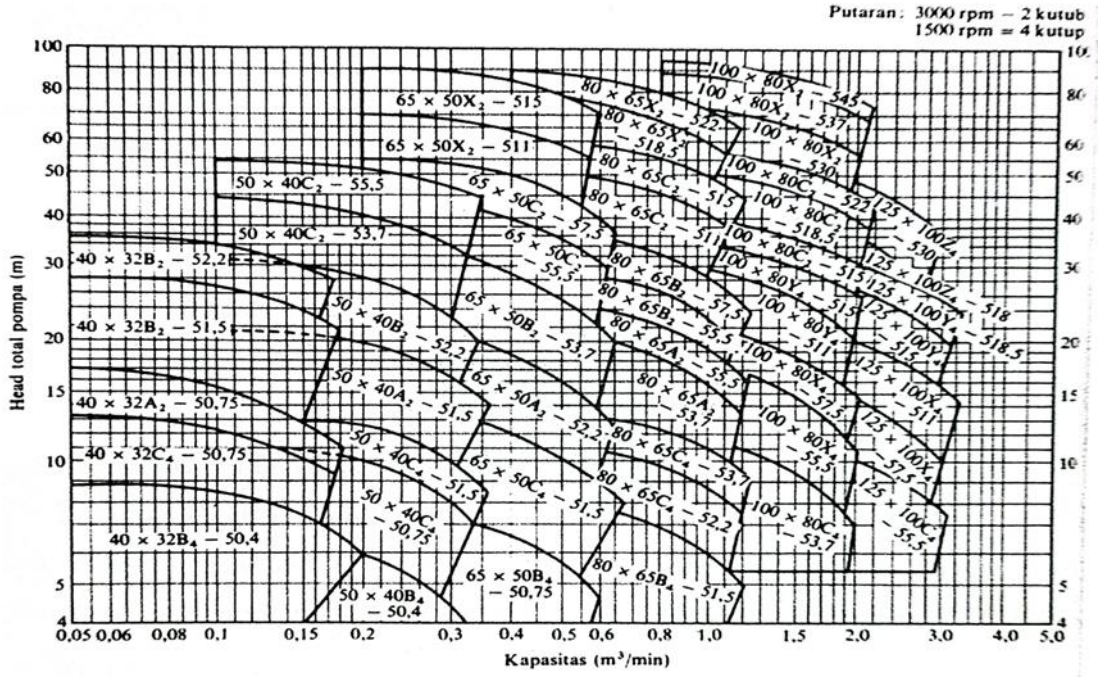
$$ha = hs + hd$$

Dengan: h = Kehilangan energi total pompa (m), ha = Kehilangan energi statis total (m), Δhp= Perbedaan tekanan yang bekerja pada kedua permukaan air (m), h1 = Berbagai kehilangan akibat gesekan, katup, belokan (m), Vd = Kecepatan aliran (m/dtk), g = Percepatan gravitasi (9,81 m/dtk²).

Spesifikasi Pompa

Menghitung daya pompa dilakukan untuk mengetahui spesifikasi pompa yang akan digunakan sehingga didapatkan efisiensi penggunaan daya, desain dan harga instalasi pompa serta pergeraknya yang lebih ekonomis. Adapun

beberapa langkah yang harus ditempuh untuk menghitung daya pompa antara lain, dengan menghitung kehilangan energi yang terjadi pada instalasi pompa yang kita dibuat. Untuk pemilihan spesifikasi pompa yang akan digunakan, dibantu dengan menggunakan diagram (Gambar 1) pemilihan pompa umum.



Gambar 1. Pemilihan Pompa Umum.

Adapun menghitung daya yang diperlukan pompa untuk menaikan zat cair (Triamodjo, B., 2006:73 dalam Tuames K., Y., Gaspar:2015:29) :

$$D = \frac{Q.H.\gamma}{75\eta}$$

Dengan: D = daya (hp), Q = debit aliran (m^3/det), H = tinggi tekanan efektif (m), γ = berat jenis zat cair (kgf/m^3), η = efisiensi pompa.

Aplikasi Epanet 2.0. Dalam Analisis Jaringan Distribusi Air Bersih

Software Epanet 2.0 adalah program komputer yang menggambarkan simulasi hidrolis dan kecenderungan kualitas air yang mengalir di dalam jaringan pipa. Jaringan itu sendiri terdiri dari pipa, node (titik koneksi pipa), pompa, katub, dan tangki air atau reservoir. Output yang dihasilkan dari Program Epanet 2.0 ini antara lain debit yang mengalir dalam pipa, tekanan air dari masing masing titik/node/junction yang dapat dipakai sebagai analisa dalam menentukan operasi instalasi, pompa dan reservoir serta besarnya konsentrasi unsur kimia yang terkandung dalam air bersih yang didistribusikan dan dapat digunakan sebagai simulasi penentuan lokasi sumber sebagai arah pengembangan.

3. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian akan dilaksanakan di Dusun 1 Naet, Desa Nekmese, Kecamatan Amarasi Selatan, Kabupaten Kupang, dan sumber air yang digunakan yaitu Mata Air Oe Mathitu dengan titik koordinat 10°16'0.70"S dan 123°52'4.70"E. Metode pengambilan data dalam peneleitian ini menggunakan metode observasi dan metode dokumentasi. Metode observasi adalah metode pengambilan data melalui pengamatan langsung di lapangan terhadap objek penelitian. Metode dokumentasi adalah metode dengan mengambil dan mengumpulkan gambar – gambar dan data sekunder lainnya yang menunjang dalam penelitian ini.

Jenis Data

Jenis – jenis data dalam penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang didapat dari hasil pengamatan di lapangan yaitu berupa data pengukuran debit air (Q). Data sekunder adalah data yang diperoleh dari instansi terkait dan hasil studi kepustakaan seperti data jumlah penduduk dan topografi sekitar lokasi.

Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dilakukan dengan dengan cara memanfaatkan metode yang didapat pada studi literatur. Adapun langkah – langkah yang dilakukan yaitu:

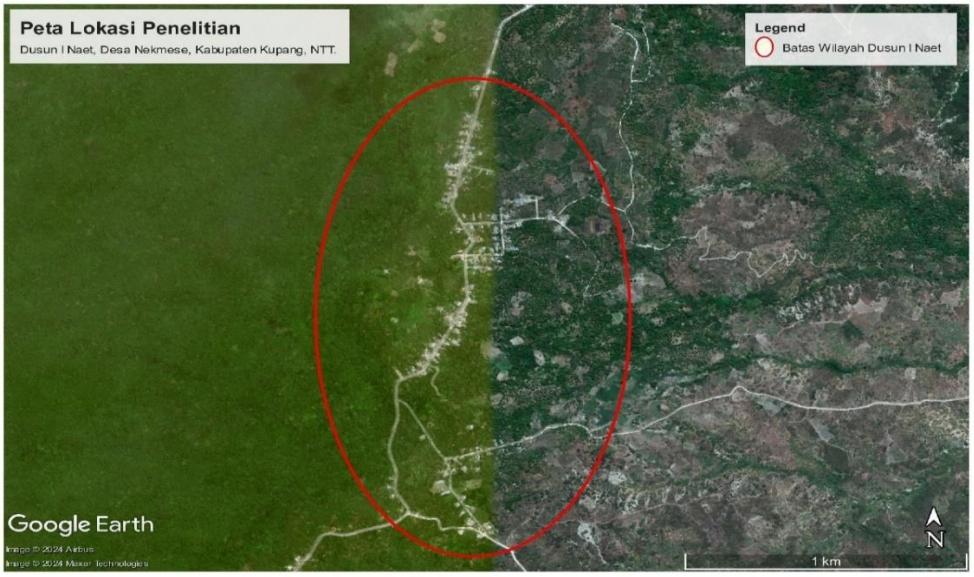
1. Melakukan pengumpulan data-data primer yaitu berupa pengukuran debit (Q) pada mata air, mensurvei jalur pipa rencana dan jaringan pipa dan sekunder yang berupa data teknis dan data penunjang lainnya yang digunakan dalam analisa sistem jaringan distribusi air bersih.
2. Melakukan perhitungan pertumbuhan penduduk dan jumlah fasilitas yang ada dengan menggunakan Metode Aritmatik, Metode Geometrik dan Metode Least Square kemudian diproyeksikan 10 tahun kedepan untuk mendapatkan jumlah penduduk pada tahun 2032.
3. Melakukan perhitungan kebutuhan air bersih perhari baik yaitu kebutuhan domestik, kebutuhan non domestik dan kehilangan air.
4. Melakukan perhitungan kehilangan energi untuk mendapatkan daya pompa yang akan digunakan.
5. Melakukan penggambaran jaringan perpipaan yang ada pada Software Quantum gis (Qgis) 3.16 dengan menggunakan plugin QEpanet. Penggambaran sesuai dengan jaringan perpipaan yang direncanakan di wilayah penelitian.
6. Pengambaran jaringan dilakukan sekaligus penginputan data karakteristik jaringan berupa diameter pipa, panjang pipa, koefisien kekasaran pipa, elevasi, jumlah debit air (Q), kapasitas reservoir dan perlengkapan pipa.
7. Menjalankan Software Epanet 2.0 untuk menganalisa jaringan yang sudah di gambar dan diinput karekteristiknya.
8. pembahasan dari hasil output Sofware Epanet 2.0 dan memberikan kesimpulan dan saran.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Umum dan Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ini berada di Dusun I Neat, Desa Nekmese, Kecamatan Amarasi Selatan, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Terletak di arah Selatan Kabupaten Kupang, yang jarak dari pusat Kabupaten kupang yaitu ± 35 Km. Desa ini memiliki luas wilayah adalah 92,5 Ha, dengan batas – batas wilayah sebagai berikut:

Sebelah Utara : Desa Tesbatan
Sebelah Selatan : Kelurahan Buaren
Sebelah Timur : Desa Apren
Sebelah Barat : Hutan Lindung, Desa Kotabes, Ponain.



Gambar 2. Lokasi Penelitian
Sumber: Google Earth, 2023

Sumber Air dan Perhitungan Debit

Sumber air yang digunakan dalam analisis ini berasal dari mata air yang ada pada Dusun I Naet yang bernama Oe Mathitu. Mata air ini berada pada ketinggian 433 meter di atas pemukaan laut pada titik koordinat 10°16'0.70"S dan 123°52'4.70"E. Perhitungan debit mata air dilakukan dengan metode volume metrik sebanyak 5 kali percobaan. Debit dihitung menggunakan rumus:

$$Q = \frac{V}{T}$$

Berikut merupakan hasil pengukuran dan perhitungan debit di lapangan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengukuran Debit Mata Air Oe Mathitu

No	Waktu Pengukuran (detik)	Volume Wadah (liter)	Debit (liter/detik)
1	3,06	5	1,634
2	2,74	5	1,825
3	2,01	5	2,488
4	2,58	5	1,938
5	2,49	5	2,008
	Rata - rata		1,978

Sumber : Hasil Pengukuran, 2024.

Dari Tabel 2. maka diperoleh debit Mata Air Oe Mathitu adalah 1,978 liter/detik atau 0,00198 m^3/dtk.

Proyeksi Jumlah Penduduk Dan Uji Kesesuain Metode Proyeksi

Kebutuhan air bersih suatu daerah dianalisis berdasarkan jumlah penduduk yang ada di daerah tersebut, dengan memperhatikan perkembangan atau pertumbuhan penduduk, maka konsumen pemakai air pada waktu yang akan datang dapat diketahui. Perencanaan sistem jaringan perpipaan direncanakan untuk memenuhi kebutuhan air bersih di Dusun I Naet selama 10 tahun. Perhitungan proyeksi jumlah penduduk membutuhkan data jumlah penduduk beberapa tahun sebelum tahun perencanaan. Data yang akan digunakan dalam penulisan ini yaitu 5 tahun terakhir yaitu dari tahun 2018 sampai dengan tahun 2022.

Tabel 3. Jumlah Penduduk Dusun I Naet 2018-2022

No	Tahun	Jumlah penduduk (Jiwa)
1	2018	550
2	2019	569
3	2020	568
4	2021	569
5	2022	566

Sumber : Data Statistik Desa Nekmese, Tahun 2023

Langkah awal yang digunakan untuk mendapatkan proyeksi jumlah penduduk adalah menghitung Standar Deviasi (SD) dan koefisien korelasi (r) dari setiap metode proyeksi. Metode proyeksi dengan nilai Standar Deviasi terkecil dan nilai Koefisien korelasi paling mendekati satu akan digunakan sebagai metode menghitung proyeksi jumlah penduduk.

a. Metode Aritmatik

Perhitungan Standar Deviasi (SD) dan koefisien korelasi (r) proyeksi penduduk Dusun I Naet dengan Metode Aritmatik menggunakan beberapa variabel, yang perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan Standar Deviasi (SD) dan Koefisien Korelasi Metode Aritmatik.

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa) (X)	R (%)	Pn (Y)	X^2	Y^2	XY	(Xi-Xmean)	$(Xi-Xmean)^2$
(1)	(2)	(3)	(4)	$(2)^2 = (5)$	$(4)^2 = (6)$	(2).(4) = (7)	(8)	(9)
2018	550	0	550	302.500	302.500	302.500	-14,40	207,36
2019	569	3,45	554	323.761	306.916	315.226	-10,40	108,16
2020	568	-0,18	558	322.624	311.364	316.944	-6,40	40,96

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa) (X)	R (%)	Pn (Y)	X^2	Y^2	XY	(Xi- Xmean)	(Xi- Xmean)²
2021	569	0,18	562	323.761	315.844	319.778	-2,40	5,76
2022	566	-0,53	566	320.356	320.356	320.356	1,60	2,56
564,4	2.822	2,93	2.790	1.593.002	1.556.980	1.574.804	-32	364,8
Xmean	∑X	∑R	∑Y	$\sum X^2$	$\sum Y^2$	∑XY	∑(X - Xmean)	∑ (X - Xmean)²

Sumber : Hasil Perhitungan, 2023

Sehingga, berdasarkan Tabel 4. menghitung Standar Deviasi (SD) menggunakan rumus:

$$SD = \frac{\sqrt{\sum(Xi - Xmean)^2}}{n}$$

$$SD = \frac{\sqrt{364,8}}{5} = 8,54$$

Menghitung Koefisien Korelasi (r) menggunakan rumus:

$$r = \frac{(n.(\sum xy)) - (\sum x - \sum y)}{\sqrt{((n.\sum y^2) - (\sum y)^2)((n.\sum x^2) - (\sum x)^2)}}$$

$$r = \frac{5 \times 1.574.804 - 2.822 \times 2.790}{\sqrt{\{[5 \times 1.556.980 - (2.790)^2] \times [5 \times 1.593.002 - (2.822)^2]\}}}$$

r = 0,621

b. Metode Geometrik.

Perhitungan Standar Deviasi (SD) dan koefisien korelasi (r) proyeksi penduduk Dusun I Naet dengan Metode Aritmatik menggunakan beberapa variabel, yang perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan Standar Deviasi (SD) dan Koefisien Korelasi Metode Geometrik.

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa) (X)	R (%)	Pn (Y)	X^2	Y^2	XY	(Xi- Xmean)	(Xi- Xmean)²
(1)	(2)	(3)	(4)	$(2)^2 = (5)$	$(4)^2 = (6)$	(2).(4) = (7)	(8)	(9)
2018	550	0	550	302.500	302.201	302.350,6853	-14,67	215,25
2019	569	3,45	554	323.761	306.641	315.084,8886	-10,65	113,38
2020	568	-0,18	558	322.624	311.146	316.833,2011	-6,60	43,49
2021	569	0,18	562	323.761	315.718	319.714,002	-2,51	6,31
2022	566	-0,53	566	320.356	320.356	320.356	1,60	2,56
564,4	2.822	2,93	2.789	1.593.002	1.556.063	1.574.339	-33	381
Xmean	∑X	∑R	∑Y	$\sum X^2$	$\sum Y^2$	∑XY	∑(X - Xmean)	∑ (X - Xmean)²

Sumber : Hasil Perhitungan, 2023

Sehingga, berdasarkan Tabel 5. menghitung Standar Deviasi (SD) menggunakan rumus:

$$SD = \frac{\sqrt{\sum(Xi - Xmean)^2}}{n}$$

$$SD = \frac{\sqrt{381}}{5} = 8,73$$

Menghitung Koefisien Korelasi (r) menggunakan rumus:

$$r = \frac{(n.(\sum xy)) - (\sum x - \sum y)}{\sqrt{((n.\sum y^2) - (\sum y)^2)((n.\sum x^2) - (\sum x)^2)}}$$

$$r = \frac{5 \times 1.574.339 - 2.822 \times 2.789}{\sqrt{\{[5 \times 1.556.063 - (2.789)^2] \times [5 \times 1.593.002 - (2.822)^2]\}}}$$

r = 0,618

c. Metode *Least Square*.

Perhitungan Standar Deviasi (SD) dan koefisien korelasi (r) proyeksi penduduk Dusun I Naet dengan Metode Aritmatik menggunakan beberapa variabel, yang perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 6. Perhitungan Standar Deviasi (SD) dan Koefisien Korelasi Metode *Least Square*.

Tahun	Jumlah Penduduk (Jiwa) (X)	R (%)	Pn (Y)	X^2	Y^2	XY	(Xi-Xmean)	$(Xi-Xmean)^2$
(1)	(2)	(3)	(4)	$(2)^2 = (5)$	$(4)^2 = (6)$	(2).(4) = (7)	(8)	(9)
2018	550	0	513	302.500	263.262	282.200	-51	2633
2019	569	3,45	516	323.761	266.556	293.769	-48	2314
2020	568	-0,18	519	322.624	269.871	295.070	-45	2017
2021	569	0,18	523	323.761	273.206	297.411	-42	1740
2022	566	-0,53	526	320.356	276.561	297.654	-39	1483
564,4	2.822	2,93	2.597	1.593.002	1.349.456	1.466.105	-224,55	10186,532
Xmean	∑X	∑R	∑Y	$\sum X^2$	$\sum Y^2$	∑XY	∑(X - Xmean)	$\sum (X - Xmean)^2$

Sumber : Hasil Perhitungan, 2023

Sehingga, berdasarkan Tabel 6. menghitung Standar Deviasi (SD) menggunakan rumus:

$$SD = \frac{\sqrt{\sum(Xi - Xmean)^2}}{n}$$

$$SD = \frac{\sqrt{10186,532}}{5} = 45,14$$

Menghitung Koefisien Korelasi (r) menggunakan rumus:

$$r = \frac{(n.(\sum xy)) - (\sum x - \sum y)}{\sqrt{((n.\sum y^2) - (\sum y)^2)((n.\sum x^2) - (\sum x)^2)}}$$

$$r = \frac{5 \times 1.466.105 - 2.822 \times 2.579}{\sqrt{\{[5 \times 1.349.456 - (2.579)^2] \times [5 \times 1.593.002 - (2.822)^2]\}}}$$

r = 0,621

Dari hasil perhitungan proyeksi penduduk di Dusun I Naet menggunakan Metode Aritmtik, Metode Geometrik, dan Metode Least Square didapatkan rekapitulasi nilai Standar Deviasi (SD) dan Koefisien Korelasi (r) yang ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi Perhitungan Standar Deviasi dan Koefisien Korelasi

	Aritmatik	**Geometrik**	***Least Square***
Standar Deviasi (SD)	8,54	8,73	45,14
Koefisien Korelasi (r)	0,621	0,618	0,621

Sumber: Hasil perhitungan 2024

Untuk proyeksi jumlah penduduk pada Dusun 1 Naet 10 tahun yaitu sampai dengan tahun 2032 digunakan metode dengan nilai Standar Deviasi (SD) terkecil dan koefisien korelasi (r) mendekati satu. Metode dengan Standar Deviasi (SD) terkecil dan koefisien korelasi (r) mendekati satu, adalah metode Aritmatik. Sehingga perhitungan proyeksi jumlah penduduk pada Dusun I Naet (Pn) 10 tahun 2023 – 2032 dengan metode Aritmatik dihitung menggunakan Persamaan 2.5 dengan rumus:

Pn = Po + Ka x (To – Tn)

Sehingga:

Pn = Po + Ka x (Tn – To)

P2032 = 566 + 4 x (2032-2022)

P2032 = 606 Jiwa

Total Kebutuhan dan Ketersediaan Air Bersih Dusun I Naet

Ketersediaan air merupakan hal yang sangat penting dalam penyediaan air bersih. Ketersediaan air sangat berkaitan erat dengan jumlah, kualitas, waktu ketersediaan, keberlanjutan, lokasi, elevasi, dan fluktuasi. Untuk memenuhi

kebutuhan air bersih maka diperlukan kapasitas debit yang mencukupi. Berdasarkan hasil perhitungan yaitu QRata-rata, QHarian maksimum, dan QJam puncak didapatkan nilai yang terbesar yaitu pada QJam puncak. Ketersediaan air bersih untuk memenuhi kebutuhan air bersih di Dusun I Naet adalah sebagai berikut:

$Q_{sumber\ air}$ = 1,978 ltr/dtk

$Q_{jam\ puncak}$ = 0,984 ltr/dtk

$Q_{sumber\ air} - Q_{jam\ puncak}$ = 1,978 – 0,984 ltr/dtk

= 0,994 ltr/dtk

Berdasarkan kebutuhan air bersih yang telah dihitung untuk tahun rencana 2032 yaitu 0,656 ltr/dtk dan kebutuhan air pada jam puncak yaitu 0,984 ltr/dtk dengan debit sumber mata air Oe Mathitu yaitu 1,978 ltr/dtk atau 0,00198 m^3/dtk, maka besarnya debit air ini masih cukup untuk melayani wilayah Dusun I Naet sampai tahun 2032.

Menghitung Daya Pompa

Untuk menghitung daya pompa yang akan digunakan maka harus terlebih dahulu menghitung kehilangan energi pada pompa. Kehilangan energi total pada pompa ditentukan dari kondisi instalasi yang akan dilayani pompa.
Untuk menghitung kehilangan energi total pompa digunakan rumus:

$$h = ha + \Delta hp + h1 + \frac{Vd^2}{2g}$$

Hasil perhitungan kehilangan energi total pada pompa dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perhitungan Kehilangan Energi pada Pompa

d (m)	Vd (m/dtk)	h1 isap	h1 keluar	h1	hstat	Δhp
0,05	1,008	2,092	11,400	13,492	62	0
h = hstat + Δhp + h1 + V²/ 2g = 75,544						
Overhead 10% = 83,098						

Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

Menghitung data pompa (D) yang akan digunakan untuk menaikan air dari bak penangkap mata air ke bak penampung (reservoir 1) yaitu:

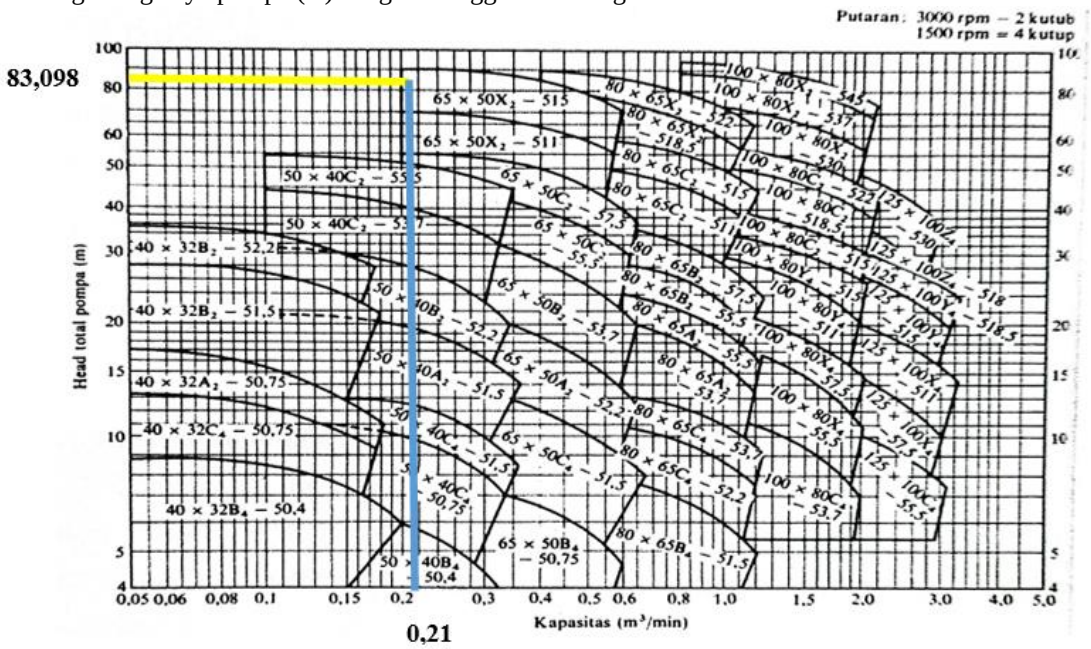
1. Menghitung daya pompa (D) dengan rumus:

$$D = \frac{Q.H.\gamma}{75\eta}$$

$$D = \frac{0{,}00198 \times 83{,}098 \times 1000}{75 \times 0{,}75}$$

D = 2,923 hp = 2179,54 ~ 2200Watt

2. Menghitung daya pompa (D) dengan menggunakan diagram:



Gambar 3. Diagram Pemeliharaan Pada Pompa Umum
Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

Dari diagram pemilihan pompa di atas diperoleh spesifikasi pompa yang digunakan adalah 65 x 50X2 – 5 15 dan kapasitas pompa 0,21 m³/menit atau 0,0035 m³/dtk dengan spesifikasi sebagai berikut:

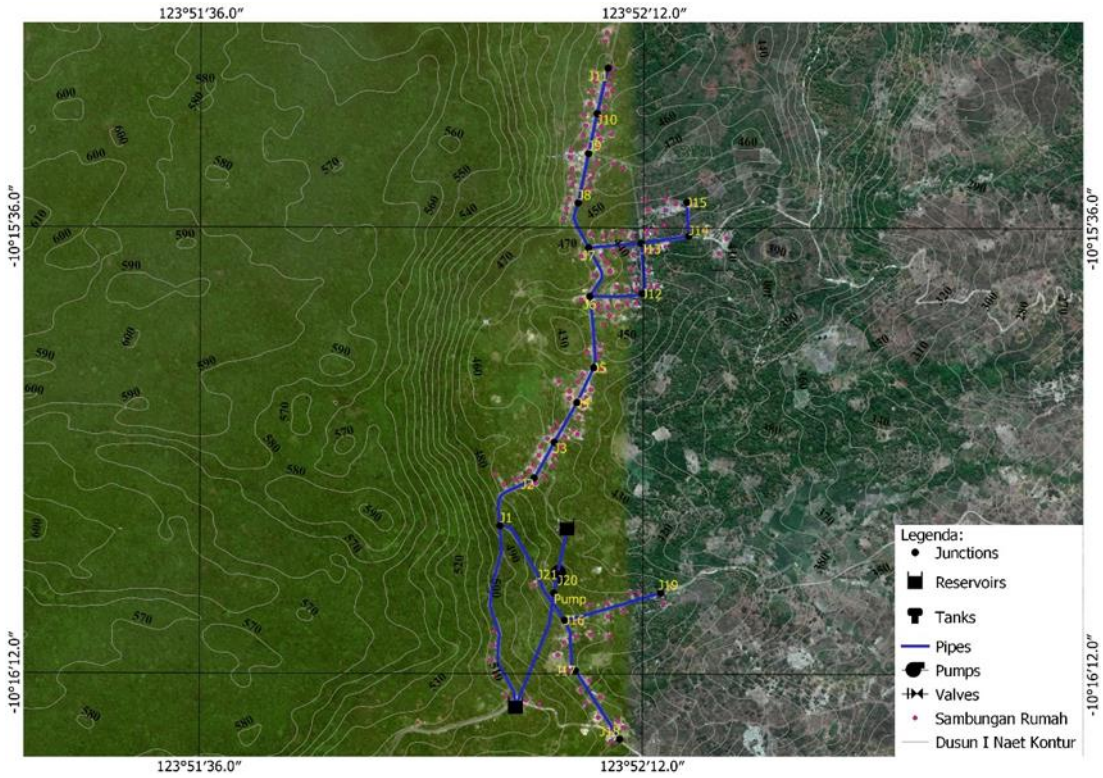
65	= Diameter isap	= 65 mm	= 0,065 m
50	= Diameter Keluar	= 50 mm	= 0,05 m
X2	= Jamlah Katup	= 2 katup	
15	= Daya Motor	= 15 kW	= 15000 Watt.

Perencanaan Jaringan Perpipaan

Perencanaan jaringan air bersih didasarkan pada situasi dan kondisi daerah tersebut serta penyebaran penduduknya. Berdasarkan data topografi dan bentuk jaringan jalan di wilayah perencanaan, digunakan model jaringan sistem cabang (Branch), dengan elevasi reservoir dan pemompaan.

Input data pada program Qgis 3.16 dan Epanet 2.0

1. Peta Jaringan
   Peta jaringan air bersih dideasin berdasarkan pada situasi dan kondisi wilayah perencanaan dengan mengikuti jaringan jalan yang ada. Pada peta jaringan air bersih ini dibuat dengan program Qgis. Pada aplikasi ini terdapat Plugin yang dapat digunakan yaitu quick map service dan Qepanet yang membantu peneliti dalam menentukan letak reservoir, node/junction, membuat jaringan pipa yang disertai dengan diameter masing – masing ruas, dan menentukan sambungan rumah (SR) berdasarkan situasi dan kondisi pada wilayah di Dusun I Naet. Aplikasi ini dapat diinput data DEM pada daerah ini, sehingga pada penggambaran pola jaringan air bersih yang didesain disertai dengan elevasi masing – masing elemen yang digunakan. Peta jaringan air bersih dan sambungan rumah (SR) yang direncanakan di Dusun I Naet dapat dilihat pada Gambar 4. yang merupakan peta yang dibuat menggunakan Plugin Quick Map Service dan Qepanet pada program Qgis.



Gambar 4. Peta Jaringan dan Sambungan Rumah (SR) Air Bersih Dusun I Naet.
Sumber: Software Qgis, 2024

2. Node/Junction

Node atau junction merupakan titik pada jaringan dimana garis – garis sebagai notasi dari pipa bertemu dan air yang memasuki atau meninggalkan jaringan. Input yang digunakan pada node dan ini yaitu elevasi dan besar kebutuhan air (basedemand). Karena penggambaran peta jaringan air bersih ini digunakan bantuan program Qgis maka elevasi tiap node/junction dapat terbaca berdasarkan data DEM dan basedemand pada tiap node/junction dihitung pada aplikasi ini berdasarkan jumlah sambungan rumah di Dusun I Naet. Pada Tabel 9. merupakan rekapan elevasi dan juga basedemand pada masing – masing node/junction di Dusun I Naet. Desain jaringan perpipaan ini menggunakan pipa transmisi, air dari mata air/ sumber air ditampung pada bak penampung mata air (BPMA) kemudian di pompa langsung ke reservoir 1 yang ditampung sementara, kemudian langsung ke pipa distribusi untuk sampai pada sambungan rumah daerah layanan di Dusun I Naet.

Tabel 9. Node/Junction pada Jaringan Air bersih Dusun I Naet

No	Node	Keterangan	Elevasi	Base Demand (LPS)	Demand (LPS)
1	J1		482,66	0,005	0,035
2	J2		450,65	0,01	0,045
3	J3		447,98	0,01	0,045
4	J4		434,1	0,012	0,042
5	J5		434,8	0,006	0,035
6	J6		446,55	0,008	0,035
7	J7		456,81	0,006	0,04
8	J8		456,72	0,01	0,045
9	J9		455,32	0,013	0,035
10	J10		451,51	0,002	0,05
11	J11		449,3	0,005	0,05
12	J12		456,79	0,005	0,041
13	J13		429,06	0,004	0,035

No	Node	Keterangan	Elevasi	Base Demand (LPS)	Demand (LPS)
14	J14		428,17	0,05	0,04
15	J15		440,59	0,05	0,044
16	J16		467,1	0,009	0,035
17	J17		461,85	0,009	0,052
18	J18		462,58	0,003	0,045
19	J19		447,04	0,003	0,035
20	J20	Titik Pump	459,64	-	-
21	Resver 1	Reservoir 1	504,41	-	-

Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

3. Pipa/*Link*

Pipa yang diwakili denga garis pada program EPANET 2.0 diasumsikan bahwa semua pipa adalah penuh berisi air setiap waktunya. Arah aliran yaitu dari titik dengan tekanan hidrolik tertinggi menuju titik dengan tekanan rendah. Pada Tabel 4.10 dapat dilihat variasi diameter dan jenis pipa yang digunakan pada perencanaan jaringan perpipaan di Dusun I Naet. Kehilangan tekanan hidrolis pipa karena pengaliran pipa akibat faktor gesekan pipa disimulasikan menggunakan formula Hazen Williams. Pipa yang digunakan adalah Pipa GIP untuk pipa Transmisi dengan koefisien kekasaran 110 dan pipa HDPE untuk pipa Distribusi dengan koefisien kekasaran 130.

Tabel 10. Pipa/Link pada Jaringan Air bersih Dusun I Naet

No	Link	Keterangan	Panjang (m)	Diameter (mm)	Jenis Pipa
1	Pipe 1	Reservoir 2 - Node 1	467,73	50	HDPE
2	Pipe 2	Node 1-Node 2	172,06	50	
3	Pipe 3	Node 2-Node 3	102,12	50	
4	Pipe 4	Node 3-Node 4	113,93	50	
5	Pipe 5	Node 4-Node 5	95,85	50	
6	Pipe 6	Node 5-Node 6	178,41	50	
7	Pipe 7	Node 6-Node 7	138,37	50	
8	Pipe 8	Node 7-Node 8	121,21	50	
9	Pipe 9	Node 8-Node 9	125,02	50	
10	Pipe 10	Node 9-Node 10	101,25	50	
11	Pipe 11	Node 10-Node 11	116,25	50	
12	Pipe 12	Node 6-Node 12	130,81	32	
13	Pipe 13	Node 12-Node 13	126,97	32	
14	Pipe 14	Node 7-Node 13	133,13	32	
15	Pipe 15	Node 13-Node 14	118,91	25	
16	Pipe 16	Node 14-Node 15	84,81	25	
17	Pipe 17	Node 1 -Node 16	294,12	25	
18	Pipe 18	Node 17-Node 18	202,09	25	
19	Pipe 19	Node 16-Node 19	248,12	25	
20	Pipe 20	Node 16-Node 17	131,01	25	
21	Pipe 21	Res 1 – Res 2	354	50	GIP

Sumber: Hasil Perhitungan, 2024

Hasil analisis Epanet 2.0

Desain jaringan perpipaan air bersih di Dusun I Naet ini telah berhasil di running, yang manghasilkan output berupa grafik dan data. Dari hasil analisis menggunakan program Epanet 2.0, jaringan ini dapat dibuat dengan memperhatikan

kecepatan (Velocity) dan tekanan (Pressure) yang dihasilkan dari setiap pipa dan titik pengambilan air. Untuk hasil analisis jaringan perpipaan pada program Epanet 2.0 dapat dilihat pada Gambar 5, dan Gambar 4.6.

Network Table - Nodes at 7:00 Hrs

Node ID	Elevation m	Base Demand LPS	Demand LPS	Head m	Pressure m
Junc J1	482.66	0.03500	0.04	502.07	19.41
Junc J2	450.65	0.04500	0.05	501.58	50.93
Junc J3	447.98	0.04500	0.05	501.33	53.35
Junc J4	434.10	0.04200	0.04	501.09	66.99
Junc J5	434.80	0.03500	0.04	500.91	66.11
Junc J6	446.55	0.03500	0.04	500.64	54.09
Junc J7	456.81	0.04000	0.04	500.53	43.72
Junc J8	456.72	0.04500	0.05	500.49	43.77
Junc J9	455.32	0.03500	0.04	500.47	45.15
Junc J10	451.51	0.05000	0.05	500.46	48.95
Junc J11	449.30	0.05000	0.05	500.46	51.16
Junc J12	435.09	0.04100	0.04	500.52	65.43
Junc J13	429.06	0.03500	0.04	500.48	71.42
Junc J14	428.17	0.04000	0.04	500.20	72.03
Junc J15	440.59	0.04400	0.04	500.14	59.55
Junc J16	467.10	0.03500	0.04	499.62	32.52
Junc J17	461.85	0.05200	0.05	499.22	37.37
Junc J18	462.58	0.04500	0.05	499.07	36.49
Junc J19	447.04	0.03500	0.04	499.51	52.47
Junc Pump	459.64	0.00000	0.00	509.25	49.61
Resvr R2	504.41	#N/A	0.46	504.41	0.00
Resvr R1	443.33	#N/A	-1.25	443.33	0.00

Gambar 5. Hasil Analsis Jaringan pada tiap – tiap Nodes Perpipaan Dusun I Naet
Sumber: Program Epanet 2.0

Network Table - Links at 7:00 Hrs

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor
Pipe L2	172.06	50.00	130.0000	0.58	0.30	2.88	0.032
Pipe L3	102.12	50.00	130.0000	0.54	0.27	2.48	0.033
Pipe L4	113.93	50.00	130.0000	0.49	0.25	2.11	0.033
Pipe L5	95.85	50.00	130.0000	0.45	0.23	1.79	0.033
Pipe L6	178.41	50.00	130.0000	0.41	0.21	1.54	0.034
Pipe L7	138.37	50.00	130.0000	0.28	0.14	0.76	0.036
Pipe L8	121.21	50.00	130.0000	0.18	0.09	0.33	0.038
Pipe L9	125.02	50.00	130.0000	0.14	0.07	0.19	0.040
Pipe L10	101.25	50.00	130.0000	0.10	0.05	0.11	0.042
Pipe L11	116.25	50.00	130.0000	0.05	0.03	0.03	0.046
Pipe L12	130.81	32.00	130.0000	0.10	0.12	0.91	0.040
Pipe L13	126.97	32.00	130.0000	0.06	0.07	0.33	0.043
Pipe L14	133.13	32.00	130.0000	0.06	0.08	0.42	0.042
Pipe L15	118.91	25.00	130.0000	0.08	0.17	2.34	0.039
Pipe L16	84.81	25.00	130.0000	0.04	0.09	0.71	0.043
Pipe L17	294.12	25.00	130.0000	0.17	0.34	8.34	0.035
Pipe L20	131.01	25.00	130.0000	0.10	0.20	3.05	0.038
Pipe L18	202.09	25.00	130.0000	0.05	0.09	0.74	0.043
Pipe L19	248.12	25.00	130.0000	0.04	0.07	0.46	0.045
Pipe L21	301.60	50.00	110.0000	1.25	0.63	16.05	0.039
Pipe L1	467.73	50.00	130.0000	0.78	0.40	5.00	0.031
Pump 1	#N/A	#N/A	#N/A	1.25	0.00	-65.92	0.000

Gambar 6. Hasil Analsis Jaringan pada Setiap Pipa (Link) Dusun I Naet
Sumber: Program Epanet 2.0

5. PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan yaitu, Jumlah penduduk Dusun I Naet, Desa Nekmese berdasarkan hasil proyeksi di tahun 2032 (10 Tahun) adalah 606 jiwa. Berdasarkan kebutuhan air bersih yang telah dihitung untuk tahun rencana 2032 yaitu 0,656 ltr/dtk dan kebutuhan air pada jam puncak yaitu 0,984 ltr/dtk dengan debit sumber mata air Oe Mathitu yaitu 1,978 ltr/dtk, maka besarnya debit air ini masih cukup untuk melayani wilayah Dusun I Naet sampai tahun 2032. Daya (D) dan spesifikasi pompa yang digunakan berdasarkan diagram pemilihan pompa umum maka untuk menaikan air dari sumber air Oe Mathitu ke bak penampung (Reservoir 1) adalah 65 x 50X2 – 5 15 dan kapasitas pompa 0,21 m³/menit dengan spesifikasi:

65 = Diameter isap = 65 mm = 0,065 m
50 = Diameter Keluar = 50 mm = 0,05 m
X2 = Jamlah Katup = 2 katup
15 = Daya Motor = 15 kW = 15000 Watt.

Kemudian, sistem pemompaan yang direncanakan adalah air dari mata air Oe Mathitu di broncaptering menuju bak penampung mata air I (BPMA/13000 liter) kemudian air disalurkan dari pipa transmisi menggunakan pompa menuju Reservoir I (Res I/25000 liter), kemudian air disalurkan secara gravitasi pada sambungan rumah (SR) melalui pipa distribusi. Berdasarakan hasil analisis dan runing pada program Epanet 2.0 yang telah berhasil maka, untuk pipa transmisi digunakan jenis GIP dengan diameter pipa 50mm dan panjang 345 meter. Sedangkan untuk pipa distribusi digunakan jenis HDPE dengan 3 ukuran diameter yang berbeda yaitu 50 mm, 32 mm, dan 25 mm. Untuk panjang pipa yang digunakan masing – masing yaitu 50 mm sepanjang 1732,2 meter, 32 mm sepanjang 390,91 mm, dan 25 mm sepanjang 1079,06 meter.

DAFTAR PUSTAKA

Boelan, S., A. (2020). “Perencanaan Jaringan Air Bersih di Desa Ainut Kecamatan Insana Kabupaten Timur Tengah Utara”. Universitas Nusa Cendana, Kupang.

Dinas PU Cipta Karya. (2010). “Standart Kebutuhan” – SNI Air Minum.

Ditjen Cipta Karya Dinas PU. 2000. “Kriteria Perencanaan Air Bersih dan Standar Kebutuhan Air Domestik”.

Lambe, A. B. (1982).” Teknik Penyehatan I”. Universitas Hasanudin, Ujung Pandang.

Pedoman Konstruksi dan Bangunan Dep. PU. (2010). “Standar Kebutuhan Air dan Domestik”

Permen PU No : 18/PRT/M. (2007). “Penyelenggaraan Pengembangan Sistem Penyediaan Air Minum. Depertemen PU”. Jakarta.

Sularso dan Harou T. (1996). “Pompa dan Kompresor. Pradya Paramitha”. Jakarta.

Triadmodjo, B. (2006). “Hidrolika I”, Beta Offet. Yogyakarta.

Triatmadja. (2008). “Perencanaan Jaringan Sistem Distribusi Air Pedesaan”, Modul Edisi 2008. Bandung.

Tuames, K., Y., Gaspar. (2015). “Perencanaan Teknis Jaringan Perpipaan Air Bersih Dengan Sistem Pengaliran Pompa di Desa Susulaku A Kecamatan Insana Timor Tengah Utara”. Univeritas Nusa Cendana, Kupang.

ANALISIS KEBUTUHAN INFRASTRUKTUR SISTEM PEMANENAN AIR DI SUBAK BALANGAN DESA KUWUM KABUPATEN BADUNG

I Gusti Agung Putu Eryani[1*], Made Widya Jayantari[2], dan I Gusti Ngurah Hesa Respati Haditama[3]

[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No. 24, Tanjung Bungkak Denpasar Bali*
***e-mail**: eryaniagung@gmail.com*
[2] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jl. Terompong No. 24, Tanjung Bungkak Denpasar Bali
e-mail: penulis@ymail.co.id
[3] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No. 24, Tanjung Bungkak Denpasar Bali
e-mail: hesa.ngurah@gmail.com

ABSTRAK

Desa Kuwum di Kabupaten Badung, Bali, mempertahankan sistem irigasi tradisional subak, yang memainkan peran penting dalam mendistribusikan air secara adil kepada petani. Namun, tantangan serius seperti perubahan iklim dan konflik penggunaan air mengakibatkan kekurangan pasokan air. Untuk mengatasi masalah ini, pembangunan embung geotekstil sebagai infrastruktur pemanenan air menjadi solusi inovatif. Embung geotekstil, menggunakan material geotekstil, memiliki keunggulan dalam daya tahan, fleksibilitas, dan biaya perawatan yang rendah. Sistem ini mampu menampung air hujan yang melimpah pada musim hujan untuk digunakan saat musim kemarau, serta mengurangi risiko banjir dengan mengalirkan air secara bertahap ke saluran irigasi. Dalam implementasinya, analisis lokasi strategis dan desain yang sesuai dengan kebutuhan lokal sangat penting, melibatkan partisipasi aktif dari komunitas subak. Pembangunan embung ini diharapkan dapat meningkatkan produktivitas pertanian, mengurangi risiko gagal panen, dan mendukung kesejahteraan ekonomi masyarakat Desa Kuwum. Selain manfaat teknis, embung geotekstil juga berkontribusi pada keberlanjutan sistem subak, menjaga keseimbangan ekosistem, dan melestarikan warisan budaya. Dengan demikian, pembangunan embung geotekstil di Subak Balangan merupakan langkah strategis untuk memastikan ketersediaan air yang cukup sepanjang tahun dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat, serta menghadapi tantangan perubahan iklim yang semakin mendesak.

Kata kunci: Subak, Infrastruktur, Pemanenan Air, Embung, Geotextile.

1. PENDAHULUAN

Desa Kuwum di Kabupaten Badung, Bali, merupakan salah satu wilayah yang masih mempertahankan sistem irigasi tradisional subak (Eryani et al., 2023). Subak adalah sistem pengelolaan air yang tidak hanya mendistribusikan air secara adil kepada para petani, tetapi juga mencerminkan nilai sosial dan spiritual yang mendalam (Norken, 2015). Subak Balangan sebagai bagian dari sistem ini memiliki peran penting dalam mengelola pasokan air untuk lahan pertanian, khususnya sawah yang menjadi sumber utama penghidupan masyarakat setempat. Namun, Subak Balangan kini menghadapi sejumlah tantangan serius, seperti perubahan iklim yang mengakibatkan ketidakpastian curah hujan, diperparah denga konflik air yang terjadi akibat adanya bangunan tambahan dihulu bangunan distribusi yang menyebabkan Subak Balangan mengalami kekurangan air (Eryani & Jayantari, 2024).

Untuk menghadapi tantangan-tantangan tersebut, diperlukan infrastruktur pemanenan air yang lebih efisien dan berkelanjutan. Pembangunan infrastruktur panen air (embung dan bangunan air lainnya) merupakan upaya mengatasi permasalahan penyediaan air irigasi di lahan pertanian di Indonesia (Rejekiningrum & Kartiwa, 2022; Sulaiman et al., 2017). Sesuai Direktif Presiden RI pada acara Rakernas Pembangunan Pertanian di Hotel Bidakara, Jakarta tanggal 5 Januari 2017 dan Pekan Nasional Petani Nelayan ke-15, di Aceh tanggal 6 Mei 2017, Presiden mengamanatkan untuk membangun embung dan penampung air lainnya sebanyak 30.000 unit (Rejekiningrum & Kartiwa, 2022; Sulaiman et al., 2017).. Direktif tersebut ditindaklanjuti dengan rencana diterbitkannya Inpres tentang percepatan pembangunan embung kecil dan bangunan penampung air lainnya tahun 2017. Embung atau tandon air merupakan waduk berukuran mikro di lahan pertanian yang dibangun untuk menampung kelebihan air hujan di musim hujan (Wiradnyana, 2018). Air yang ditampung tersebut selanjutnya digunakan sebagai sumber irigasi suplementer untuk budidaya komoditas pertanian bernilai ekonomi tinggi di musim kemarau atau di saat curah hujan makin jarang.

Salah satu solusi yang dapat diimplementasikan adalah pembangunan embung geotekstil. Embung geotekstil adalah struktur penampungan air yang menggunakan material geotekstil sebagai lapisan penahan air. Material ini memiliki keunggulan dalam hal daya tahan, fleksibilitas, dan kemampuan untuk menahan air dengan baik, sehingga sangat cocok untuk digunakan dalam kondisi geografis dan iklim yang bervariasi (PT Barca Karya Utama, 2024). Embung geotekstil dapat menjadi solusi inovatif untuk mengatasi masalah kekurangan air di Subak Balangan.

Dengan adanya embung ini, air hujan yang melimpah saat musim hujan dapat dikumpulkan dan disimpan untuk digunakan pada musim kemarau. Embung ini juga dapat membantu mengurangi risiko banjir dengan menampung air

hujan yang berlebihan dan mengalirkannya secara bertahap ke saluran irigasi (Kedaton et al., 2024). Selain itu, penggunaan material geotekstil membuat embung ini lebih mudah dan cepat dibangun dibandingkan dengan embung konvensional, serta memerlukan biaya perawatan yang lebih rendah.

Implementasi embung geotekstil di Subak Balangan akan melibatkan beberapa langkah penting. Pertama, perlu dilakukan analisis mendalam mengenai lokasi-lokasi yang strategis untuk pembangunan embung. Faktor-faktor seperti topografi, curah hujan, dan kebutuhan air di berbagai bagian subak harus dipertimbangkan. Kedua, desain embung harus disesuaikan dengan kondisi setempat dan kapasitas penyimpanan air yang dibutuhkan. Ketiga, proses pembangunan harus melibatkan partisipasi aktif dari komunitas subak untuk memastikan bahwa solusi yang diusulkan sesuai dengan nilai-nilai dan tradisi yang ada.

Selain manfaat teknis, embung geotekstil juga dapat memberikan manfaat sosial dan ekonomi (Asri & Falihin, 2022). Dengan adanya embung ini, petani dapat mengandalkan pasokan air yang lebih stabil sepanjang tahun, sehingga dapat meningkatkan produktivitas pertanian dan mengurangi risiko gagal panen. Hal ini akan berdampak positif terhadap kesejahteraan ekonomi masyarakat Desa Kuwum.

Dalam jangka panjang, embung geotekstil dapat berkontribusi pada keberlanjutan sistem subak di Desa Kuwum. Dengan memastikan pasokan air yang cukup dan stabil, embung ini akan membantu mempertahankan produktivitas pertanian, menjaga kesejahteraan masyarakat, dan melestarikan lingkungan serta warisan budaya yang ada. Oleh karena itu, pembangunan embung geotekstil sebagai bagian dari infrastruktur pemanenan air merupakan langkah strategis dan berkelanjutan untuk mengatasi tantangan yang dihadapi oleh Subak Balangan di Kabupaten Badung.

Dengan melakukan analisis kebutuhan infrastruktur pemanenan air, komunitas dapat merencanakan dan mengimplementasikan sistem yang efisien untuk mengumpulkan dan menyimpan air selama musim hujan. Ini akan memastikan ketersediaan air yang cukup selama musim kemarau. Analisis kebutuhan memungkinkan identifikasi sumber daya air yang tersedia dan bagaimana sumber tersebut dapat dikelola secara efektif. Ini termasuk menentukan lokasi optimal untuk infrastruktur pemanenan air seperti waduk, bendungan kecil, dan tangki penyimpanan. Dengan memahami kebutuhan infrastruktur, sistem irigasi dapat dirancang untuk memaksimalkan penggunaan air yang tersedia. Ini termasuk teknologi irigasi hemat air yang dapat mengurangi pemborosan dan memastikan air digunakan dengan bijaksana. Analisis kebutuhan infrastruktur membantu dalam merancang sistem yang adaptif terhadap perubahan iklim. Dengan adanya sistem pemanenan air yang baik, komunitas Subak dapat lebih tahan terhadap fluktuasi cuaca ekstrem seperti kekeringan berkepanjangan.

Kajian pemanenan air hujan untuk sistem irigasi dan kendali iklim mikro di Subak Balangan, terdapat beberapa rumusan masalah yang perlu untuk dikembangkan. Pertama, mengkaji bagaimana potensi pemanenan air hujan dapat diterapkan pada kawasan subak untuk memenuhi kebutuhan tanaman pertanian. Hal ini meliputi metode yang digunakan untuk mengumpulkan dan menyimpan air hujan yang dipanen serta efisiensinya untuk menyediakan kebutuhan air di dalam jaringan irigasi. Hal ini mencakup desain dan infrastruktur sistem pemanenan air hujan, seperti embung kecil/cubang penampungan dan penyimpanan, penyaringan dan pemanfaatan air. Mengidentifikasi manfaat penggunaan air hujan dalam mengurangi penggunaan sumber air lain dapat membantu dalam mengelola sumber daya air secara berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Subak Balangan dan Subak Uma tegal adalah subak yang terletak di Desa Kuwum,Kabupaten Badung Provinsi Bali. Sumber air dari kedua subak ini adalah Sungai Yeh Penet. Saat ini kondisi kedua subak ini masih mengalami beberapa kendala seperti kekurangan air dan terjadi konflik penggunaan air antara subak pada Hulu Sungai denganbagian hilirnya. Lokasi Subak Balangan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data promer dan sekunder. Data primer yang digunakan berupa data ukuran embung yang akan dibuat sebagai sistem pemanenan air di Subak balangan yang didapat dari hasil observasi dilapangan. Sedangkan data sekunder yang digunakan berupa data suhu dan curah hujan tahunan yang didapat dari data satelit NASA POWER (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/) dari tahun 1990 hingga 2022. Kemudian data lain yang digunakan adalah data detail luas dan kebutuhan air Subak Balangan yang didapat dari Balai Wilayah Sungai Bali Penida

Metode Analisis Data

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif deskriptif dimana diawali dengan pengolahan data hujan dan suhu untuk melihat kondisi eksisting supply air kemudian dilanjutkan dengan perhitungan volume embung untuk melihat berapa persen embung dapat mencukupi kebutuhan air irigasi di Subak Balangan. Bagan alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Alur Pikir Penelitian

Perhitungan debit air hujan didapatkan dari curah hujan harian pada stasiun hujan Rumus yang digunakan untuk menghitung debit air hujan yang dapat ditampung dapat dilihat pada Persamaan (1).

$$S = A.\,M.\,F \quad (1)$$

Dimana:
S = supply air hujan (m^3)
A = luas area penangkapan air hujan (m^2)
M = curah hujan rata- rata tahunan (mm/tahun)
F = koefisien pengaliran

Perhitungan Kapasitas hujan pada embung untuk penampungan air hujan dapat dihitung dengan Persamaan (2).

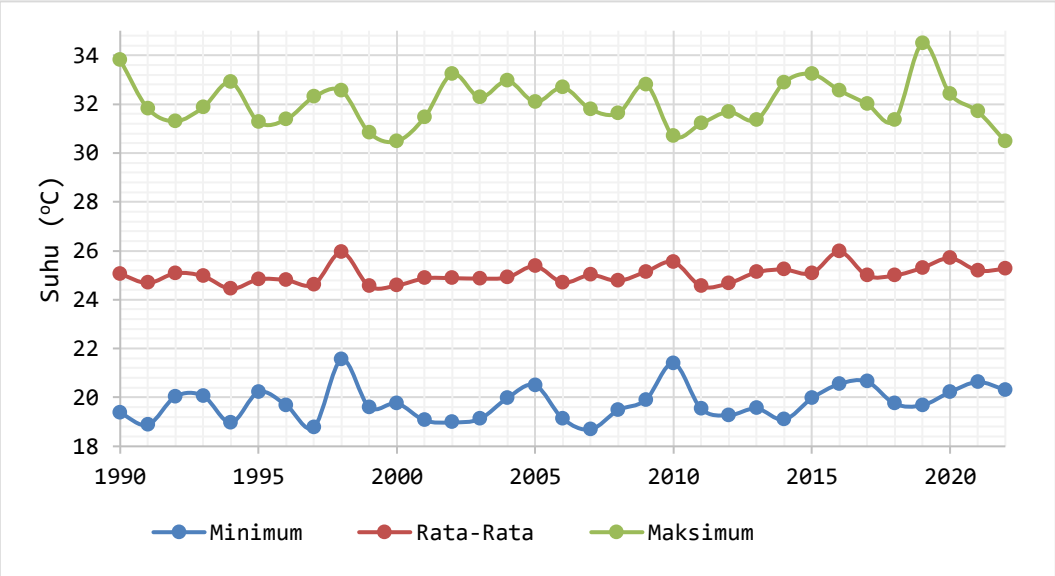
$$V = S\text{-}B \quad (1)$$

Dimana:
V = volume embung (m^3)
S = supply air hujan yang dapat diterima (m^3)
B = total kebutuhan air sebulan (m^3)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Suhu

Fluktuasi data suhu rata-rata tahunan (Gambar 3) berkisar antara 18°C hingga 34°C menunjukkan variasi suhu yang signifikan sepanjang tahun dari tahun 1990 hingga 2022, dengan suhu minimum mencapai 18.89°C dan maksimum mencapai 34.48°C. Perubahan suhu ini dapat berdampak besar pada ketersediaan air irigasi. Suhu yang lebih tinggi meningkatkan tingkat penguapan air dari permukaan tanah dan badan air (Sari et al., 2021), sehingga mengurangi jumlah air yang tersedia untuk irigasi. Hal ini dapat memperparah kekeringan terutama di musim panas dan mempengaruhi hasil pertanian. Di sisi lain, suhu yang lebih rendah dapat mengurangi laju penguapan, tetapi jika suhu turun terlalu drastis, hal ini dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman yang membutuhkan suhu hangat.

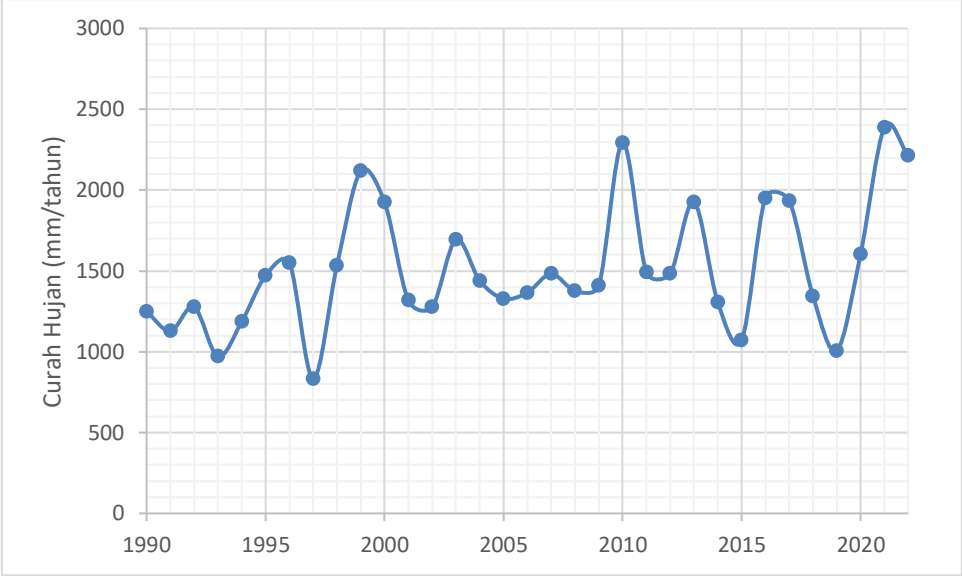


Gambar 3. Fluktuasi Suhu Rata-Rata Tahunan

Curah Hujan Tahunan

Curah hujan tahunan maksimal yang tercatat dari tahun 1990 hingga 2022 dengan nilai tertinggi sebesar 2385,73 mm/tahun, nilai terendah sebesar 833,2 mm/tahun, dan rata-rata sebesar 1513,52 mm/tahun menunjukkan variasi yang besar dalam distribusi hujan sepanjang tahun. Perbedaan ini memberikan gambaran penting tentang ketersediaan air di suatu wilayah, yang sangat berpengaruh terhadap sektor pertanian, khususnya irigasi. Ketika curah hujan mencapai nilai maksimal, sekitar 2385,73 mm/tahun, air yang tersedia untuk irigasi berlimpah. Kondisi ini mengurangi tekanan

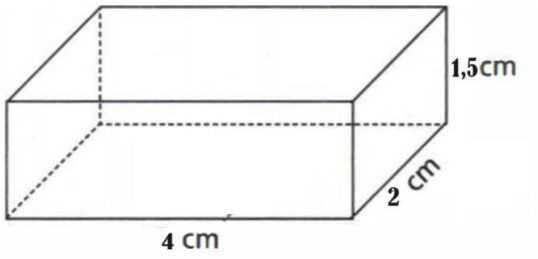
pada sumber air tambahan seperti sungai, waduk, atau air tanah. Pasokan air yang cukup memastikan bahwa tanaman dapat tumbuh optimal, mengurangi risiko gagal panen akibat kekurangan air. Selain itu, tanah yang terhidrasi dengan baik membantu menjaga kelembapan tanah, mendukung kesehatan tanaman, dan meningkatkan hasil panen. Sebaliknya, pada tahun-tahun ketika curah hujan minimal sekitar 833,2 mm/tahun, ketersediaan air untuk irigasi bisa menjadi tantangan. Kekurangan curah hujan dapat menyebabkan penurunan debit air di sungai dan waduk (Budianto et al., 2020; Muchtar & Abdullah, 2017), meningkatkan kebutuhan untuk manajemen air yang lebih ketat dan efisien. Kekurangan air bisa menyebabkan stres air pada tanaman, mengurangi produktivitas, dan bahkan menyebabkan kegagalan panen jika tidak diatasi dengan tepat. Dalam kondisi seperti ini, penting untuk memiliki sistem irigasi yang efisien, teknik pengelolaan air yang baik, dan mungkin sumber air alternatif untuk memastikan pasokan air yang cukup. Fluktuasi curah hujan tahunan dapat dilihat pada Gambar 4,



Gambar 4. Fluktuasi Suhu Rata-Rata Tahunan

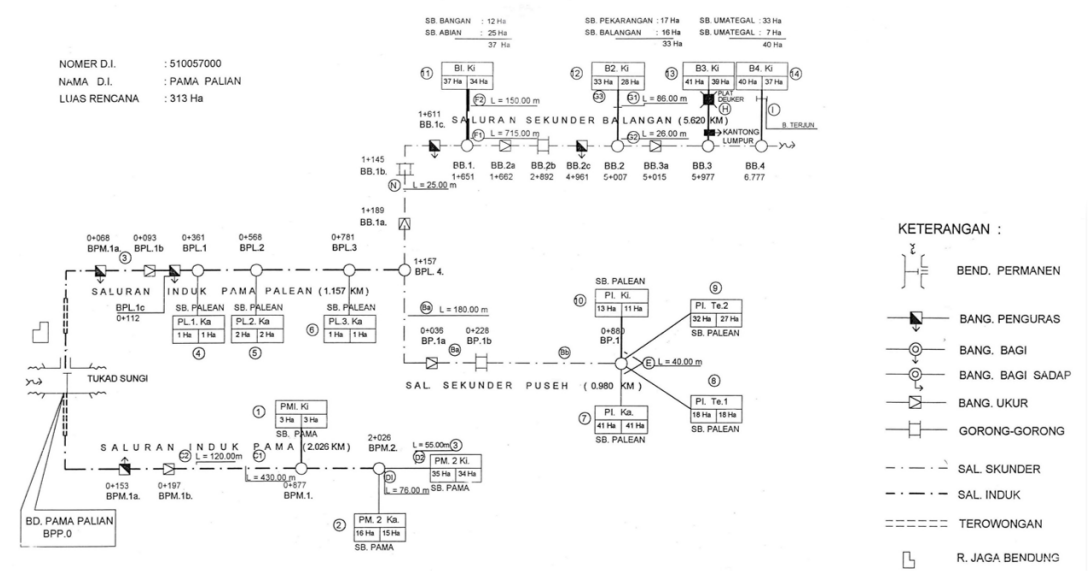
Ketersediaan Air dengan Embung

Metode pemanenan air hujan terdiri dari proses pengumpulan, penyimpanan, dan penggunaan kembali air hujan yang jatuh di atas di cubang atau embung kecil ukuran 4 x 2 x 1,5 m (Gambar 5) sebanyak 2 embung dan 2 x 1,5 x 1 sebanyak 3 embung kecil. Luasan area tangkapan, kualitas dan kapasitas cubang untuk penyimpanan yang merupakan faktor yang menentukan tingkat efisiensi pemanenan air hujan pada area subak sebagai air Irigasi yang dapat dilakukan berdasarkan acuan waktu menghitung kebutuhan air yang diperlukan untuk mencukupi daerah irigasi.



Gambar 5. Ilustrasi Dimensi Embung

Kebutuhan Air



Gambar 6. Skema Daerah Irigasi Subak

Sumber: (BWS Bali-Penida, 2021)

PERHITUNGAN KEBUTUHAN AIR IRIGASI DI PAMA PALIAN KIRI
POLA TANAM : PADI - PADI
AWAL TANAM : MEI I

No	Uraian	Satuan	2020																							
			Januari		Februari		Maret		April		Mei		Juni		Juli		Agustus		September		Oktober		November		Desember	
			I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1	Pola Tata Tanam										PL			WLR		PADI			PL			WLR		PADI		
2	Koefisien Tanaman Padi									PL	PL	1.100	1.100	1.050	1.050	0.950	0.000	PL	PL	1.100	1.100	1.050	1.050	0.950	0.000	
										PL	PL	1.100	1.100	1.050	1.050	0.950	0.000	PL	PL	1.100	1.100	1.050	1.050	0.950	0.000	0.000
	Koefisien Tanaman Palawija																									
3	Jumlah hari	hr	15	16	15	13	15	16	15	15	15	16	15	15	15	16	15	16	15	15	15	16	15	15	15	16
4	- Rerata Koefisien Tanaman Untuk Padi											1.100	1.100	1.075	1.050	1.000	0.475	0.000		1.100	1.100	1.075	1.050	1.000	0.475	0.000
	- Rerata Koefisien Tanaman Untuk Palawija																									
5	Evapotranspirasi Potensial	mm/hr	3.019	3.019	2.760	2.760	2.943	2.943	2.108	2.108	1.985	1.985	1.884	1.884	1.895	1.895	2.270	2.270	2.824	2.824	2.924	2.924	2.893	2.893	2.835	2.835
6	- Penggunaan Air Konsumtif Untuk Padi	mm/hr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.184	2.072	2.025	1.990	1.895	1.078	0.000	0.000	3.106	3.217	3.144	3.037	2.893	1.347	0.000
	- Penggunaan Air Konsumtif Untuk Palawija	mm/hr																								
7	- Rasio Luas P.A.K untuk Padi	mm/hr										0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500		0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500
	- Rasio Luas P.A.K untuk Palawija	mm/hr																								
8	- P.A.K dengan Rasio Luas untuk Padi	mm/hr							0.000	0.000	1.092	2.072	2.025	1.990	1.895	1.078	0.000	0.000	1.553	3.217	3.144	3.037	2.893	1.347	0.000	
	- P.A.K dengan Rasio Luas untuk Palawija	mm/hr																								
9	Keb. Air untuk Penyiapan Lahan (PL)	mm/hr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.700	12.700	12.700	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	12.700	11.164	11.164	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	Rasio Luas P.L	mm/hr								0.500	1.000	0.500						0.500	1.000	0.500						
11	P.L dengan Rasio Luas	mm/hr								6.350	12.700	6.350						6.350	11.164	5.582						
12	Perkolasi	mm/hr								2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000			2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000			
13	Rasio Luas Perkolasi									0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500			0.500	1.000	1.000	1.000	1.000	0.500			
14	Perkolasi Dengan Rasio Luas	mm/hr								1.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.000			1.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.000			
15	Penggantian lapisan Air (WLR)	mm/hr											1.667	1.667	1.667					1.667	1.667	1.667				1.667
16	Rasio Luas WLR												0.500	1.000	0.500					0.500	1.000	0.500				0.500
17	WLR dengan Rasio Luas	mm/hr											0.833	1.667	0.833					0.833	1.667	0.833				0.833
18	- Kebutuhan Air Bersih Padi	mm/hr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	7.350	14.700	9.442	4.905	5.692	3.823	1.895	1.078	7.350	13.164	9.988	6.883	5.977	4.037	2.893	1.347	0.833
	- Kebutuhan Air Bersih Palawija	mm/hr																								
19	- Curah Hujan R50	mm/hr	6.893	7.187	6.287	5.308	7.239	5.906	2.883	3.007	1.182	1.157	0.801	0.885	0.067	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	2.313	3.600	4.133	5.067	6.110
	- Curah Hujan Efektif	mm/hr	4.825	5.017	4.397	3.715	5.067	4.134	2.018	2.105	0.827	0.810	0.421	0.465	0.047	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.700	1.619	2.520	2.893	3.547	5.677
20	- Curah Hujan R80	mm/hr	3.907	5.383	5.248	4.125	5.418	4.325	1.627	2.070	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.733	1.832	3.640	4.450
	- Curah Hujan Efektif	mm/hr	2.735	3.754	3.672	2.887	3.791	3.028	1.139	1.449	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.213	1.282	2.548	3.115
21	Kebutuhan Bersih Air di Sawah Untuk Padi	lit/hr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.883	1.701	1.093	0.568	0.659	0.443	0.219	0.125	0.851	1.524	1.154	0.797	0.652	0.176	0.000	0.000	0.000
	Kebutuhan Bersih Air di Sawah Untuk Palawija	lit/hr																								
22	Kebutuhan Bersih Air di Sawah Total (NFR)	lit/hr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.883	1.701	1.093	0.568	0.659	0.443	0.219	0.125	0.851	1.524	1.154	0.797	0.652	0.176	0.000	0.000	0.000
23	Efisiensi Irigasi		0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648	0.648
24	Keb.Air Irigasi di Pintu Pengambilan Pada MT 1 (DR)	lit/hr								1.054	2.626	1.686	0.876	1.017	0.683	0.339	0.193									
	Keb.Air Irigasi di Pintu Pengambilan Pada MT 2 (DR)	lit/hr																1.313	2.351	1.780	1.229	1.006	0.271	0.000	0.000	0.000
	Keb.Air Irigasi di Pintu Pengambilan Pada MT 3 (DR)	lit/hr																								
25	Keb.Air Irigasi di Pintu Pengambilan Total (DR)	lit/hr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.054	2.626	1.686	0.876	1.017	0.683	0.339	0.193	1.313	2.351	1.780	1.229	1.006	0.271	0.000	0.000	0.000

Gambar 7. Kebutuhan Air

Sumber: (BWS Bali-Penida, 2021)

Berdasarkan Gambar 5-7 dan persamaan (1) dan (2), maka dihitung evaluasi system pemanenan air sebagai berikut.

Supply dari embung = 33 x 1513,52 x 0,6

= 29.967,7 m^3

Kebutuhan = 16.486 m^3/dtk/ha x 16 ha

= 263.776 m^3/dtk

Dari perhitunganm diketahui dengan 5 embung yang telah dibuat dapat memberikan tambahan supply 11.36% untuk Subak Balangan. Dengan adanya penambahan supply ini dapat membantu kebutuhan air Subak Balangan Ketika musim kemarau.

Potensi Pemanenan Air Hujan Dapat Diterapkan Pada Kawasan Subak Balangan

Pemanenan air hujan memiliki potensi besar untuk diterapkan pada kawasan subak dalam rangka memenuhi kebutuhan air bagi tanaman pertanian. Metode yang digunakan untuk mengumpulkan dan menyimpan air hujan yang dipanen melibatkan desain dan infrastruktur sistem yang cermat. Salah satu metode adalah penggunaan embung kecil atau cubang penampungan sebagai wadah utama penyimpanan air. Air hujan yang terkumpul kemudian disaring untuk memastikan kualitasnya sebelum digunakan. Efisiensi sistem ini terletak pada kemampuannya untuk menyediakan air yang cukup selama musim kemarau, mengurangi ketergantungan pada sumber air irigasi tradisional. Dengan implementasi yang tepat, sistem pemanenan air hujan ini dapat meningkatkan keberlanjutan pertanian di kawasan subak, menjaga keseimbangan ekosistem, dan memastikan ketersediaan air yang cukup untuk tanaman sepanjang tahun.

Infrastruktur Sistem Pemanenan Air Di Subak Balangan Desa Kuwum Kabupaten Badung

Sistem PAH yang diterapkan di kawasan Subak Balangan Desa Kuwum tersebut merupakan sistem PAH yang sederhana, dan mudah dalam konstruksi. Sistem ini sangat membantu masyarakat kelompok subak yang kekurangan air dan tidak mendapatkan air dimusim kemarau, untuk kegiatan pembuatan embung dari bahan geomembran di kawasan Subak Balangan dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Proses Pembuatan Cubang Pemanenan Air Di Subak Dari Bahan Geomembran

Pembangunan embung kecil dan bangunan penampung air lainnya untuk tanaman padi sangat bermanfaat dan menguntungkan karena tidak membutuhkan investasi besar. Pengembangan embung kecil dan bangunan penampung air lainnya memiliki keunggulan dibandingkan dengan pembangunan bendung besar, antara lain: biaya investasi rendah (melibatkan partisipasi masyarakat), waktu pemanfaatan untuk irigasi relatif cepat (quick yields), pemeliharaan relatif murah, tidak memiliki risiko sosial tinggi (pembebasan lahan), ramah lingkungan, dan memiliki co-benefit tinggi (perikanan, agrowisata, konservasi air dan lain-lain). Pada daerah berbukit sungai-sungai kecil atau parit bisa dibendung dan airnya di alirkan ke lahan-lahan pertanian hortikultura. Pada daerah bergelombang, air permukaan baik dari sungai maupun dari hujan dapat ditampung di embung-embung untuk mengairi lahan pertanian palawija (jagung, kedelai, dan aneka umbi dan kacang lainnya). Pada daerah datar, embung dan long storage dibangun guna menampung air saat musim hujan untuk mengairi palawija dan padi saat musim kemarau. Dengan cara ini, air hujan dapat dipanen, didaur ulang dan didayagunakan untuk menghasilkan aneka produk pertanian (sebagai sumber karbohidrat, protein, lemak, dan vitamin) (BBSDLP, 2017b). Embung adalah bangunan konservasi air berbentuk kolam/cekungan untuk menampung air limpasan (run off) serta sumber air lainnya untuk mendukung usaha pertanian. Dam Parit adalah suatu bangunan konservasi air berupa bendungan kecil pada parit-parit alamiah atau sungai - sungai kecil yang dapat menahan air dan meningkatkan tinggi muka air untuk disalurkan sebagai air irigasi. Longstorage adalah bangunan penahan air yang berfungsi menyimpan air di dalam sungai, kanal dan atau parit pada lahan yang relatif datar dengan cara menahan aliran untuk menaikkan permukaan air sehingga cadangan air irigasi meningkat. Pembangunan infrastruktur untuk pemanenan air dengan embung dapat digambarkan seperti Gambar 5. Pengelolaan air melalui pemanenan air menggunakan embung di subak dapat dilaksanakan dengan beberapa langkah yang dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan air hujan dan meningkatkan efisiensi irigasi.

Pembuatan cubang air melibatkan beberapa langkah penting untuk memastikan efektivitas penangkapan dan distribusi air hujan. Pertama, identifikasi lokasi yang optimal, biasanya di titik tertinggi atau area strategis dalam wilayah subak, untuk memaksimalkan penangkapan air hujan. Selanjutnya, desain dan konstruksi cubang air disesuaikan dengan kebutuhan irigasi lokal, menggunakan bahan seperti beton atau batu untuk membuat tangki penampung yang kedap air, serta menyediakan saluran masuk dan keluar air. Sistem pemanenan air hujan mencakup pemasangan talang di atap bangunan untuk mengarahkan air ke cubang air dan memastikan saluran air bebas dari penyumbatan. Distribusi air diatur berdasarkan kebutuhan tanaman dan musim tanam, menggunakan pompa atau sistem gravitasi. Pengawasan kualitas air dilakukan untuk mencegah kontaminasi, dengan metode filtrasi sederhana jika diperlukan. Pelatihan dan peningkatan kesadaran bagi anggota subak tentang teknik pemanenan air hujan dan pengelolaan cubang air juga penting. Cubang air kemudian diintegrasikan ke dalam sistem irigasi subak yang ada untuk meningkatkan ketahanan air selama musim kemarau, serta menggunakan teknologi modern seperti sensor kelembaban tanah dan pengumpulan data untuk efisiensi distribusi dan prediksi curah hujan.

Langkah-langkah dalam SOP di atas akan bermanfaat maksimal untuk umur bahan geomembran dan kualitas air. Subak dapat mengoptimalkan penggunaan air hujan melalui pemanenan dan pengelolaan yang baik, sehingga dapat meningkatkan ketahanan air dan produktivitas pertanian. Metode pemanenan air hujan terdiri dari proses pengumpulan, penyimpanan, dan penggunaan kembali air hujan yang jatuh di embung. Pemanenan air hujan dapat mengurangi ketergantungan pada sumber air tanah dan menciptakan kondisi lingkungan mikro di kawasan Subak Balangan. Perhitungan biaya untuk pembuatan embung dari bahan geomembran dapat ditetapkan sebagai berikut.

Tabel 1. Sasaran Luas Layanan (Ha) Pembangunan Infrastruktur Panen Air 2017 Per Pulau

No	Pulau	Dam Parit	Embung	Long Storage	Pemanfaatan Sungai (Pompa)	Sumur Dangkal	Jumlah
1	Sumatera	312.533	218.327	13.5	655.561	6.555	1.206.476
2	Jawa	75.595	130.695	29.044	486.012	2.989	724.334
3	Kalimantan	132.866	282.167	13.23	912.053	2.386	1.342.702
4	Sulawesi	68.18	87.549	19.175	428.537	5.431	608.872
5	Bali dan Nusa Tenggara	15.576	30.778	8.847	58.558	4.117	117.876
6	Maluku dan Maluku Utara	5.656	3.999	4.948	8.384	1.229	24.216
7	Papua	1.663	5.631	2.295	17.46	1.632	28.681
	Jumlah	612.068	759.147	91.039	2.566.565	24.339	4.053.157

Sumber:(BBSDLP, 2017b, 2017a)

Tabel 2. Perbandingan Keunggulan Dan Kelemahan Jenis Infrastruktur Panen Air

No	Indikator Keunggulan	Bendung	Embung Kecil dan Bangunan Air Lainnya
1	Waktu menghasilkan (*quick yield*)	Lama (30 tahun)	Cepat (6 bulan)
2	Pemeliharaan	Mahal	Murah
3	Partisipasi masyarakat (kontrol sosial)	Rendah	Gotong royong
4	Tenaga kerja	Mahal	Swadaya
5	Biaya investasi	Tinggi	Rendah
6	Masalah sosial	Risiko tinggi	Risiko rendah
7	Lingkungan (konservasi air)	Tidak Ramah (kurang baik)	Ramah (baik)
8	Multiplier effect social	Rendah	Tinggi
9	Emisi GRK	Tinggi	Rendah

Sumber: (BBSDLP, 2017b)

Perawatan Embung/cubang air di Subak Balangan adalah langkah penting untuk memastikan keberlanjutan dan efisiensi pemanenan air hujan serta distribusinya ke lahan pertanian. Langkah-langkah perawatan embung/cubang air Perawatan embung/cubang air di Subak Balangan adalah langkah penting untuk memastikan keberlanjutan dan efisiensi pemanenan air hujan serta distribusinya ke lahan pertanian. Langkah-langkah perawatan meliputi: pemeriksaan rutin pada struktur cubang air untuk mendeteksi retakan, kebocoran, atau kerusakan lainnya, serta memastikan saluran masuk dan keluar berfungsi baik. Pembersihan talang atau saluran dari daun, sampah, dan

sedimen yang dapat menyumbat aliran air harus dilakukan secara berkala, terutama setelah hujan deras. Pengendalian sedimen dilakukan dengan memeriksa dan mengeluarkan sedimen yang terkumpul di dasar tangki menggunakan peralatan yang sesuai. Pemeliharaan struktur mencakup perbaikan retakan atau kebocoran dengan bahan perekat atau sealant yang tahan air, dan untuk kerusakan besar, memanggil tenaga ahli konstruksi. Pengawasan kualitas air dilakukan secara berkala untuk memastikan tidak ada kontaminasi, dengan menggunakan metode filtrasi sederhana jika diperlukan. Pengelolaan vegetasi di sekitar cubang air melibatkan pemotongan rumput atau tanaman liar yang bisa mengganggu akses dan menyebabkan akumulasi kotoran, serta memastikan tidak ada akar tanaman besar yang bisa merusak struktur cubang air.di subak

Cubang air dari bahan geomembran tekstil memerlukan perawatan khusus untuk memastikan keawetan dan fungsionalitasnya. Berikut adalah langkah-langkah perawatan cubang air yang menggunakan geomembran tekstil. Perawatan geomembran tekstil di cubang air memerlukan langkah-langkah yang sistematis untuk memastikan keawetan dan efektivitasnya dalam menampung air. Langkah pertama adalah pemeriksaan visual rutin untuk mendeteksi kerusakan seperti sobekan, retakan, atau keausan, serta memastikan tidak ada benda tajam yang dapat merusak geomembran. Permukaan geomembran harus dibersihkan secara berkala dari kotoran, lumpur, dan sampah menggunakan sikat lembut dan air bersih. Pengendalian sedimen dan tanaman liar juga penting untuk mencegah penumpukan sedimen di dasar cubang air dan pertumbuhan tanaman yang akarnya bisa merusak geomembran. Untuk kerusakan kecil, perbaikan segera menggunakan bahan perbaikan kompatibel sangat diperlukan. Pengawasan kualitas air dilakukan untuk memastikan tidak ada kontaminasi yang dapat mempercepat kerusakan geomembran, dan menghindari bahan kimia berbahaya. Pengelolaan beban dan tekanan harus dijaga dalam batas aman yang direkomendasikan. Pemeliharaan sistem penutup, jika ada, memastikan penutup terpasang dengan baik dan melindungi geomembran dari sinar UV. Pencegahan kontaminasi oleh hewan dilakukan dengan memasang penghalang atau jaring untuk mencegah masuknya hewan. Pelatihan dan penyuluhan kepada petani atau operator yang bertanggung jawab sangat penting untuk memastikan perawatan yang benar, serta menyediakan panduan tertulis atau video tutorial. Dokumentasi dan evaluasi semua kegiatan perawatan harus dilakukan secara berkala untuk memantau kondisi geomembran dan efektivitas perawatan, serta membuat perbaikan jika diperlukan.

4. KESIMPULAN

Subak Balangan, sebagai bagian dari sistem ini, memiliki peran vital dalam mendistribusikan air secara adil kepada para petani. Namun, tantangan serius seperti perubahan iklim yang menyebabkan ketidakpastian curah hujan dan konflik penggunaan air akibat pembangunan tambahan di hulu telah mengakibatkan kekurangan air. Untuk menghadapi tantangan ini, pembangunan embung geotekstil sebagai infrastruktur pemanenan air merupakan solusi inovatif yang berpotensi mengumpulkan dan menyimpan air hujan untuk digunakan saat musim kemarau. Embung geotekstil, yang menggunakan material geotekstil, menawarkan keunggulan dalam daya tahan dan biaya perawatan yang rendah, serta kemampuan untuk mengurangi risiko banjir dengan mengalirkan air secara bertahap ke saluran irigasi. Selain itu, sistem ini dapat meningkatkan produktivitas pertanian, mengurangi risiko gagal panen, dan mendukung kesejahteraan ekonomi masyarakat Desa Kuwum. Implementasi embung ini harus melibatkan analisis mendalam tentang lokasi strategis dan desain yang sesuai dengan kebutuhan lokal, serta partisipasi aktif dari komunitas subak. Dengan adanya embung geotekstil, diharapkan pasokan air yang stabil dapat terjamin, sehingga mendukung keberlanjutan sistem subak dan pelestarian warisan budaya, serta memastikan ketersediaan air yang cukup sepanjang tahun untuk pertanian. Secara keseluruhan, pembangunan embung geotekstil di Subak Balangan merupakan langkah strategis yang tidak hanya menanggulangi masalah kekurangan air, tetapi juga menjaga keseimbangan ekosistem dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

Asri, Y., & Falihin, D. (2022). Pengaruh Pembangunan Embung (Penampungan Air) Terhadap Hasil Panen Petani Di Desa Paccekke Kecamatan Soppeng Riaja Kabupaten Barru. *Social Landscape Journal*, *3*(3), 112. https://doi.org/10.56680/slj.v3i3.39149

BBSDLP. (2017a). *Embung Solusi Peningkatan Produksi Pangan Nasional*.

BBSDLP. (2017b). *Reorientasi Kebijakan Pengembangan Infrastruktur Irigasi Nasional*.

Budianto, M. B., Putra, I. G., & Saidah, H. (2020). Indeks Kekeringan Hidrologi Berdasarkan Debit (Studi Kasus Daerah Aliran Sungai Sidutan). *Spektrum Sipil*, *7*(2), 115–125. https://doi.org/10.29303/spektrum.v7i2.178

BWS Bali-Penida. (2021). *Alokasi Air, Pola Tanam & Neraca Air DI. Pama Palian*.

Eryani, I. G. A. P., & Jayantari, M. W. (2024). Water conflict analysis in the Balangan Irrigation Area: Causes, impacts, and management strategies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1311*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1311/1/012036

Eryani, I. G. A. P., Wijaya, I. K. M., & Jayantari, M. W. (2023). Perencanaan Masterplan Penataan Kawasan Subak

Balangan Berbasis Ekowisata. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, *27*(2), 181–188.

Kedaton, K. H. P., Yekti, M. I., Sudiartama, I. G. A., Cahyani, K. D., & Annilda, F. (2024). Being Waterwise: Embung Sanur Sebagai Metropolitan Water Conservation Selaras dengan Konsep Tri Hita Karana. *Jurnal Pembangunan Wilayah Dan Kota*, *20*(1), 113–125. https://doi.org/10.14710/pwk.v20i1.48347

Muchtar, A., & Abdullah, N. (2017). Analisis Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Debit Sungai Mamasa. *Jurnal Hutan Dan Masyarakat*, *2*(1), 174–187.

NASA POWER. (2024). *Data Curah Hujan dan Suhu Tahun 1990- 2022*. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

Norken, I. N. (2015). Manajemen Subak: Permasalahan dan Upaya Pemecahannya. *Jurnal Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana*, 1–14. https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_penelitian_1_dir/ebc12e5c642223d3f85cfde1df1e553e.pdf

PT Barca Karya Utama. (2024). *INSTALLATION GUIDE GEOMEMBRANE – KOLAM*.

Rejekiningrum, P., & Kartiwa, B. (2022). Kontribusi Pembangunan Infrastruktur Panen Air Terhadap Peningkatan Pendapatan Dan Kesejahteraan Petani. *RISALAH KEBIJAKAN PERTANIAN DAN LINGKUNGAN Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian Dan Lingkungan*, *9*(1), 37–51. https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v9i1.28073

Sari, Y. W., Rahadiyanti, M., & Atmaka, D. R. (2021). Evaluasi Suhu dan Kelembapan Ruang Pengolahan Dan Ruang Distribusi Instalasi Gizi Di Rsud Kabupaten Sidoarjo. *Amerta Nutrition*, *5*(1), 68. https://doi.org/10.20473/amnt.v5i1.2021.68-74

Sulaiman, A. A., Setiawan, B. I., Torang, S., Aquino, H. S. F., Saputro, S. D. F., & Kartiwa, B. (2017). Panen Air Menuai Kesejahteraaan Petani. In *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*.

Wiradnyana, I. G. O. (2018). Analisis Aspek Teknis, Sosial, Lingkungan dan Ekonomi dalam Pemilihan Lokasi Embung Kecil Di Pulau Sabu, Nusa Tenggara Timur (NTT). *Telsimas*, *1*, 22–28.

SISTEM DRAINASE BERKELANJUTAN PADA KOMPLEK PERUMAHAN

Andung Yunianta[1*], Sigit Riswanto[2], dan Mamik Wantoro[3]

[1]Prodi Teknik Sipil, Universitas Yapis Papua, Jl. Dr. Sam Ratulangi No. 11 Dok V Atas Jayapura Papua,*
***e-mail**: andung.ay@gmail.com*
[2] Prodi Teknik Sipil, Universitas Yapis Papua, Jl. Dr. Sam Ratulangi No. 11 Dok V Atas, Jayapura Papua.
e-mail: sigitriswanto2015@gmail.com
[3]Prodi Teknik Sipil, Universitas Yapis Papua, Jl. Dr. Sam Ratulangi No. 11 Dok V Atas, Jayapura Papua.
e-mail: mam_wanto@yahoo.co.id

ABSTRAK

Sistem drainase berkelanjutan merupakan sistem drainase yang terus dikembangkan di Indonesia guna pengelolaan air hujan dan air limpasan yang ada di wilayah perkotaan. Sistem drainase ini diharapkan mampu meningkatkan kualitas air dan pengendalian kuantitas air yang berlebihan. Kota Jayapura merupakan ibukota Propinsi Papua dan kota yang sedang mengalami pertumbuhan menuju kota metropolitan yang ada di kawasan Indonesia Timur. Kawasan perumahan merupakan kawasan yang sedang mengalami pengembangan, sehingga perlu perhatian terkait dengan pengelolaan air limpasan dari air hujan supaya tidak menimbulkan genangan atau bahkan banjir. Metode analisis hidrologi yang digunakan adalah metode rasional guna menentukan intensitas curah hujan dan perhitungan debit banjir yang terjadi. Analisis hidrolika dipakai untuk menentukan dimensi dan kapasitas saluran drainase pada kawasan perumahan di Kota Jayapura. Bentuk sistem drainase berkelanjutan yang dipakai adalah mengumpulkan aliran permukaan pada kawasan perumahan dengan menggunakan sumur resapan sebagai tampunfan akhir. Hasil yang didapatkan adalah menciptakan kondisi perumahan dengan sistem drainase curah hujan yang berwawasan lingkungan.

Kata kunci: Drainase, Berkelanjutan, Perumahan

1. PENDAHULUAN

Sistem drainase berkelanjutan merupakan sistem drainase yang terus dikembangkan di Indonesia guna pengelolaan air hujan dan air limpasan yang ada di wilayah perkotaan. Sistem drainase ini diharapkan mampu meningkatkan kualitas air dan pengendalian kuantitas air yang berlebihan. Kota Jayapura merupakan ibukota Propinsi Papua dan kota yang sedang mengalami pertumbuhan menuju kota metropolitan yang ada di kawasan Indonesia Timur. Kawasan perumahan merupakan kawasan yang sedang mengalami pengembangan, sehingga perlu perhatian terkait dengan pengelolaan air limpasan dari air hujan supaya tidak menimbulkan genangan atau bahkan banjir. Topografi Kota Jayapura yang berbukit sehingga aliran permukaan akibat curah hujan dapat mengakibatkan terjadinya erosi dan membebani daerah di hilir yang merupakan daerah dataran.

Sistem drainase berkelanjutan untuk wilayah perkotaan dipahami sebagai teknik hijau dan solusi desain yang menggunakan proses alami dari aliran permukaan akibat curah hujan, sistem terpadu dalam mengelola limpasan air hujan, langkah-langkah manajemen air hujan dan pengelolaan air pada areal publik, efisiensi dan kemudahan pemeliharaan (European Regional Development Fund, 2013). Filosofi sistem drainase perkotaan berkelanjutan bertujuan mencegah masalah yang timbul akibat aliran permukaan dan aliran limbah akibat pembangunan dengan konsep mengumpulkan, membersihkan, dan menyimpan air sebelum melepaskannya ke lingkungan yang alami. (Robert Bray Associate Ltd, 2013).

Sumur Resapan, untuk meningkatkan resapan air hujan ke dalam tanah pada areal terbuka, lapangan olahraga, tempat parkir, dan pekarangan. Desain sumur resapan ini dibuat agar sedimen dari areal sekitar tidak terbawa masuk kedalam sumur resapan karena dapat menurunkan efektivitas resapan dan meningkatkan biaya pemeliharaannya. Pada sumur resapan dibuat konstruksi bak kontrol sedimen untuk mengendapkan sedimen sebelum air hujan masuk ke dalam sumur. Sumur resapan juga dapat didesain sebagai drainase jalan raya.

Perumahan Kotaraja Grand di Kota Jayapura merupakan kawasan dengan topografi datar dan merupakan wilayah yang sering bermasalah dengan saluran drainase dan kapasitas saluran yang tidak mampu menampung debit limpasan dan menimbulkan genangan atau bahkan banjir. Penerapan sistem drainase yang berkelanjutan (*Sustainable Drainage System*) dengan model resapan dan biorentensi perlu dilakukan untuk mendapatkan peningkatan kuantitas dan kualitas air tanah. Penelitian ini bertujuan menganalisis sistem drainase pada perumahan Kotaraja Grand dan penerapan sistem drainase resapan dan biorentesi untuk peningkatan kuantitas dan kualitas air tanah.

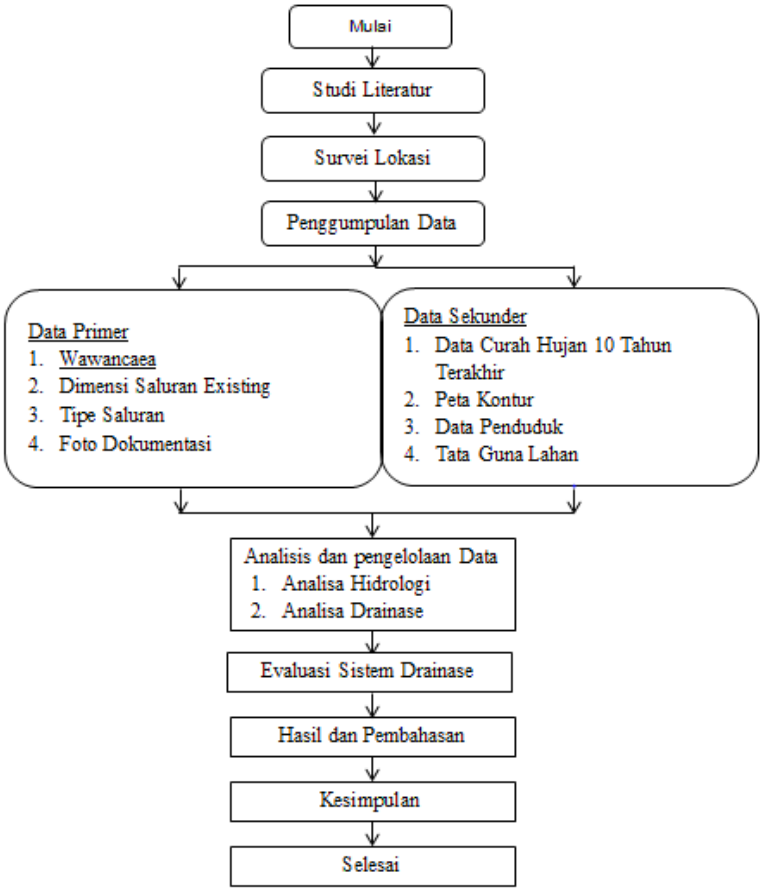
Gambaran umum lokasi perumahan Kotaraja Grand yang ada di Distrik Abepura, Kota Jayapura, Propinsi Papua seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

2. METODOLOGI

Bagan alir dalam penelitian ini menunjukkan lankah-langkah dalam penelitian yang dilakuka mulai dari pengumpulan data, analisis, pembahasa, dan kesimpulan hasil penelitian, terlihat pada Gambar 2. Menurut subarkah (1980) drainase merupakan urairan hidrologi yang memiliki peran penting dalam membuat persiapan saluran irigasi serta perencanaan saluran drainase. aspek hidrologi yang perlu dipelajari adalah Siklus hidrologi merupakan sirkulasi air yang tidak pernah berhenti dari atmofir melalui kondensasi, presipitasi, evaporasi dan transpirasi. Infiltrasi merupakan aliran Air di tanah melalui permukaan tanah (Suripin, 2004). Air permukaan tanah yakni badan air didasar permukaan yang terkonsentrasi oleh sumur, terowongan, sistem drainase atau pompa.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Metode yang dipakai untuk menentukan curah hujan rerata di daerah menggunkan teknik rerata Aljabar ,dipakai dengan memngambil nilai rerata perhitungan penilaian curah hujan di stasiun curah hujan di daerah tersebut :

$$R = \frac{1}{n} x\ (Ra + Rb + Rc + \cdots + Rn)$$

Dimana :

R = tinggi curah hujan rata
RA,Rb,...Rn= tinggi curah hujan pos penekaran 1,2..n
N = banyak pos penakar
Distribusi frekuensi adalah untuk memperoleh distribusi frekuensi yang cocok untuk data yang ada untuk perhitungan curah hujan, analisa frekuensi yang digunakan dapat dilihat dalam tabel sebagai berikut :

Tabel 1 Kriteria Distribusi Frekuensi

Jenis Distribusi	Kriteria		
Normal	Cs	=	0
	Ck	=	3
Log Norma	Cs	=	0
	Ck	>	3(cv)
Gumbel	Cs	=	1.1396
	Ck	=	5.4002
Log person III	Tidak sama dengan distribusi lain, Cs ≠ 0		

Uji Kesesuai distribusi untuk memahami apakah suatu data cocok dengan macam sebaran teoritis yang dipilih, lalu setelah pengambarannya pada probabilitas harus memenuhi percobaan lebih lanjut. percobaan ini dilakukan dengan dua jenis yaitu :

a) data curah hujan maksimum rerata pertahun dikumpulkan dari besar ke kecil
b) hitung probabilitas menggunakan rumus Weibull

$$P = \frac{m}{n+1}$$

Dimana
P : probabilitas (%)
m : nomor urut data dari seri yang telah diurutkan
n : banyaknya data

Uji Chi Kuadrat menurut (Soemarto, 1987) uji ini dipakai unruk mencoba simpangan secara vertical yang ditentukan oleh rumus sebagai berikut :

$$X^2 = \sum \frac{(Oj - Ej)^2}{Ej}$$

Dimana
X^2 : Harga Chi-square
Ej : Frekuensi teorit is kelas j
Oi : frekuensi pengamatan kelas

Uji Smirnov-Kolmogorov dikerjakan dengan mengambarkan peluang dari masing–masing pangkat, suatu distribusi teoritis yang disebut distribusi empiris. dengan Δ_{maks} yang berupa persamaan data ditulis sebagai berikut :

$\Delta_{maks=}P_{e-}\ P_t$
Δ_{maks} = selisih antara peluang empiris dan peluang teoritis
Δ_{Cr}= simpangan Kritis
Pe = Peluang empiris
Pt = peluang teoritis

Intensitas curah hujan ialah ketinggian curah hujan yang terjadi selama waktu air dapat terkonsentrasi. Rumus perhitungan intensitas dari mononobe yaitu :

$$I = \frac{R24}{24} \cdot \left(\frac{T}{tc}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Dimana
I = intensitas hujan rerata dalam T jam (mm/jam)
R24 = curah hujan efektif 1 hari (mm)
Tc = waktu konsentrasi (jam)

Koefisien limpasan merupakan suatu perbedaan antara luas daerah hujan yang membuat sebuah limpasan langsung dengan hujan total yang terjadi.

Dalam hitungan debit banjir rencana (Qr) memakai Metode Rasional dengan rumus sebagai berikut :

Qr = 0.2778 x C x I x A

Dimana
Qr = debit rencana dengan masa ulang T tahun (m^3/det)
C..= koefisien limpasan
I = intensitas daerah pengaliran (mm/jam)

A = Luas daerah pengaliran (Km^2)
Dimana debit banjir limpasan air hujan dalam suatu daerah harus cepat di alirkan supaya tidak menimbukan genang di kawasan tersebut, sehingga dapat menggalirkannya diperlukan saluran yang mampu menapung dan menggalirkan air limpasan agar tidak terjadinya genangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Hidrologi

Data curah hujan untuk penelitian ini dipakai data curah hujan bulanan dari 1 stasiun pencatatan curah hujan dengan kurun waktu 10 tahun terakhir pada tahun 2012 hingga 2021, data tersebut dapat dari stasiun Meteorologi Dok II Jayapura dikarenakan area penelitian ini masuk dalam area curah hujan distasiun Meteorologi Dok II jayapura. Untuk memilih distribusi frekuensi curah hujan maka diperoleh menggunakan berbagai cara analisis distribusi curah hujan. Sesudah mendapatkan hasil data curah hujan rerata maksimum tersebut, maka kemudian data harus diurutkan dari yang terbesar hingga terkecil seperti dalam pada table dibawah ini

Tabel 2 nila rata -rata curah hujan maks

no	curah Hujan
1	82.717
2	81.208
3	78.775
4	78.100
5	71.958
6	67.892
7	65.108
8	61.325
9	54.442
10	50.392

Perhitungan distribusi normal membutuhkan nilai curah hujan rata-rata dan standar deviasi, sesuai dengan Tabel 3.

Tabel 3. Perhitungan Distribusi Normal

No.	X_i	$X_i - \ddot{X}$	$(X_i - \ddot{X})^2$	$(Xi - \ddot{X})^3$	$(Xi - \ddot{X})^4$
1	82.717	13.53	183	2474.069	33461.784
2	81.208	12.02	144	1735.210	20851.440
3	78.775	9.58	92	880.136	8434.637
4	78.100	8.91	79	706.951	6297.756
5	71.958	2.77	8	21.177	58.591
6	67.892	-1.30	2	-2.197	2.856
7	65.108	-4.08	17	-68.084	278.009
8	61.325	-7.87	62	-486.824	3829.684
9	54.442	-14.75	218	-3209.047	47333.441
10	50.392	-18.80	353	-6644.672	124919.834
jumlah	691.92	0.00	1157	-4593.2806	245468.0326
$\ddot{X}$	69.192				
S	11.340				

1. Nilai Rata-rata

$$\ddot{X} = \frac{691.92}{10} = 69.192\ mm$$

2. Menghitung standar Deviasi

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi - \ddot{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1157}{10-1}} = 11.340\ mm$$

3. Menghitung koefisien Variasi (Cv)

$$Cv = \frac{S}{\ddot{X}} = \frac{11.340}{69.192} = 0.163$$

4. Koefisien Skweness

$$Cs = \frac{n.\sum_{i=1}^{n}(Xi - \ddot{X})^3}{(n-1).(n-2).S^3} = \frac{10\ x(-4593.281)}{9\ x\ 8\ x\ 11.340^3}$$

$$Cs = -0.437$$

5. koefisien kurtosis

$$Ck = \frac{n^2.\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{Xi} - \ddot{\mathrm{X}})^4}{(n-1).(n-2)(10-3).S^4}$$

$$\mathrm{Ck} = \frac{10^2\ x\ 245468.03}{9\mathrm{x}8\mathrm{x}7\mathrm{x}\ 11.340^4} = 2.945$$

Dari analisa ketiga besaran statistik diatas tidak mendekati ciri – ciri distribusi pada tabel 4 , maka distribusi yang dapatkan di gunakan adalah distribusi log person III.

Tabel 4. Pemilihan Distribusi Frekuensi Curah Hujan

Jenis Distribusi	Kriteria			hasil perhitungan			Keterangan
Normal	Cs	=	0	Cs	=	-0.437	Tidak memenuhi
	Ck	=	3	Ck	=	2.945	Tidak memenuhi
Log Norma	Cs	=	0	Cs	=	-0.517	Tidak memenuhi
	Ck	.	3(cv)	Ck	.	2.69	Tidak memenuhi
Gumbel	Cs	=	1.1396	Cs	=	-0.437	Tidak memenuhi
	Ck	=	5.4002	Ck	=	2.945	Tidak memenuhi
Log person III	lak sama dengan distribusi lain, Cs ≠			≠	=	-0.65	memenuhi

Untuk perhitungan distribusi Log person III , perlu sebagaian ukuran ialah curah hujan rata-rata (X) , standar deviasi (S), dan nilai kemencengan (Cs) dengan perhitungan sebagai berikut:

Tabel 5. perhitungan distribusi Log nperson III

No	Xi	log Xi	$(Log\,Xi - \overline{Log\,X})^2$	$(Log\,Xi - \overline{Log\,X})^3$	$(\log Xi - \overline{\log X})^4$
1	82.717	1.918	0.00691	0.000574344	0.0000477
2	81.208	1.910	0.00564	0.000424091	0.00003186
3	78.775	1.896	0.00383	0.000237394	0.00001470
4	78.100	1.893	0.00339	0.000196950	0.00001146
5	71.958	1.857	0.00051	0.000011561	0.00000026
6	67.892	1.832	0.00001	-0.000000019	0.00000000
7	65.108	1.814	0.00043	-0.000009042	0.00000019
8	61.325	1.788	0.00219	-0.000102713	0.00000481
9	54.442	1.736	0.00971	-0.000956780	0.00009428
10	50.392	1.702	0.01745	-0.002305763	0.00030462
jumlah log		18.345	0.05008	-0.001929977	0.0005
log rata - rata		1.834			

1. Nilai Rerata curah hujan (log X)

$$\log X = \frac{\sum_{i=1}^{n} logXi}{n} = \frac{18.345}{10}$$

$$= 1.834\ mm$$

2. meghitung Standar Deviasi

$$S\log Xi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\log Xi - \log \ddot{\mathrm{X}})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{0.05008}{10-1}}$$

$$= 0.075 \text{ mm}$$

3. Menghitung Koefisien Variasi (Cv)

$$Cv = \frac{S}{\log Xi} = \frac{0.075}{1.834} = 0.041$$

4. Koefisien Kemencengan (G)

$$G = \frac{10\ x - 0.00193}{9\ x\ 8\ x\ 0.075^3} = -0.65$$

5. Koefisien kurtosis (Ck)

$$Ck = \frac{n^2.\sum_{i=1}^{n}(\log Xi - Log\ \ddot{\mathrm{X}})^4}{(n-1).(n-2)(10-3).S^4}$$

$$= \frac{10^2\ x\ 0.0005}{9\mathrm{x}8\mathrm{x}7\mathrm{x}\ 0.075^4} = 1.706$$

Dimana nilai kemencengan (G) adalah -0,65, sehingga didapatkan nilai K pada tabel untuk periode ulang T bisa dicari menggunakan Hasil interpolasi.

Tabel 6. koefisien G dengan nilai K

no	periode ulang (T)	G	Kt
1	1.01	-0.65	-2.786
2	2	-0.65	0.107
3	3	-0.65	0.86
4	10	-0.65	1.19
5	25	-0.65	1.52
6	50	-0.65	1.69
7	100	-0.65	1.733

Tahap selanjutnya menghitung frekuensi curah hujan dengan rumus Log Pearson III :
Log Xt = Log Xi + Kt . S log X
Log Xt = 10 ^{Xt}

Tabel 7. curah hujan rencana periode ulang distribusi Log Person III

No.	Periode Ulang (Tahun)	Log X	Kt	S Log X	Xt	log Xt
1	2	1.834	0.107	0.075	1.842	69.569
2	5	1.834	0.857	0.075	1.898	79.137
3	10	1.834	1.192	0.075	1.923	83.831
4	25	1.834	1.519	0.075	1.948	88.669
5	50	1.834	1.694	0.075	1.961	91.376
6	100	1.834	1.846	0.075	1.972	93.800

(sumber : perhitungan)
untuk hitungan pada periode ulang 2 tahun sebagai berikut :

$$Xt = \log Xi + \text{Kt x S}\log Xi$$

Xt = 1.834+(0.107x 0.075)
Xt = 1.842
Untuk Log Xt yaitu
Log Xt = 10^{Xt}
Log Xt = 10 $^{1.842}$
Log Xt = 69.572
Uji kecocokan Frekuensi
Untuk menguji Chi kuadrat di dapatkan jumlah Data (n) = 10 dan untuk tingat kesalahan di ambil nilai sebesar 5%

$$X^i = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Oi - Ei)^2}{Ei}$$

1. perhitungan jumlah kelas (k)

K = 3.3 log (n)
K = 3.3ilogi(10)
K = 4.3 atau 4

2. Menghitung Dk (derajat kebebasan)

$Dk = K - (p + 1)$
$Dk = 4 - (2 + 1)$
$Dk = 1$

3. Menghitung jumlah nilai Teoritis (Ei)

$$Ei = \frac{n}{K}$$

$$Ei = \frac{10}{4} = 2.5$$

4. Menetukan lebar kelas interval dengan rumus

$$\Delta X = \frac{X_{max} - X_{min}}{k - 1}$$

$$\Delta X = \frac{82.7\ x\ 50.4}{4 - 1} = 10.775$$

5. $X_{awal} = X_{min} - \frac{1}{2}\ \Delta X$

$X_{awal} = 50.4 - \frac{1}{2}\ 10.755 = 45.004$

Tabel 8. Nilai Chi Kuadrat pada distribusi log person III

Jumlah kelas	nilai batas tiap kelas			Oi	Ei	(Oi - Ei)^2	(Oi - Ei)^2/Ei
1	49.98	<	58.90	2	2.5	0.25	0.1
2	58.90	<	67.83	2	2.5	0.25	0.1
3	67.83	<	76.75	2	2.5	0.25	0.1
4	58.90	<	85.67	4	2.5	2.25	0.9
jumlah				10	10.0	X^2h =	1.2

(sumber : perhitungan)

Hasil perhitungan di dapatkan uji chi-kuadrat didapatkan sebesar 1.2 , sedangkan nilai chi kuadrat table (α)= 5% dengan nilai (DK) = 1 adalah 3.841 (Tabel Chi kuadrat). sehingga X^2h yang di dapatkan dalam perhitungan Tabel yaitu 1.2 < 3.841 maka pengujian distribusi kesesuaian log person II di terima.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Uji Smirniv-Kolmogorov

No	Xi	urutan Max - Min	P (Xi)	f (t)	Luas Grafik Tabel Z	P' (xi)	ΔP
1	54.4	82.7	0.09	1.19	0.88	0.117	0.026
2	82.7	81.2	0.18	1.06	0.86	0.145	0.037
3	81.2	78.8	0.27	0.85	0.80	0.198	0.075
4	67.9	78.1	0.36	0.79	0.79	0.215	0.149
5	78.1	72.0	0.45	0.24	0.59	0.405	0.049
6	61.3	67.9	0.55	-0.11	0.46	0.544	0.002
7	78.8	65.1	0.64	-0.36	0.36	0.641	0.004
8	72.0	61.3	0.73	-0.69	0.25	0.746	0.019
9	50.4	54.4	0.82	-1.30	0.09	0.913	0.095
10	65.1	50.4	0.91	-1.66	0.05	0.952	0.042
jumlah		691.92	5.0				
Xtr		69.19	0.5				
S		11.340	0.275				
Max ΔP		0.149					

Dari hasil perhitungan di dapatkan nilai ΔP kritis hasil perhitungan Yaitu : 0.149 . untuk nilai n = 10, α=5% dan dari table Kritis Smirnov-Kolmogov di dapatkan Nilai = 0.41. jadi ΔP max (0.149) < ΔP kritis sebesar 0.41,sehingga nilai ΔPmax nya lebih rendah dari ΔP kritis sehingga distbusi yang di gunakan dapat di terima.

Untuk menganalisis waktu konsentrasi dan intensitas hujan, maka dihitung dengan menggunakan rumus Mononobe yaitu:

$$I = \frac{R_{24}}{24}\ x\ \left(\frac{24}{tc}\right)^{2/3}$$

Dimana

I = Intensitas Curah Hujan (mm)

R_{24} = Curah Hujan Maksimum dalam 1 hari

t_c = Lama curah hujan (jam)

Tabel 10. Intensitas Curah Hujan Disttribusi Log Person III

periode ulang	intensitas (mm) 24 jam
2	69.569
5	79.137
10	83.831
25	88.669
50	91.376
100	93.800

Contoh perhitungan Intensitas Curah Hujan Rumus Mononobe dengan R24 = 69.192 dan untuk nilai tc =30 menit (0.5 jam),1 jam dan 24 jam Untuk perhitungannya sebagai berikut :

1. jangka waku 30 menit (0.5 jam)

$$I = \frac{69.569}{24}\ x\ \left(\frac{24}{0.5}\right)^{2/3} = 0.22\ mm/jam$$

2. Jangka waktu 1 jam

$$I = \frac{69.569}{24}\ x\ \left(\frac{24}{1}\right)^{2/3} = 0.34\ mm/jam$$

3. Jangka waktu 24 jam

$$I = \frac{69.569}{24}\ x\ \left(\frac{24}{124}\right)^{2/3} = 2.90 mm/jam$$

Tabel 11 Hasil Perhitungan Intensitas Hujan dengan Periode Ulang Tertentu

no	Periode Ulang	Imtensitas Hujan (mm)	Waktu Jam						Satuan
			0.5	1	4	8	16	24	
1	2	69.569	0.217	0.345	0.873	1.388	2.209	2.899	mm^3/jam
2	5	79.137	0.246	0.392	0.993	1.579	2.513	3.297	mm^3/jam
3	10	83.831	0.261	0.415	1.052	1.673	2.662	3.493	mm^3/jam
4	25	88.669	0.276	0.439	1.112	1.770	2.816	3.695	mm^3/jam
5	50	91.376	0.285	0.453	1.146	1.824	2.902	3.807	mm^3/jam
6	100	93.800	0.292	0.465	1.177	1.872	2.979	3.908	mm^3/jam

Perhitungan debit banjir rencana di dapatkan Luas Daerah Perimahan Kotaraja Grand yaitu 73749.609 m^2 dimana Nilai Koefisien Limpasan Yaitu 0.75.

Untuk menghitung debit banjir rencana (Qr) diaman menggunakan metode rasional dan memakai kala ulang 5 tahun terakhir.

$$Qr = \frac{1}{3.6}\ x\ C\ x\ I\ x\ A$$

Di ketahui

Luas Daerah (A) aliran = 0.0737 Km^2

Koefisien Limpasan = 0.75

Intensitas hujan periode ulang 5

Rumus Van Been $= \frac{90\%\ x\ Xtr}{4}$

Contoh untuk Perhitungan Intensitas Periode ulang 5 tahun menggunakan Rumus Van Been :

$$\frac{90\%\ x\ Xtr}{4} = \frac{90\%\ x\ 78.718}{4}$$

$$= 17.711\ mm/jam$$

Di Tanya nilai Qr untuk Periode Kala ulang 5 ?

$$Qr = \frac{1}{3.6}\ x\ 0.75\ x\ 17.711\ x\ 0.0737\ Km^2$$

Qr = 0.272 m^3/det

Dimana

Qr = debit limpasan Maksimum (m^3/det)

C = koefisien limpasan

I = intensitas curah hujan (mm/det)

A = luas daerah tangkapan hujan (km^2)

Penampang drainase yang ada di catchment area perumahan kotaraja grand mempunyai bentuk saluran dengan penampang segiempat. Dengan kedalaman (h) 0.40 m, lebar (b) 0.45m dan kemiringan 0.005.

Di ketahui saluran Drainase pada perumahan Kotaraja grand yaitu

Kedalaman saluran (h) = 0.40 m

Lebar Saluran (b) = 0.47 m

Kemiringan (So) = 0.005

Kekasaran manningn (n) =0.014

Di Tanya nilai Qs……?

1. luas penampang Basah

   A = b x h

   A = $0.40\ m\ x\ 0.47\ m$

   $A = 0.188\ m^2$

2. keliling penampang basah

   $p = b + 2h$

   p = 0.47 m + 2x0.40 m

   $P = 1.27\ m^2$

3. jari-jari hidraulik

   $$R = \frac{A}{P}$$

   $$R = \frac{0.188}{1.27} = 0.15\ m$$

4. kecepatan Aliran

   $$V = K\ x\ R^{\frac{2}{3}}\ x\ So^{\frac{1}{2}}$$

   $$V = \frac{1}{0.014}\ x\ 0.15^{\frac{2}{3}}\ x\ 0.005^{\frac{1}{2}}$$

   $$V = 71.249\ x\ 0.280\ x\ 0.071$$

$$V = 1.413\ m\ /\ det$$

5. Debit aliran Saluran (Qs)

$$Qs = A\ x\ V$$
$$Qs = 0.188\ x\ 1.413$$
$$Qs = 0.2657\ m^3/det$$

Evaluasi saluran drainase yaitu perbaikan penampang saluran di lakukan untuk mencegah terjadinya genangan akibat saluran yang tidak mampu menampung debit yang mengalir. Dalam Evaluasi dimensi saluran draianse, penulis dapat memberikan beberapa pilihan yang di ambil setelah dapat dilihat dilapangan, dimensi saluran di perbesar namun tipe saluran di rencanakan ulang. Bentuk penampang Saluran Terbuka = Segiempat ,Debit Rencana (Q) = 0.272 m^3/det, Kekasaran manning (n) = 0.016 (Beton : halus, sambung baik dan rata) , Kemiringan = 0.005.

Sehingga:

Luas Penmpang basah (A) = B x H

Keliling Penampanh (P) = B + 2H

Jari-jari Hidraulik (R) = $\frac{A}{P} = \frac{B\ x\ H}{B+2\ x\ H}$

Dengan menggunakan Rumus Manning maka :

Q = A x V

$Q = B\ x\ H\ x\ \frac{1}{n}\ x\ R^{2/3}\ x\ S^{1/2}$

Dengan Q = 0.272 m^3/det, n = 0.014 dan S_o = 0.005

$$0.272 = B\ x\ H\ x\ \frac{1}{0.016}\ x\ \left(\frac{H}{2}\right)^{2/3}\ x\ (0.005)^{1/2}$$

H = 0.42 m

Untuk mencari nilai B dari rumus debit

$V = \frac{1}{n}\ x\ R^{2/3}\ x\ S^{1/2}$

$V = \frac{1}{0.016}\ x\ \left(\frac{0.43}{2}\right)^{2/3}\ x\ (0.005)^{1/2}$

V = 1.561 m/det

Q = A x V

0.272 = (B x 0.42 m) x 1.561 m/det

B x 0.42 = $\frac{0.272}{1.561} = 0.174$

B = $\frac{0.174}{0.42} = 0.42\ m$

Menghitung tinggi jangaan

$W = \sqrt{0.5\ x\ H}$

W = 0.707 x H

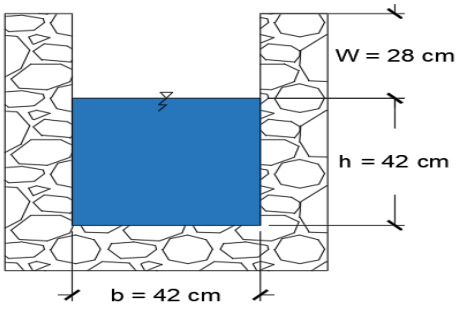
W = 0.707 x 0.40

W = 0.28 m

Debit aliran Qs

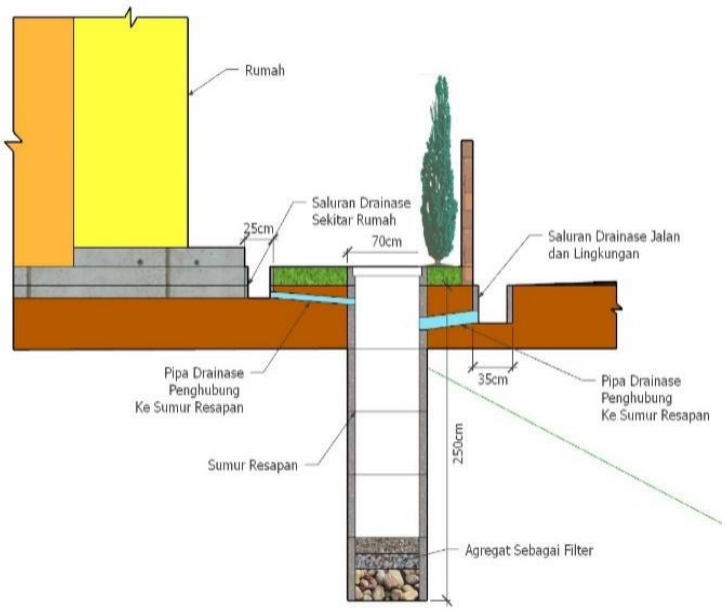
A x V = 0.1764 x 1.561 = 0.28 m^3/det

Dari hasil perhitungan evaluasi sistem saluran drainase dimana didapatkan nilai hasil debit aliran (Qs) saluran drainase sebesar 0.28 m^3/det , untuk debit rencana (Qs) 0.27 m^3/det sehingga evalusi dimensi saluran bisa menmapung debit rencana agar tidak terjadinya genangan pada sistem saluran drainase kawasan perumahan kotaraja grand.



Gambar 2. Tampang saluran Drainase

Sistem drainase berkelanjutan yang diterapkan pada perumahan di Kota Jayapura ini menggunakan sistem sumur resapan sebagai tempungan akhir. Dengan demikian semua aliran permukaan yang terjadi pada kawasan perumahan ini terkumpul pada sumur resapan. Pembuatan sumur resapan ditempatkan di halaman rumah pada setiap rumah. Penempatan sumur resapan terlihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3: Penempatan Sumur Resapan

4. KESIMPULAN

Kawasan perumahan yang merupakan kawasan tempat tinggal yang sangat penting bagi kehidupan manusia sehingga perlu diciptakan hunian yang nyaman untuk tinggal dan bebas dari genangan air akibat aliran permukaan dari curah hujan. Sistem drainase yang cocok ditempatkan pada perumahan adalah sistem drainase yang berkelanjutan dengan penempatan sumur resapan sebagai tampungan air, dan peningkatan kuantitas air tanah.

DAFTAR PUSTAKA

Abi Aad, M. P., Suidan, M. T., & Shuster, W. D. (2010). Modeling techniques of best management practices: Rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of Hydrologic Engineering*, *15*(6), 434–443. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000136

Bisht, D. S., Chatterjee, C., Kalakoti, S., Upadhyay, P., Sahoo, M., & Panda, A. (2016). Modeling urban floods and drainage using SWMM and MIKE URBAN: a case study. *Natural Hazards*, *84*(2), 749–776. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2455-1

Carbone, M., Brunetti, G., & Piro, P. (2014). *Hydrological Performance of a Permeable Pavement in Mediterranean Climate*. (June). https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B31/S12.050

Golio, M. (2001). SUDS For Roads. *Engineering*, *20001220*, 1347. https://doi.org/10.1201/9781420036763

Guo, J. C. Y. (2009). Preservation Of Watershed Regime For Low Impact Development. *Hydrologic Engineering*, (January), 1–8.

Guo, R., & Guo, Y. (2018). Analytical Equations for Use in the Planning of Infiltration Facilities. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, *4*(2), 1–10. https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000849.

Hein, D. K., Swan, D. ., & Schaus, L. (2010). Structural and Hydrological Design of Permeable Pavement. *Conference of The Transportation Association of Canada*.

Hendratta, L. A. (2014). Optimalisasi Sistem Jaringan Drainase Jalan Raya Sebagai Alternatif Penanganan Masalah Genangan Air. *Tekno Sipil*, *12*(61), 9–24.

Kanso, T., Tedoldi, D., Gromaire, M. C., Ramier, D., Saad, M., & Chebbo, G. (2018). Horizontal and vertical variability of soil hydraulic properties in roadside sustainable drainage systems (SuDS)-nature and implications for hydrological performance evaluation. *Water (Switzerland)*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/w10080987

Miguez, M. G., Bahiense, J. M., Rezende, O. M., & Veról, A. P. (2012). *New urban developments: flood control and LID—a sustainable approach for urban drainage systems*. *155*, 469–480. https://doi.org/10.2495/SC120391

Miguez, M. G., Bahiense, J. M., Rezende, O. M., & Veról, A. P. (2014). Sustainable urban drainage approach, focusing on lid techniques, applied to the design of new housing subdivisions in the context of a growing city. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, *9*(4), 538–552. https://doi.org/10.2495/SDP-V9-N4-538-552

Mrowiec, M. (2016). Road Runoff Management Using Improved Infiltration Ponds. *Transportation*

Research Procedia, *14*, 2659–2667. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.435
Owuama, C. O. (2014). Sustainable Drainage System for Road Networking. *International Journal of Innovation, Management and Technology*, *5*(2). https://doi.org/10.7763/ijimt.2014.v5.491
Parkinson, J., & Mark, O. (2005). *Urban Stormwater Management in Developing Countries* (p. 240). p. 240.
Rizzo, A., Bresciani, R., Masi, F., Boano, F., Revelli, R., & Ridolfi, L. (2018). Flood reduction as an ecosystem service of constructed wetlands for combined sewer overflow. *Journal of Hydrology*, *560*, 150–159. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.020
Rossman, L. A. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*.
Rudiono, J. (2018). Priority Scale of Drainage Rehabilitation of Cilacap City. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *333*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/333/1/012111
Smith, D. R. (2006). *Permeable Interlocking Concrete Pavement*.
Wang, J., Forman, B. A., & Davis, A. P. (2018). Probabilistic stormwater runoffand water quality modeling of a highway in suburban Maryland. *Journal of Hydrologic Engineering*, *23*(2), 1–12. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001600
Yunianta, A., Suripin, & Setiadji, B. H. (2018). Sustainable Road Drainage System : Experimental Model. *Matec Web of Conferences*.
Yunianta, A., Suripin, & Setiadji, B. H. (2019). *Design of Sustainable Road Drainage System Model*. *1*(1), 35–45. https://doi.org/10.35793/jseps.v1i1.5
Zhou, Q. (2014). A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. *Water*, *6*(4), 976–992. https://doi.org/10.3390/w6040976

STABILITAS BENDUNGAN INTI ASPAL TERHADAP BEBAN GEMPA DASAR OPERASI *(OPERATING BASIS EARTHQUAKE)*

Andrea Z. Galla[1*], Denik Sri Krisnayanti[2] dan Tri M. W. Sir[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto - Penfui, Kupang*
***e-mail**: gradsza@gmail.com*

ABSTRAK

Bendungan adalah infrastruktur penting untuk pengelolaan sumber daya air yang mendukung pertumbuhan ekonomi, penyediaan air irigasi, PLTA, dan pengendalian banjir. Bendungan Manikin, yang dalam proses pembangunan di Kabupaten Kupang, dirancang sebagai bendungan urugan batu dengan tipe zonal inti tegak. Bendungan ini menggunakan material aspal pada zona inti yang baik untuk kondisi tanah tidak stabil dan daerah rawan gempa. Tujuan penelitian untuk mengetahui kinerja Bendungan Manikin dengan desain inti aspal terhadap beban gempa dasar operasi (*Operating Basis Earthquake)* pada berbagai rasio kedalaman tubuh bendungan. Analisis numerik untuk menilai respons bendungan terhadap tekanan gempa, menggunakan aplikasi Geostudio 2018 dengan simulasi stabilitas dengan tambahan beban gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa Bendungan Manikin dengan desain inti aspal memenuhi faktor keamanan minimum (FKmin = 1,2) pada kondisi selesai konstruksi, muka air banjir (MAB), muka air normal (MAN), dan muka air minimum (MAM). Dengan demikian, Bendungan Manikin memiliki ketahanan yang baik terhadap beban gempa dasar operasi (OBE).

Kata kunci: Stabilitas, Bendungan, Inti aspal, Gempa, OBE

1. PENDAHULUAN

Dalam konteks tantangan dan peluang pembangunan berkelanjutan menuju Indonesia Emas 2045, pembangunan bendungan menawarkan prospek besar untuk mencapai tujuan masa depan bangsa. Bendungan berpotensi untuk meningkatkan ketahanan energi dan pangan, mendorong pembangunan ekonomi inklusif, mengendalikan debit banjir, menjamin pasokan air keperluan irigasi, dan memenuhi kebutuhan energi melalui pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Bendungan Manikin merupakan salah satu bendungan yang sedang dalam proses konstruksi, terletak di Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang. Bendungan ini didesain sebagai bendungan urugan batu dengan tipe zonal inti tegak. Struktur tubuh bendungan dibagi menjadi beberapa zona, yaitu zona kedap air, transisi, dan lolos air (Sosrodarsono & Takeda, 1977). Zona kedap air tegak di dalam tubuh bendungan dan memiliki peranan penting dalam menjaga fungsi dan keamanan bendungan.

Material yang digunakan pada zona kedap air adalah aspal. Inti aspal menawarkan fleksibilitas material yang menyesuaikan dengan pergerakan tanah dan tekanan air, serta menahan deformasi tanpa mengalami keretakan signifikan. Bendungan inti aspal menjadi pilihan menarik, terutama di daerah dengan kondisi tanah tidak stabil. Material inti aspal lebih efektif karena konstruksinya tidak terlalu dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Selain itu, inti aspal tidak larut dalam air, lebih ramah lingkungan, dan sangat cocok untuk daerah rawan gempa karena fleksibilitasnya yang tinggi (Wandira, 2022). Namun, kekuatan dan stabilitas bendungan ini terhadap beban gempa tetap menjadi perhatian utama. Daerah rawan gempa membutuhkan desain bendungan yang mampu menahan getaran dan pergeseran tanah akibat aktivitas seismik.

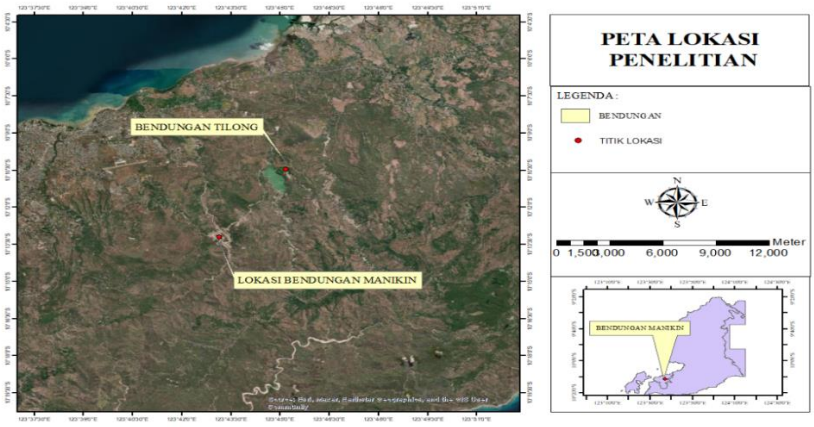
Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap tubuh Bendungan Manikin memerlukan yang menyatakan seberapa stabil kondisi bendungan tersebut dengan material penyusun maupun pembebanan yang diberikan. Beberapa penelitian mengenai stabilitas tubuh bendungan telah dilakukan. (Bayisa, 2019) membandingkan performa bendungan inti aspal dan inti lempung. Bendungan inti aspal memberikan keamanan yang lebih baik, pengendalian rembesan yang efektif, dan memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan inti lempung. Penelitian terhadap Bendungan Semantok yang mengevaluasi stabilitas tubuh bendungan dengan beban gempa memberikan hasil yang berada dalam batas aman (Pratama dkk., 2021). (Saidillah & Artati, 2022) menyoroti stabilitas Bendungan Saradan tentang pentingnya pemantauan berkelanjutan dan potensi penguatan bendungan, terutama di bawah kondisi gempa

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja Bendungan Manikin dalam proses pengerjaan terhadap beban gempa dasar operasi. Analisis ini dilakukan untuk memahami perilaku bendungan saat terkena gempa dan mengidentifikasi potensi kelemahan yang perlu diperbaiki dalam desain dan konstruksi mendatang. Aplikasi Geostudio digunakan untuk menganalisis stabilitas bendungan inti aspal dalam kondisi gempa.

2. METODOLOGI STUDI

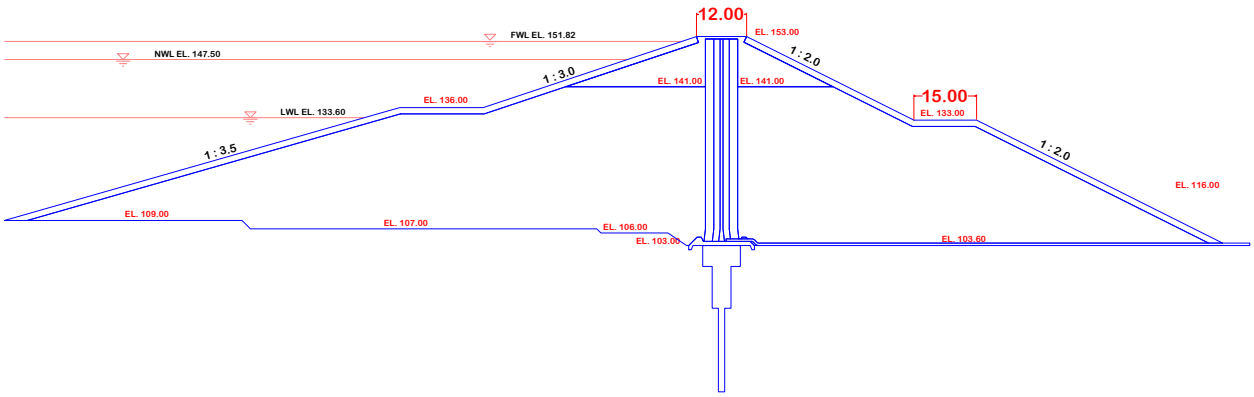
Lokasi studi dan Pengumpulan Data

Lokasi penelitian adalah Bendungan Manikin yang terletak di Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Letak geografisnya berada pada 10° 12’ 46” Lintang Selatan dan 123° 43’ 04” Bujur Timur. Peta lokasi Bendungan Manikin pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Bendungan Manikin

Data penelitian meliputi:
1) Peta gempa Indonesia tahun 2017 dari Buku Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 oleh Pusat Studi Gempa Nasional.
2) Data teknis bendungan dari Laporan Spesifikasi Teknis Bendungan Manikin Tahun 2023.
3) Data parameter material timbunan dari Laporan Geologi Bendungan Manikin Tahun 2024.



Gambar 2. Potongan Melintang Bendungan Manikin
Sumber: Konsultan Supervisi, 2024

Stabilitas bendungan

Stabilitas bendungan mencakup kemampuan bendungan untuk menahan gaya geser dan kerusakan struktural akibat tekanan internal dan eksternal, seperti beban air, aktivitas seismik, dan kondisi tanah (Chayati dkk., 2023). Hasil stabilitas (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017) berupa sebuah faktor keamanan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$FK = \frac{\text{Kuat geser (shear strength)}}{\text{Tegangan geser (shear stress)}} = \frac{s}{\tau} \quad (1)$$

Keterangan:
FK = faktor keamanan
s = kuat geser
τ = tegangan geser

Penentuan parameter kuat geser dalam analisis stabilitas bendungan akan mempengaruhi kekuatan bidang gelincir (Chakraborty, 2018). Kuat geser menentukan kemampuan material untuk menahan beban tanpa mengalami keruntuhan akibat geseran. Parameter kuat geser ini terdiri atas kohesi (c) dan sudut geser (ϕ). Sedangkan, parameter

berat volume digunakan untuk memperkirakan kemampuan material dalam menahan tekanan dan geser tanpa mengalami keruntuhan. Semakin tinggi berat volume, semakin stabil struktur bendungan (Kamiruddin dkk., 2022).

Penentuan beban gempa

Dalam konteks stabilitas, gempa dasar operasi *(operating basis earthquake*) diharapkan bendungan tetap berfungsi dengan baik dan dapat diperbaiki dengan mudah jika terjadi gempa. Namun, perhitungan ini tidak mempertimbangkan aspek keamanan terhadap kehidupan manusia (Pd t-14-2004-A, 2004). Periode gempa yang dianalisis bergantung pada kelas resiko bendungan (PUSLITBANG SDA, 2014) dan besarnya percepatan batuan dasar (S_{PGA}) diperoleh dari Peta Gempa 2017. Koefisien beban gempa ditentukan dengan metode nilai percepatan gempa maksimum terkoreksi *(peak ground acceleration, PGA).* Persamaan untuk mencari koefisien gempa dasar (Kh) sebagai berikut.

$$K_h = \frac{PGA_M}{g} \quad (2)$$

$$PGA_M = S_{PGA} \times F_{PGA} \quad (3)$$

$$K_o = \alpha_2 \times K_h \quad (4)$$

Keterangan:
PGA_M = percepatan puncak di permukaan tanah
Kh = koefisien gempa dasar
S_{PGA} = percepatan kejut dasar (cm/detik²)
F_{PGA} = faktor amplikasi
g = percepatan gravitasi (980,665 cm/detik²)
K_o = koefisien gempa desain terkoreksi di permukaan tanah
α_2 = koreksi pengaruh jenis struktur, untuk bendungan tipe urugan = 0,5.

Metode Bishop

Metode Bishop mengasumsikan bahwa gaya-gaya yang bekerja pada irisan memiliki resultan nol dalam arah vertikal. Metode ini memiliki beberapa asumsi, di antaranya:
1) Keruntuhan dianggap sebagai gerakan rotasi tanah berbentuk lingkaran.
2) Nilai gaya horizontal pada kedua sisi diabaikan, metode Bishop tidak memenuhi syarat keseimbangan gaya *(force equilibrium)* dan hanya memenuhi syarat keseimbangan momen (*moment equilibrium)*.
3) Gaya normal diperoleh dengan menjumlahkan gaya-gaya arah vertikal dan bekerja di tengah bidang irisan.

Perhitungan stabilitas dengan metode Bishop (United States Army Corps of Engineers, 2003) sebagai berikut:
Kondisi selesai konstruksi, faktor keamanan dapat dihitung dengan persamaan berikut (Johari dkk., 2015).

$$FK = \frac{\sum\left(\frac{cb + W\tan\phi}{m_\alpha}\right)}{\sum W\sin\alpha + \left(\frac{\sum K_h W d_i}{R}\right)} \quad (5)$$

Kondisi terisi air, material mengalami perubahan volume dan tekanan air pori yang mempengaruhi tegangan geser material sehingga faktor keamanan dapat dihitung dengan persamaan berikut (Wright & Brandon, 2014).

$$FK = \frac{\sum\left(\frac{cb + (W + P\cos\beta - ub)\tan\phi}{m_\alpha}\right)}{\sum W\sin\alpha + \left(\frac{\sum K_h W d_i}{R}\right) - \left(\frac{1}{R}\sum Mp\right)} \quad (8)$$

dengan:
FK = faktor keamanan
c = kohesi (kN/m²)
b = lebar tiap pias (m)
W = berat pias (kN)
u = tekanan air pori (kN/m²)
ϕ = sudut geser material timbunan
$m\alpha$ = hasil coba – coba dari nilai FK
α = sudut yang dibentuk jari – jari bidang longsor (°)
Mp = momen akibat beban permukaan/ air (kNm)
Kh = koefisien gempa
di = jarak vertikal titik pusat bidang longsor terhadapa titik pusat irisan
R = jari – jari bidang longsor

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Koefisien beban gempa

Bendungan Manikin yang tergolong dalam kelas III (tinggi) dengan faktor resiko total 30 menggunakan gempa dengan periode ulang 100 tahun. Nilai percepatan batuan dasar (S_{PGA}) dari Peta Gempa 2017.

Tabel 1. Koefisien gempa OBE periode ulang 100 tahun

Periode Ulang T (Tahun)	S_{PGA}	F_{PGA}	PGA_M	Ko	Kh	K pada Y/H			
						0,25	0,50	0,75	1,00
100	0,175	1,200	0,210	0,105	0,210	0,214	0,179	0,163	0,147

Gempa OBE dirancang untuk mempertimbangkan gempa yang terjadi selama operasi bendungan tanpa menyebabkan kerusakan yang signifikan. Tabel 1 koefisien gempa horizontal (kh) sebesar 0,210 menyatakan dua puluh satu persen berat struktur bendungan bertindak sebagai gaya horizontal yang mendorong tubuh bendungan. Semakin tinggi koefisien gempa horizontal semakin besar gaya horizontal yang ditanggung oleh stabilitas struktur bendungan. Selanjutnya, hasil perhitungan koefisien gempa pada rasio kedalaman 0,25 hingga 1,00 Y/H. Koefisien gempa pada rasio 0,25 Y/H lebih besar dibandingkan dengan rasio 1,00 Y/H menunjukkan bahwa semakin tinggi suatu tempat maka semakin besar percepatan gempa yang dirasakan.

Stabilitas tubuh bendungan dengan Geostudio SLOPE/W 2018

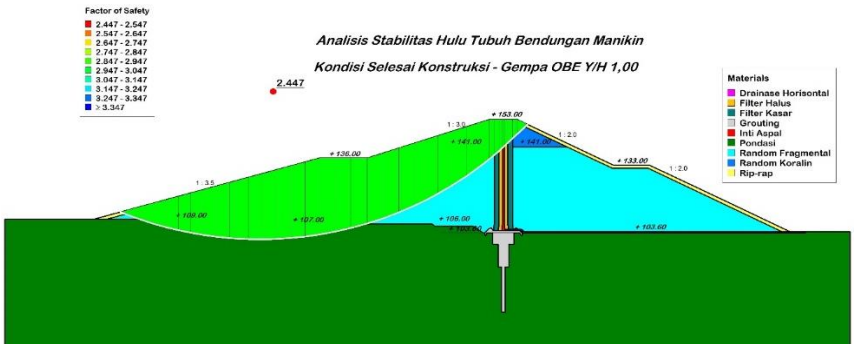
Data dalam SLOPE/W meliputi geometri bendungan, parameter material timbunan, dan koefisien gempa. Parameter material timbunan Bendungan Manikin pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter material Bendungan Manikin

Zona	Material	γ (kN/m³)	γsat (kN/m³)	C (kPa)	ϕ (°)
1	Aspal	23,408	23,408	423,650	24,580
2	Filter Halus	22,163	24,566	154,161	36,000
3	Filter Kasar	22,065	27,145	252,129	38,670
4	Fragmental	16,308	19,829	166,713	36,000
5	Koralin	16,308	19,829	147,100	40,000
6	Rip - Rap	16,308	19,829	0,000	45,440
7	Pondasi	17,485	20,800	4,609	27,670

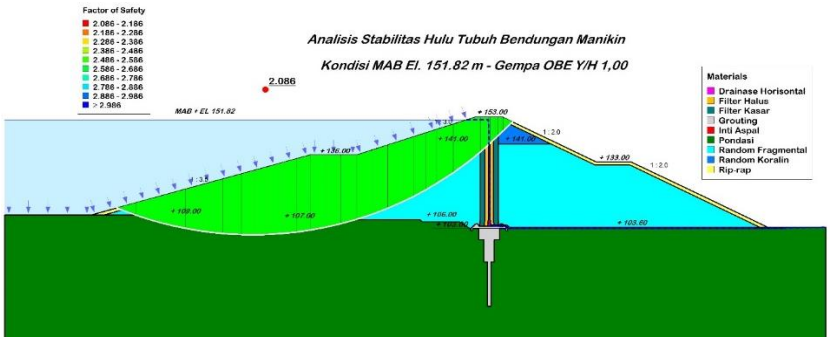
Sumber: Konsultan Supervisi, 2024.

Analisis stabilitas pada kondisi selesai konstruksi, muka air normal (MAN), muka air banjir (MAB), dan muka air minimum (MAM) dengan SLOPE/W diperoleh angka keamanan dan bidang longsor di hulu dan hilir bendungan. Hasil angka keamanan yang diperoleh dibandingkan dengan faktor keamanan minimum (FKmin).



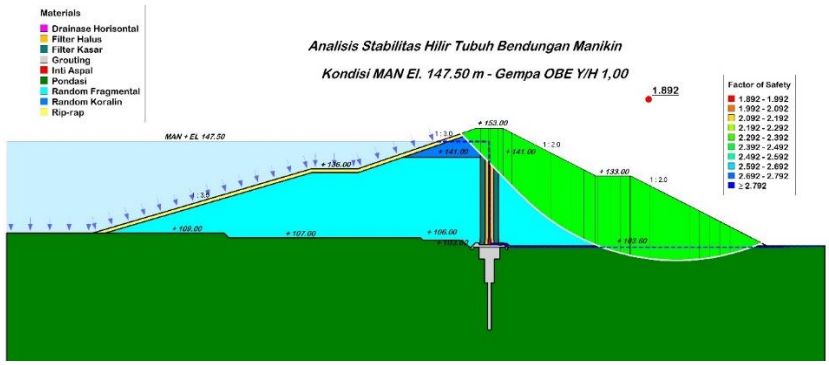
Gambar 3. *Output* Geostudio kondisi selesai konstruksi di hulu bendungan

Gambar 3 menampilkan bidang gelincir kritis pada kondisi selesai konstruksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan (FK) pada kondisi selesai konstruksi bagian hulu bendungan mencapai angka keamanan 2,447. Ini menunjukkan bahwa bendungan memiliki tingkat stabilitas yang cukup.



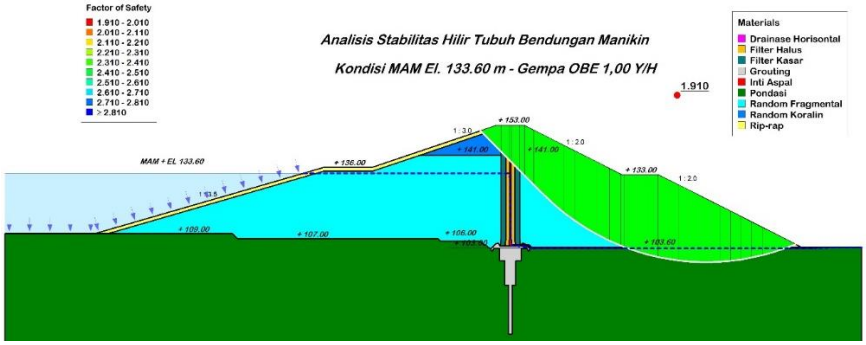
Gambar 4. *Output* Geostudio kondisi muka air banjir di hulu bendungan

Gambar 4 menampilkan bidang gelincir kritis pada kondisi muka air banjir (MAB). Hasil analisis menunjukkan FK pada kondisi muka air banjir bagian hulu bendungan mencapai angka keamanan 2,068. Angka keamanan menurun dibandingkan pada kondisi selesai konstruksi. Ini disebabkan terdapat tekanan hidrostatis pada hulu tubuh bendungan selama kondisi banjir.



Gambar 5. *Output* Geostudio kondisi muka air normal di hilir bendungan

Gambar 5 memperlihatkan bidang potensi kegagalan di hilir bendungan untuk kondisi muka air normal (MAN) elevasi + 147,50 m. Hasil analisis menunjukkan FK pada kondisi muka air normal mencapai angka keamanan 1,892.



Gambar 6. *Output* Geostudio kondisi muka air minimum di hilir bendungan

Gambar 6 memperlihatkan bidang potensi kegagalan di hilir bendungan untuk kondisi muka air minimum (MAM) elevasi + 133,60 m. Hasil analisis menunjukkan FK pada kondisi muka air minimum mencapai angka keamanan 1,910. Pada kondisi ini, tekanan air pori menurun, gaya geser menurun, dan stabilitas tubuh bendungan meningkat.

Tabel 3. Rekapitulasi angka keamanan tubuh Bendungan Manikin

Kondisi	Gempa OBE (100 tahun)				FK
	0,25 Y/H	0,50 Y/H	0,75 Y/H	1,00 Y/H	

		K = 0,214	K = 0,179	K = 0,163	K = 0,147	Minimum
Selesai Konstruksi	Hulu	4,780	4,093	2,707	2,447	1,200
	Hilir	4,556	3,679	3,151	1,977	1,200
Muka Air Banjir (MAB) El, +151,82 m	Hulu	4,715	3,774	2,342	2,086	1,200
	Hilir	4,144	3,514	3,048	1,869	1,200
Muka Air Normal (MAN) El, +147,50 m	Hulu	4,315	3,639	2,286	2,040	1,200
	Hilir	4,416	3,619	3,105	1,892	1,200
Muka Air Minimum (MAM) El, +133,60 m	Hulu	4,780	3,438	2,212	1,977	1,200
	Hilir	4,556	3,679	3,151	1,910	1,200

Tabel 3 menunjukkan bahwa bendungan dengan inti aspal memenuhi persyaratan keamanan dalam berbagai kondisi muka air dan rasio kedalaman gempa. Pada kondisi setelah konstruksi FK lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi muka air normal, banjir, dan minimum. Pada kondisi ini bendungan dalam tahap awal pengoperasian dan tekanan air pori belum stabil.

Pada kondisi terisi air FK muka air banjir (MAB) lebih rendah karena tekanan air pori yang lebih tinggi. Pada muka air normal (MAN) FK memenuhi batas minimum, sehingga bendungan aman pada kondisi operasi normal. Begitupula pada kondisi muka air minimum (MAM), FK memenuhi standar minimum yang menjamin bendungan tetap stabil dalam kondisi permukaan air sangat rendah.

4. KESIMPULAN

Bendungan inti aspal menunjukkan kinerja stabilitas yang memadai terhadap beban gempa dalam semua kondisi analisis: selesai konstruksi, MAB, MAN, dan MAM. Faktor keamanan pada semua kondisi memenuhi standar minimum yang ditentukan, yang menegaskan bahwa desain bendungan cukup stabil untuk menahan guncangan seismik yang diperkirakan terjadi selama masa pengoperasian. Bendungan inti aspal tetap stabil terhadap beban gempa pada berbagai rasio kedalaman gempa. Stabilitas yang konsisten pada kedalaman yang berbeda menunjukkan bahwa desain bendungan efektif mengatasi perubahan intensitas getaran terhadap bahaya seismik yang tidak terduga.

DAFTAR PUSTAKA

Bayisa, N. M. (2019). Relative Performance Evaluation of Asphaltic Concrete Core Embankment Dam and Clay Core Embankment Dam: By Plaxis Software Application. *American Journal of Science, Engineering and Technology*, *4*(1), 18–29. https://doi.org/10.11648/j.ajset.20190401.12

Chakraborty, S. (2018). *A Comprehensive Seismic Response and Slope Stability Analysis Framework for Evaluating the Stability of Hydraulic-fill Dams*.

Chayati, N., Wicaksono, M. H., & Taqwa, F. M. L. (2023). Analisis Stabilitas Lereng Bendungan Terhadap Beban Gempa sebagai Upaya Pengurangan Bencana (Studi Kasus: Bendungan Jlantah). *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, *23*(1), 1035–1042.

Johari, A., Mousavi, S., & Hooshmand Nejad, A. (2015). A seismic slope stability probabilistic model based on Bishop's method using analytical approach. *Scientia Iranica*, *22*(3), 728–741.

Kamiruddin, A., Chalid, A., Sulaeman, A., & Siregar, C. A. (2022). Pengaruh Permeabilitas Terhadap Stabilitas Keamanan Bendungan Gunungrowo. *Jurnal Teknik Sipil*, *18*(2), 313–327.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2017). Modul Analisa Stabilitas Bendungan: Perhitungan Stabilitas Lereng. Pelatihan Perencanaan Bendungan Tingkat Dasar. *Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*.

Pd t-14-2004-A. (2004). Analisis Stabilitas Bendungan Tipe Urugan Akibat Beban Gempa. *Pedoman Konstruksi dan Bangunan*, 1–93.

Pratama, R. R., Suprijanto, H., & Asmaranto, R. (2021). Analisa Stabilitas Tubuh Bendungan Utama Pada Bendungan Semantok, Nganjuk, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*, *1*(1), 89–102.

PUSLITBANG SDA. (2014). *Analisa Dinamik Bangunan Air*. *2504*(193).

Saidillah, M., & Artati, H. K. (2022). Analisis Rembesan Dan Stabilitas Bendungan Saradan. *Jurnal Teknik Sipil Cendekia (Jtsc)*, *3*(2), 316–330.

Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (1977). Bendungan Type Urugan. *Pradnya Paramita*, 327.

United States Army Corps of Engineers. (2003). *Slope stability*. https://doi.org/10.1201/b11461-5

Wandira, I. G. P. (2022). *Aspal beton (asphalt concrete)*.

Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability Second Edition*.

ANALISIS DEBIT BANJIR RANCANGAN DAERAH ALIRAN SUNGAI YEH HO DENGAN METODE HSS NAKAYASU

Made Widya Jayantari[1*] dan I Gusti Agung Putu Eryani[2]

[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Udayana, Jalan Kampus Bukit Jimbaran, Bali*
e-mail: widyajayantari13@gmail.com
[2] Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Warmdaewa, Jl. Terompong No.24, Bali
e-mail: eryaniagung@gmail.com

ABSTRAK

Sumber daya air adalah elemen esensial bagi kehidupan manusia dan ekosistem yang memerlukan pengelolaan yang bijaksana untuk memastikan keberlanjutan. Pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan komponen kunci dalam strategi pengelolaan sumber daya air, karena berfungsi sebagai penerima, penyimpan, dan penyalur air hujan ke sungai utama. Pengelolaan DAS yang efektif dapat mengurangi risiko bencana seperti banjir dan kekeringan, serta menjaga kualitas air dan tanah. Salah satu parameter penting dalam pengelolaan ini adalah debit rancangan, yang digunakan untuk merancang infrastruktur seperti bendungan dan saluran irigasi. Ketidakakuratan dalam perhitungan debit rancangan dapat mengakibatkan kerugian ekonomi dan sosial yang signifikan.Penelitian ini fokus pada analisis debit rancangan di DAS Yeh Ho di Bali menggunakan metode HSS Nakayasu. DAS Yeh Ho, dengan luas 172,943 km², mengalami masalah banjir dan kekeringan akibat luas lahan kritis yang signifikan. Metode HSS Nakayasu dipilih karena kesederhanaannya dan kemampuannya memberikan estimasi akurat meskipun dengan data terbatas. Penelitian melibatkan pengolahan data curah hujan dari tiga stasiun pengamatan selama sepuluh tahun, analisis frekuensi, dan uji kesesuaian distribusi. Hasil analisis menunjukkan fluktuasi curah hujan maksimum dan memperkirakan debit banjir maksimum untuk berbagai periode ulang, dari 361,490 m³/detik pada periode ulang 2 tahun hingga 650,323 m³/detik pada periode ulang 1000 tahun. Hasil ini menekankan perlunya perencanaan dan pengelolaan DAS yang lebih baik untuk mengurangi dampak banjir dan memastikan keberlanjutan lingkungan serta ekonomi melalui perencanaan infrastruktur yang tepat dan konservasi sumber daya.

Kata Kunci: Banjir, HSS Nakayasu, Daerah Aliran Sungai, Air, Hujan.

1. PENDAHULUAN

Sumber daya air adalah salah satu elemen terpenting dalam kehidupan manusia dan lingkungan, yang keberadaannya harus dikelola dengan baik untuk mendukung berbagai aktivitas manusia seperti pertanian, industri, dan kebutuhan rumah tangga (Hasibuan & Redha, 2023; Qodriyatun, 2020; Sudipa et al., 2020). Pengelolaan yang tepat terhadap sumber daya air tidak hanya memastikan ketersediaan air yang cukup dan berkualitas untuk kebutuhan tersebut, tetapi juga memainkan peran penting dalam keberlanjutan ekosistem. Salah satu komponen utama dalam pengelolaan sumber daya air yang efektif adalah pengelolaan daerah aliran sungai (DAS), yang berfungsi sebagai wilayah penerima, penyimpan, dan penyalur air hujan ke sungai-sungai utama (Erawati, 2021). Dengan mengelola DAS secara berkelanjutan, kita dapat mengurangi risiko bencana alam seperti banjir dan kekeringan, serta menjaga kualitas air dan tanah. Hal ini pada gilirannya mendukung keberlanjutan lingkungan dan memastikan bahwa sumber daya air tetap tersedia bagi generasi mendatang, sehingga berbagai aktivitas manusia dan ekosistem dapat terus berjalan dengan baik.

Debit rancangan merupakan parameter penting dalam perencanaan dan pengelolaan sumber daya air, karena berperan vital dalam pencegahan banjir (Amarullah et al., 2023; Sa'ud, 2007). Menentukan debit rancangan yang akurat sangat krusial untuk merancang infrastruktur air seperti bendungan, saluran irigasi, dan sistem drainase, yang berfungsi mengendalikan aliran air dan meminimalkan risiko bencana. Ketidakakuratan dalam perhitungan debit rancangan dapat mengakibatkan kerugian besar, baik secara ekonomi maupun sosial. Secara ekonomi, kesalahan tersebut dapat menyebabkan kerusakan infrastruktur, biaya perbaikan yang tinggi, dan gangguan pada aktivitas ekonomi yang bergantung pada ketersediaan air. Secara sosial, dampaknya bisa berupa kehilangan tempat tinggal, gangguan kesehatan, dan penurunan kualitas hidup akibat banjir atau kekeringan yang tidak terduga. Oleh karena itu, memastikan bahwa perhitungan debit rancangan dilakukan dengan tepat sangat penting untuk melindungi masyarakat dan mendukung pembangunan yang berkelanjutan.

DAS Yeh Ho merupakan salah satu DAS potensial di Provinsi Bali dengan tipe aliran sungai Perennial. Menurut Balai Wilayah Sungai Bali-Penida (2012), luas wilayah kritis DAS Yeh Ho adalah 28,57 km² potensial kritis, 56,35 km² semi kritis, 83,18 km² kritis, dan 0,58 km² sangat kritis (BWS Bali-Penida, 2012). Besarnya lahan kritis di DAS Yeh Ho menyebabkan terjadinya banjir pada musim hujan dan kekeringan pada musim kemarau. Dari tahun 2016 hingga 2023, secara berulang kondisi air sungai Tukad Yeh Ho meluap akibat intensitas hujan yang cukup tinggi, hingga

meluap hingga ke badan jalan (baliprawara.com, 2023).

Metode HSS Nakayasu adalah salah satu metode yang digunakan untuk meramalkan respon hidrologi dari suatu DAS terhadap curah hujan. Metode ini dikembangkan oleh Nakayasu dan telah terbukti efektif dalam memodelkan hidrograf aliran puncak. Keunggulan metode ini terletak pada kesederhanaan dan kemampuannya untuk memberikan estimasi yang cukup akurat dengan data yang terbatas (Dewi et al., 2016; Natakusumah et al., 2011; Sutapa, 2005). Analisis debit rancangan pada daerah aliran sungai Yeh Ho dengan metode HSS Nakayasu sangat penting untuk keberlanjutan lingkungan dan pengelolaan sumber daya air. Metode HSS Nakayasu memungkinkan estimasi yang lebih akurat terhadap respons aliran sungai terhadap curah hujan, sehingga dapat membantu dalam merancang infrastruktur pengendalian banjir yang efektif. Selain itu, hasil analisis ini juga bermanfaat untuk perencanaan tata guna lahan yang berkelanjutan, karena memungkinkan identifikasi daerah-daerah yang rentan terhadap banjir. Dengan demikian, penggunaan metode HSS Nakayasu dalam analisis debit rancangan tidak hanya mendukung pengurangan risiko bencana alam, tetapi juga mendukung pembangunan berkelanjutan di daerah aliran sungai Yeh Ho.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Curah Hujan Kawasan

Untuk menentukan hujan rerata pada suatu daerah digunakan metode- metode khusus karena stasiun pencatat hujan hanya memberikan data hujan di titik stasiun tersebut berada. Metode yang digunakan dipilih dengan mempertimbangkan hal-hal berikut (Indriyanti et al., 2023).

1. Apabila stasiun pencatat hujan berjarak kurang dari 10 km dari lokasi maka data hujan pada stasiun tersebut dapat digunakan dalam perhitungan.
2. Apabila tidak ada stasiun pencatat hujan dengan jarak kurang dari 10 km, maka digunakan stasiun pencatat hujan dengan jarak 10-20 km dengan syarat minimal 2 stasiun pencatat hujan.
3. Apabila tidak ada stasiun pencatat hujan dengan jarak 10-20 km, maka digunakan stasiun hujan dengan jarak kurang dari 50 km, dengan syarat minimal 3 stasiun hujan.

Metode Perhitungan Curah Hujan Kawasan

1. Metode Aritmatik (Aljabar)
   Metode aritmatik atau aljabar adalah metode yang paling sederhana, dimana pengukuran yang dilakukan adalah dengan merata-ratakan hujan di seluruh DAS. Stasiun hujan yang digunakan untuk menghitung dengan metode ini adalah yang berada di dalam DAS, akan tetapi stasiun yang berada di luar DAS dan jaraknya cukup berdekatan masih bisa diperhitungkan. Metode aljabar ini memberikan hasil yang tidak teliti, metode ini memberikan hasil yang cukup baik jika penyebaran hujan merata, serta hujan tidak terlalu bervariasi (Aridipa, Tanti and Basysyar, 2017). Perhitungan curah hujan rata-rata menggunakan metode aljabar dapat dihitung dengan Persamaan 1.

$$\bar{P} = \frac{P_1+P_2+\cdots+P_n}{n} \quad (1)$$

   Keterangan:
   $\bar{P}$ = Hujan rerata di suatu DAS (mm)
   P_1, P_2, P_n = Hujan di tiap-tiap stasiun (mm)
   n = jumlah stasiun

2. Metode Poligon Thiessen
   Metode ini digunakan untuk menghitung bobot masing-masing stasiun yang mewakili luasan di sekitarnya. Metode ini digunakan bila penyebaran hujan di daerah yang ditinjau tidak merata. Perhitungan curah hujan rata-rata menggunakan metode poligon thiessen dapat dihitung dengan Persamaan 2.

$$\bar{P} = \frac{A_1P_1+A_2P_2+\cdots+A_nP_n}{\sum A} \quad (2)$$

   Keterangan:
   $\bar{P}$ = Curah hujan rerata di suatu DAS (mm)
   P_1, P_2, P_n = Hujan di tiap-tiap stasiun (mm)
   A_1, A_2, A_n = Luas yang dibatasi tiap polygon (km)
   ΣA = Luas total keseluruhan stasiun (km)

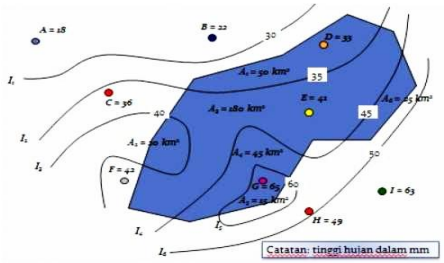
3. Metode Isohiet
   Pada prinsipnya isohiet adalah garis yang menghubungkan titik-titik dengan tinggi/kedalaman hujan yang

sama, kesulitan dari penggunaan metode ini adalah jika jumlah stasiun di dalam dan sekitar DAS terlalu sedikit. Hal tersebut akan mengakibatkan kesulitan dalam menginterpolasi seperti pada Gambar 1. Perhitungan curah hujan rata-rata menggunakan metode isohiet dapat dihitung dengan Persamaan 3.

$$\bar{P} = \frac{A_1 x \frac{I_1+I_2}{2} + A_2 x \frac{I_2+I_3}{2} + \cdots + A_n x \frac{I_n+I_{n+1}}{2}}{\sum A} \quad (3)$$

Keterangan:

$\bar{P}$ = Curah hujan rerata di suatu DAS (mm)
I_1, I_2, I_n = Garis isohiet tinggi hujan (mm)
A_1, A_2, A_n = Luas yang dibatasi tiap garis (km)
ΣA = Luas total keseluruhan stasiun (km)



Gambar 1. Ilustrasi untuk Metode Isohiet
Sumber: (Pewedhi, 2019)

Curah Rencana Kala Ulang

Dalam perhitungan curah hujan rencana ini menggunakan metode analisis frekuensi. Hujan rencana *(design event)* adalah suatu kejadian hujan dengan intensitas atau durasi tertentu. Sedangkan kala ulang *(return period)* adalah interval waktu suatu kejadian banjir dengan besar tertentu berulang kejadiannya. Analisis frekuensi adalah prosedur untuk memperkirakan frekuensi suatu kejadian pada masa lalu atau masa yang akan datang. Prosedur ini digunakan untuk menentukan hujan rencana dalam berbagai kala ulang berdasarkan distribusi yang paling sesuai antara distribusi hujan secara teoritik dan empirik.

a. Parameter Statistik
Parameter yang digunakan dalam perhitungan analisis frekuensi meliputi parameter nilai rata-rata ($\bar{X}$), deviasi standar (S), koefisien variasi (Cv), koefisien kemencengan (Cs) dan koefisien kurtosis (Ck). Sementara untuk memperoleh harga parameter statistik dilakukan perhitungan dengan rumus dasar sebagai berikut (Soemarto, 1987).

b. Metode Distribusi
Berdasarkan parameter tersebut, maka kita dapat mencari beberapa metode distribusi. Syarat yang digunakan untuk memilih jenis distribusi adalah seperti Tabel 1.

Tabel 1. Pedoman Pemilihan Jenis Sebaran

Jenis Sebaran	Syarat
Normal	Cs ≈ 0 Ck ≈ 0
Log Normal	Cs = Cv^3 +3 Cv = 0.4 Ck = Cv^8+6Cv^6 +15Cv^4+16Cv^2+3=3.3
Gumbel	Cs ≈ 1.14 Ck ≈ 5.4
Log Pearson Type III	Bila tidak ada parameter statistik yang sesuai dengan ketentuan distibusi sebelumnya

Sumber: (Kereh et al., 2018)

c. Distribusi Log Pearson Type III

Distribusi Log Pearson Tipe III digunakan untuk analisis variabel hidrologi dengan nilai variat minimum misalnya analisis frekuensi distribusi dari debit minimum (low flows). Distribusi Log Pearson Type III, mempunyai koefisien kemencengan $C_S \neq 0$ (Indarto, 2016).

Rata-rata:

$$\log \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \log Xi}{n} \quad (3)$$

Standar Deviasi :

$$S \log x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\log Xi - \log \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Koefisien Kemencengan (Skewness):

$$Cs = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\log Xi - \log \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)(S \log x)^2} \quad (5)$$

Koefisien Kurtosis (Curtosis) :

$$Ck = \frac{n^2 \sum_{i=1}^{n} (\log Xi - \log \bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)(S \log x)^3} \quad (6)$$

Koefisien Variasi:

$$Cv = \frac{S\ Log\ x}{\log \bar{x}} \quad (7)$$

Curah hujan rencana periode ulang t tahun:

$$Log\ Xt = Log\ X + K.S \quad (8)$$

Keterangan:

Log Xt = curah hujan rencana dengan periode ulang t tahun (mm).
$\log \bar{x}$ = curah hujan rata-rata (mm).
$S \log x$ = standar deviasi.
K = faktor frekuensi.
Cs = koefisien kemencengan.
Ck = koefisien kurtosis.
Cv = koefisien variasi

Uji Kesesuaian

Uji kesesuaian distribusi curah hujan dimaksudkan untuk menentukan kecocokan *(the goodness of fittest test)* distribusi frekuensi dari sampel data terhadap fungsi distribusi peluang yang diperkirakan. Untuk menggambarkan hal tersebut maka dibutuhkan pengujian dengan parameter. Parameter yang digunakan adalah Uji Chi-kuadrat dan Uji Smirnov-kolmogorov

1. Uji Chi-kuadrat
   Prinsip pengujian dengan metode ini didasarkan pada jumlah pengamatan yang diharapkan pada pembagian kelas, dan ditentukan terhadap jumlah data pengamatan yang terbaca di dalam kelas tersebut, atau dengan membandingkan nilai chi square (X^2) dengan nilai chi square kritis (X^2cr) (Soewarno, 1995).
2. Uji Smirnov-kolmogorov
   Uji Smirnov-kolmogorov ini biasanya digunakan untuk menguji simpangan/selisih terbesar antara peluang pengamatan (empiris) dengan peluang teoritis. Uji Smirnov-kolmogorov sering disebut juga dengan uji non parametrik, karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu.

Debit Rencana

Debit banjir rencana adalah debit maksimum di sungai atau saluran alamiah dengan periode ulang (rata-rata) yang sudah ditentukan yang dapat dialirkan tanpa membahayakan proyek irigasi dan stabilitas bangunanbangunannya. Debit banjir rencana ditetapkan dengan cara menganalisis debit puncak, dan biasanya dihitung berdasarkan hasil pengamatan harian tinggi muka air.

1. Waktu Konsentrasi
   Waktu konsentrasi adalah waktu yang diperlukan oleh air hujan yang jatuh untuk mengalir dari titik terjauh sampai ke tempat keluaran (titik kontrol) setelah tanah menjadi jenuh dan depresi-depresi kecil terpenuhi. Tempat yang paling jauh berhubungan dengan suatu tempat yang membutuhkan waktu aliran yang paling lama.
2. Debit Banjir Rencana Satu Satuan

Dalam analisis hujan-aliran untuk memperkirakan debit banjir rencana diperlukan masukan hujan rencana ke dalam suatu sistem DAS. Hujan rencana tersebut dapat berupa kedalaman hujan di suatu titik atau hyetograf hujan rencana yang merupakan distribusi hujan sebagai fungsi waktu selama hujan deras. perencanaan bangunan air didasarkan pada debit banjir rencana yang diperoleh dari analisis hujan-aliran tersebut, yang bisa berupa banjir rencana dengan periode ulang tertentu.

Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu

Hidrograf satuan sintetis Nakayasu dikembangkan berdasarkan beberapa sungai di Jepang (Soemarto, 1987). Penggunaan metode ini memerlukan beberapa karakteristik parameter daerah alirannya, seperti :

1) Tenggang waktu dari permukaan hujan sampai puncak hidrograf (*time of peak*)
2) Tenggang waktu dari titik berat hujan sampai titik berat hidrograf (*time lag*)
3) Tenggang waktu hidrograf (*time base of hydrograph*)
4) Luas daerah aliran sungai
5) Panjang alur sungai utama terpanjang (*length of the longest channel*)

Bentuk persamaan HSS Nakayasu adalah sebagai berikut.

$$Qp = \frac{CA.R_0}{3{,}6(0{,}3Tp+T_{0,3})} \quad (9)$$

Keterangan:

Qp	= debit puncak banjir (m^3/dt)
Ro	= hujan satuan (mm)
Tp	= tenggang waktu dari permulaan hujan sampai puncak banjir (jam)
$T_{0,3}$	= waktu yang diperlukan oleh penurunan debit, dari puncak sampai 30% dari debit puncak (jam)
CA	= luas daerah pengaliran sampai outlet (km^2)

Untuk menentukan Tp dan $T_{0,3}$ digunakan pendekatan rumus sebagai berikut.

Tp	= tg + 0,8 tr	(10)
$T_{0,3}$	= α tg	(11)
Tr	= 0,5 tg sampai tg	(12)

tg adalah time lag yaitu waktu antara hujan sampai debit puncak banjir (jam). tg dihitung dengan ketentuan sebagai berikut.

- sungai dengan panjang alur L > 15 km : tg =0,4 + 0,058 L
- sungai dengan panjang alur L < 15 km : tg = 0,21 $L^{0,7}$

Perhitungan $T_{0,3}$ menggunakan ketentuan:

α = 2	pada daerah pengaliran biasa
α = 1,5	pada bagian naik hidrograf lambat, dan turun cepat
α = 3	pada bagian naik hidrograf cepat, dan turun lambat

- Pada waku naik : 0 < t < Tp

$$Qa = (t/Tp)^{2,4} \quad (13)$$

dimana Qa adalah limpasan sebelum mencapai debit puncak (m^3/dt)

- Pada kurva turun (*decreasing limb*)
  a. selang nilai : $0 \le t \le (Tp + T_{0,3})$

$$Qd_1 = Qp.0{,}3^{\frac{(t-Tp)}{T_{0,3}}} \quad (14)$$

  b. selang nilai : $(Tp + T_{0,3}) \le t \le (Tp + T_{0,3} + 1{,}5\ T_{0,3})$

$$Qd_2 = Qp.0{,}3^{\frac{(t-Tp+0{,}5T_{0,3})}{1{,}5T_{0,3}}} \quad (15)$$

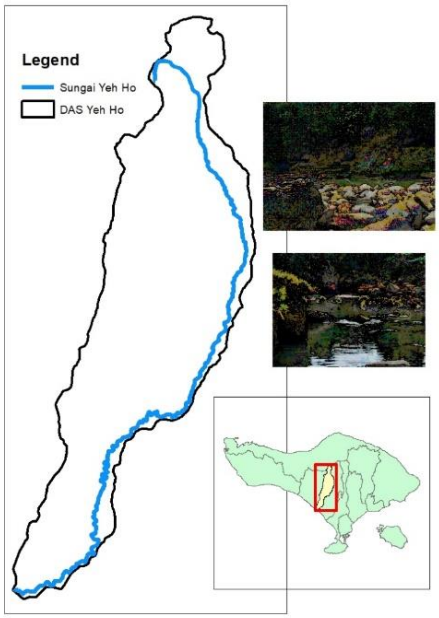
  c. selang nilai : $t > (Tp + T_{0,3} + 1{,}5\ T_{0,3})$

$$Qd_3 = Qp.0{,}3^{\frac{(t-Tp+1{,}5T_{0,3})}{2T_{0,3}}}$$

3. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Tukad Yeh Ho merupakan sungai yang potensial dengan luas DAS 172,943 km^2, dengan panjang sungai utama 45,145 km dan merupakan sungai yang melintasi 2 Kabupaten Tabanan dan Buleleng. Sepanjang sungai Tukad Yeh Ho dan anak-anak sungainya terdapat 19 bendung irigasi dan 26 empelan, dengan luas lahan irigasi 8.829 ha. DAS Yeh Ho (Gambar 2) merupakan salah satu potensi sumber daya air yang ada di kabupaten Tabanan yang dimanfaatkan antara lain untuk irigasi dan air baku bagi sebagian besar wilayah terutama di kabupaten Tabanan. Oleh karena itu keberadaan DAS Yeh Ho sangat penting terutama untuk menunjang produksi pertanian di Kabupaten Tabanan (BWS Bali-Penida, 2012).



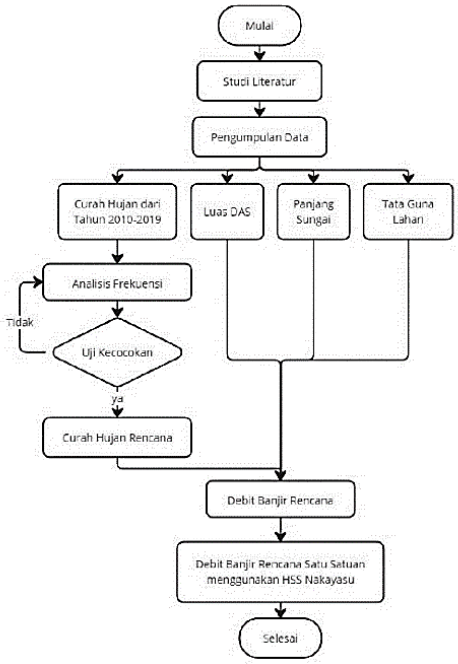
Gambar 2. Lokasi Penelitian

Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data curah hujan dari 3 stasiun curah hujan yaitu Stasiun Benel, Stasiun Dauh Waru, dan Stasiun Pohsanten dengan rentang waktu 10 tahun terakhir yaitu mulai tahun 2010 – 2019. Selain data curah hujan, data yang digunakan berupa kondisi daerah aliran sungai (DAS) seperti luas DAS, panjang sungai dan juga tataguna lahan yang digunakan untuk menentukan koefisien pengaliran.

Metode Analisis Data

Penelitian ini diawali dengan pengolahan data curah hujan, dimulai dengan pengisian data hujan yang hilang, uji konsistensi ketiga stasiun curah hujan kemudian dihitung curah hujan kawasan dengan metode rata-rata aritmatik seperti Persamaan 1. Kemudian setelah didapat curah hujan kawasan kemudian dilakukan analisis frekuensi (Persamaan 4-8) dan uji kesesuaian. Setelah distribusi data sudah cocok, kemudian dihitung curah hujan rencana kala ulang. Setelah mendapat curah hujan rencana kala ulang, dihitung debit banjir rencana menggunakan metode HSS Nakayasu (Persamaan 9-16). Alur analisis data dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Flowchart Penelitian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengisian Data Hujan Kosong

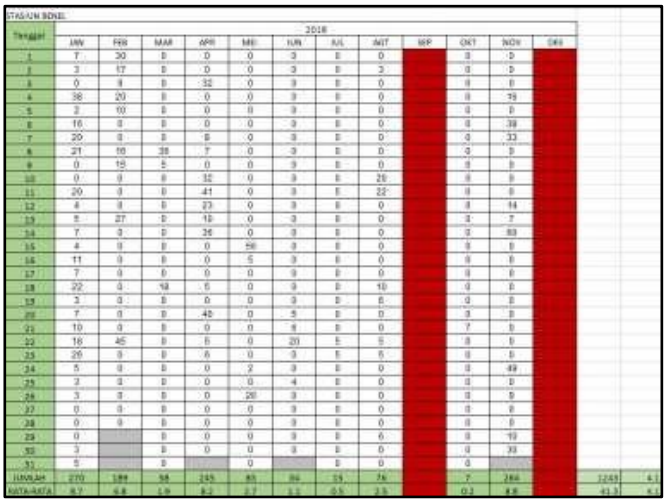
Data yang akan dianalisis merupakan data curah hujan dari tiga stasiun pengamatan yang berbeda, yaitu Stasiun Benel, Stasiun Dauh Waru, dan Stasiun Pohsanten dengan rentang waktu 10 tahun terakhir yaitu mulai tahun 2010 - 2019. Namun, ditemukan kerusakan data pada tahun 2018 tepatnya pada bulan September dan Desember pada salah satu stasiun pengamatan, yaitu pada Stasiun Benel. Sehingga, sebelum melakukan perhitungan selanjutnya diperlukan untuk menganalisis data hujan yang hilang tersebut. Pengisian data hujan yang hilang dapat dilakukan dengan metode Normal Ratio.

$$\frac{P_x}{N_x} = \frac{1}{n} x \left(\frac{P_1}{N_1} + \frac{P_2}{N_2} + \cdots + \frac{P_n}{N_n}\right) \quad (17)$$

Keterangan:

P_X = Hujan yang hilang di stasiun x
N_X = Rata-rata hujan tahunan di stasiun x
$P_1, P_2, \ldots P_n$ = Hujan tahunan di stasiun di sekitar stasiun x
$N_1, N_2, \ldots N_n$ = Rata-rata hujan tahunan di stasiun sekitar stasiun x
n = Jumlah stasiun hujan di sekitar stasiun x

Berikut merupakan data curah hujan yang hilang pada Stasiun Benel di tahun 2018.

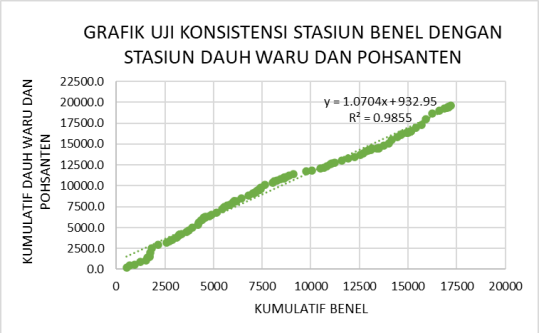


Gambar 4. Pengisian Data Hujan Hilang di Stasiun Benel Tahun 2018

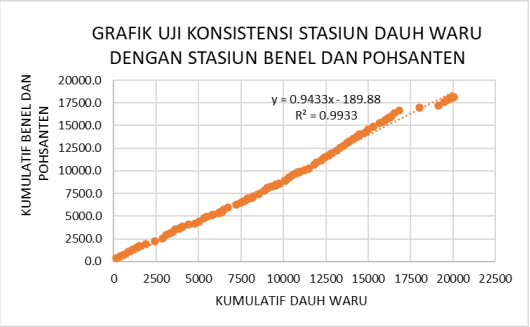
Uji Konsistensi

Setelah mendapatkan data yang lengkap dari ketiga stasiun yang akan digunakan dalam perhitungan hujan kawasan, maka langkah selanjutnya adalah menguji kekonsistenan data. Uji konsistensi data dilakukan dengan metode Kurva Massa Ganda yaitu membandingkan kumulatif satu stasiun dengan kumulatif rata- rata dari dua stasiun lainnya. Apabila ada penyimpangan, akan terlihat dalam grafik hubungannya. Serta, apabila terlihat ada yang menyimpang, salah satu stasiun tersebut dapat dihilangkan.

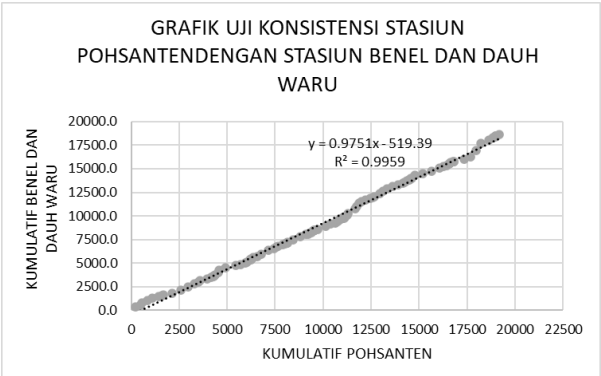
Setelah mendapat perhitungan kumulatif curah hujan dan kumulatif dari rata-rata setiap stasiun dapat dilihat perbandingan dari kumulatif stasiun 1 dengan kumulatif rata-rata stasiun 2,3 dan seterusnya pada Gambar 5 a-c.



Gambar 5a. Uji Konsistensi di Stasiun Benel



Gambar 5b. Uji Konsistensi di Stasiun Dauh Waru



Gambar 5c. Uji Konsistensi di Stasiun Poh Santen

Berdasarkan hasil uji konsistensi dapat dilihat jika ketiga stasiun konsisten dan memiliki karakteristik yang sama dibuktikan pada nilai $R^2 > 0{,}5$ disetiap stasiun. R^2 memiliki arti kekonsistenan data yang berarti jika nilai R^2 semakin mendekati 1 maka data akan semakin konsisten. Sehingga ketiga stasiun dikatakan konsisten dan dapat digunakan dalam perhitungan hujan selanjutnya.

Curah Hujan Kawasan Maksimum

Setelah data dinyatakan konsisten, maka perhitungan dapat dilanjutkan untuk mencari curah hujan kawasan. Dalam menentukan curah hujan kawasan digunakan metode Aritmatika yaitu mencari rata-rata curah hujan di seluruh stasiun. Dari hasil perhitungan hujan kawasan tahun 2010-2019, didapati curah hujan maksimum tiap tahunnya seperti Tabel 2. Tabel 2 menunjukkan data curah hujan maksimum tahunan (dalam milimeter) selama periode 2010 hingga 2019. Pada tahun 2010, curah hujan maksimum tercatat sebesar 35 mm, meningkat menjadi 41 mm pada tahun 2011. Tahun 2012 mengalami sedikit penurunan dengan curah hujan maksimum sebesar 38 mm. Pada tahun 2013, terjadi peningkatan signifikan menjadi 51 mm, yang terus berlanjut hingga 55 mm pada tahun 2014. Namun, tahun 2015 mencatat penurunan kembali ke 38 mm. Curah hujan maksimum mencapai puncaknya pada tahun 2016 dan 2017, dengan nilai yang hampir sama yaitu 69 mm dan 73 mm. Tahun 2018 juga mencatat curah hujan maksimum sebesar 73 mm, dan sedikit menurun menjadi 68 mm pada tahun 2019. Data ini menunjukkan fluktuasi tahunan dalam curah hujan maksimum, dengan tren peningkatan yang cukup signifikan terutama sejak tahun 2016.

Tabel 2. Curah Hujan Kawasan Maksimum

Tahun	Hujan Max/Xi (mm)
2010	35
2011	41
2010	38
2013	51
2014	55
2015	38
2016	69
2017	73
2018	73
2019	68

Curah Hujan Rancangan

Curah Hujan Rancangan merupakan suatu curah hujan maksimum dalam kala ulang tertentu. Kala ulang dapat dicari dengan berbagai rumus sesuai hasil distribusi dari curah hujan yang telah dihitung. Berdasarkan Tabel 3, didapatkan bahwa distribusi yang cocok adalah distribusi Log Pearson Type III. Setelah mendapatkan metode distribusi yang cocok kemudian dilakukan pengujian kesesuaian distribusi (Tabel 4-5) dan dihitung curah hujan rencana sesuai kala ulang yang terlihat pada Tabel 6.

Tabel 3. Pemilihan Sebaran

No	Jenis Sebaran	Syarat	Hasil	Keterangan
1	Normal	Cs » 0	0.07	Tidak Memenuhi
		Ck » 0	0.21	Tidak Memenuhi
2	Log Normal	Cs = Cv3 +3 Cv = 0.4	-0.67	Tidak Memenuhi
		Ck = Cv^8+6Cv^6 +15Cv^4+16Cv^2+3=3.3	0.29	Tidak Memenuhi
3	Gumbel	Cs » 1.14	0.07	Tidak Memenuhi
		Ck » 5.4	0.21	Tidak Memenuhi
4	**Log Pearson Tipe III**	**Selain dari nilai diatas**		**Memenuhi**

Tabel 4. Uji Chi Square

P (interval kelas)	EF (n/ (1 + 3,322 log n))	OF (Banyaknya data dalam interval)	EF-OF	$(EF-OF)^2/EF$
35 - 44.5	2.5	4	-1.500	0.90
44.5 - 54	2.5	1	1.500	0.90
54 - 63.5	2.5	1	1.5	0.90
63.5 - 73	2.5	4	-1.5	0.90
Jumlah	**10**	**10**	**0**	**3.60**

Berdasarkan Tabel 4 diperoleh nilai f hitung sebesar 3,60, kemudian dibandingkan dengan nilai f tabel chi kuadrat α= 5% ≈ 0.05 dan DF/dk =3 maka f tabel sebesar 7,815, sehingga metode distribusi Log pearson tipe III sesuai karena f hitung< f tabel.

Tabel 5. Uji Smirnov-Kolmogorov

i	Log Xi(terbesar-terkecil)	P(x) =i/(n+1)	f(t)	y	P'(Xi)	⊿P

1	1.86	0.09	1.05	0.79	0.21	0.12
2	1.86	0.18	1.05	0.79	0.21	0.03
3	1.84	0.27	0.85	0.73	0.27	-0.01
4	1.83	0.36	0.80	0.72	0.28	-0.08
5	1.74	0.45	0.06	0.50	0.50	0.04
6	1.71	0.55	-0.21	0.42	0.58	0.03
7	1.61	0.64	-0.97	0.20	0.80	0.16
8	1.58	0.73	-1.24	0.12	0.88	0.15
9	1.58	0.82	-1.24	0.12	0.88	0.06
10	1.54	0.91	-1.53	0.04	0.96	0.05
		Max				**0.16**

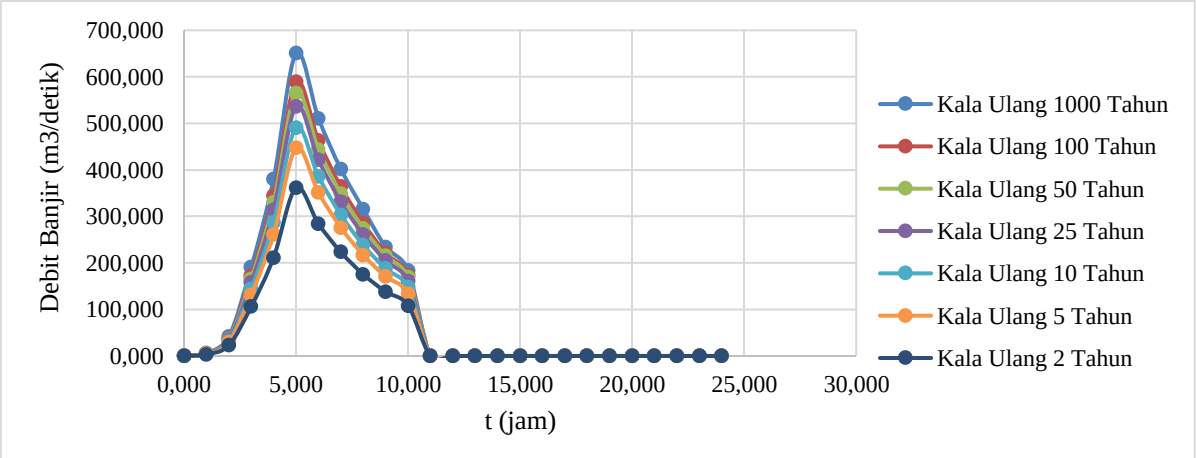
Berdasarkan Tabel 5, ΔP maksimum didapat sebesar 0,16. Dengan $\alpha = 5\% \approx 0.05$ dan n = 10 maka ΔP maks tabel adalah 0,41. Kemudian dibandingkan antara ΔP hitung dengan ΔP tabel dimana ΔPhitung< ΔPtabel sehingga metode distribusi Log pearson tipe III sesuai.

Tabel 6. Curah Hujan Rencana

Tr	Cs	K	Log Xt	Xt(mm/hari)
2	-0.674	0.112	1.747	55.847
5	-0.674	0.857	1.839	69.053
10	-0.674	1.187	1.880	75.865
25	-0.674	1.498	1.919	82.890
50	-0.674	1.678	1.941	87.235
100	-0.674	1.825	1.959	90.975
1000	-0.674	2.174	2.002	100.468

Perhitungan Debit Puncak Metode Hidrograf Nakayasu

Hidrograf adalah suatu kurva yang memberikan hubungan antara parameter aliran dengan waktu, parameter tersebut dapat berupa kedalaman (ketinggian) aliran atau laju aliran. Hidrograf menunjukkan respon daerah aliran sungai (DAS) secara keseluruhan terhadap data masukan curah hujan. Nakayasu dari Jepang, telah menyelidiki hidrograf satuan pada beberapa sungai di Jepang. Ia membuat rumus hidrograf satuan sintetik dari hasil penyelidikannya. Rumus tersebut adalah sebagai berikut (Soemarto, 1987) :Setelah mendapatkan nilai dari Qp, kita mencari nilai debit untuk bagian lengkung naik *(rising limb)* hidrograf satuan (Qa) dan bagian lengkung turun *(decreasing limb)* hidrograf satuan (Qd) dengan jam yang dimulai dari jam ke 0 sampai jam ke 24. Dari data debit banjir satu satuan ini dapat membentuk hidrograf satuan



Gambar 6. Hidrograf Nakayasu

Banjir Maksimum

Tabel 7 menggambarkan debit banjir maksimum (dalam meter kubik per detik) untuk berbagai periode ulang. Periode ulang 2 tahun memiliki debit banjir maksimum sebesar 361.490 m^3/detik, sementara untuk periode ulang 5 tahun,

debit banjir maksimum naik menjadi 446.974 m³/detik. Untuk periode ulang 10 tahun, debit banjir maksimum sedikit lebih rendah, yaitu 385.984 m³/detik. Debit banjir maksimum meningkat signifikan pada periode ulang 25 tahun menjadi 536.541 m³/detik dan terus naik pada periode ulang 50 tahun sebesar 564.666 m³/detik. Pada periode ulang 100 tahun, debit banjir maksimum mencapai 588.875 m³/detik, dan untuk periode ulang 1000 tahun, debit banjir maksimum tertinggi tercatat sebesar 650.323 m³/detik. Data ini menunjukkan bahwa semakin panjang periode ulang, semakin besar debit banjir maksimum yang diharapkan, mencerminkan probabilitas yang lebih rendah namun dengan potensi banjir yang lebih besar.

Tabel 7. Pedoman Pemilihan Jenis Sebaran

Tr	Q Banjir(m³/detik)
2	361.490
5	446.974
10	385.984
25	536.541
50	564.666
100	588.875
1000	650.323

Debit banjir maksimum yang meningkat dengan periode ulang mengindikasikan bahwa risiko banjir akan semakin besar seiring berjalannya waktu. Ini mengharuskan wilayah tersebut untuk mempersiapkan diri menghadapi kemungkinan banjir yang lebih ekstrem di masa depan. Persiapan ini melibatkan perencanaan dan pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) yang efektif, termasuk pembangunan infrastruktur pengendalian banjir seperti tanggul, saluran pembuangan, dan sistem peringatan dini. Selain itu, upaya konservasi seperti pemeliharaan hutan dan perlindungan tanah juga penting untuk mengurangi aliran air yang berlebihan. Penggunaan rumus hidrograf Nakayasu, yang merupakan metode statistik untuk memodelkan aliran sungai berdasarkan data curah hujan dan karakteristik DAS, dapat menjadi alat yang sangat berguna dalam meramalkan dan merencanakan bagaimana DAS akan merespons curah hujan. Dengan memanfaatkan rumus ini, perencana dapat membuat strategi yang lebih baik untuk mengurangi dampak banjir dan memastikan keberlanjutan lingkungan serta ekonomi.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis debit rencana DAS Yeh Ho dengan memanfaatkan metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) Nakayasu. Metode ini digunakan untuk menghitung debit puncak banjir berdasarkan curah hujan rencana dan karakteristik hidrologis DAS. Analisis dimulai dengan pengolahan data curah hujan dari tiga stasiun pengamatan selama periode 2010-2019, termasuk pengisian data hilang dan uji konsistensi data. Selanjutnya, curah hujan kawasan dihitung menggunakan metode Poligon Thiessen. Hasil perhitungan menunjukkan adanya fluktuasi curah hujan maksimum tahunan dengan tren peningkatan signifikan setelah tahun 2016. Berdasarkan analisis frekuensi, distribusi Log Pearson Type III dipilih sebagai model yang sesuai untuk curah hujan rencana kala ulang. Pengujian kesesuaian distribusi menggunakan Uji Chi-Square dan Uji Smirnov-Kolmogorov menunjukkan bahwa distribusi ini cocok untuk data yang ada. Akhirnya, debit puncak banjir dihitung dengan metode HSS Nakayasu yang melibatkan parameter seperti waktu puncak dan waktu penurunan debit. Hasil analisis memberikan informasi yang berguna untuk perencanaan dan manajemen risiko banjir di DAS Yeh Ho, serta dapat digunakan untuk perancangan infrastruktur yang lebih baik dan mitigasi bencana.

DAFTAR PUSTAKA

Amarullah, S., Maulidi, A., Syarifudin, E., & Fauzi, A. (2023). Analisis Perencanaan Sistem Drainase Sebagai Upaya Penanggulangan Banjir Di Kecamatan Tallo Kota Makassar. *Jurnal Ilmu Pengetahuan Sosial*, *10*(10), 4607–4617.

Aridipa, Tanti and Basysyar, R. (2017). *Penanganan Genangan Daerah Layanan Drainase Perumahan Tambak Rejo Indah Kecamatan Waru Kabupaten Sidoarjo* [Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. http://repository.its.ac.id/44217/

baliprawara.com. (2023). *Intensitas Hujan Tinggi, Tukad Yeh Ho Meluap Hingga Sebabkan Banjir di Tabanan*. https://baliprawara.com/intensitas-hujan-tinggi-tukad-yeh-ho-meluap-hingga-sebabkan-banjir-di-tabanan/

BWS Bali-Penida. (2012). *Rencana Pengelolaan Sumber Daya Air untuk Wilayah Sungai Bali - Penida (Tahap I)*.

Dewi, R., Limantara, L. M., & Soetopo, W. (2016). Analisis Parameter Alfa Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu di

Sub Das Lesti. *Jurnal Teknik Pengairan*, *7*(1), 107–116. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31365.09441
Erawati, N. K. A. (2021). *Pengelolaan Sumber Daya Alam Dan Lingkungan Daerah Aliran Sungai Di Kota Denpasar* (Issue l).
Hasibuan, M. R., & Redha. (2023). *Evaluasi Efisiensi Penggunaan Air dalam Pertanian Berbasi TEknologi Irigasi Modern*.
Indarto. (2016). *Hidrologi, Metode Analisis dan Tool untuk Intepretasi Hidrograf Aliran*. Bumi Aksara.
Indriyanti, Kasmawati, Agustiansa, R., SA, A. R. A., Antaria, S., Latif, F., & Gaffar, F. (2023). Analisis Kebutuhan Air Pada Irigasi Sanrego Kecamatan Kahu Kabupaten Bone. *Jurnal Teknik Hidro*, *16*(2), 54–61.
Kereh, I. E., Alex, B., & Umarauw, J. S. F. (2018). Analisis Debit Banjir Dan Tinggi Muka Air Sungai Palaus Di Kelurahan Lowu I Kabupaten Minahasa Tenggara. *Jurnal Sipil Statik*, *6*(4), 235–346.
Natakusumah, D. K., Hatmoko, W., & Harlan, D. (2011). Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis dengan Cara ITB dan Beberapa Contoh Penerapannya. *Jurnal Teknik Sipil*, *18*(3), 251. https://doi.org/10.5614/jts.2011.18.3.6
Pewedhi. (2019). *Penentuan Hujan Kawasan (Daerah Aliran Sungai)*. https://pewedhi.wordpress.com/2017/02/28/penentuan-hujan-kawasan-daerah-aliran-sungai/
Qodriyatun, S. N. (2020). *Ketahanan Air Di Tengah*. *2045*(18).
Sa'ud, I. (2007). Kajian Penanggulangan Banjir di Wilayah Pematusan Surabaya Barat. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, *3*(1), 1. https://doi.org/10.12962/j12345678.v3i1.2562
Soemarto, C. D. (1987). *Hidrologi Teknik*. Usaha Nasional.
Soewarno. (1995). *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik Untuk Analisa Data*. Nova.
Sudipa, N., Mahendra, M. S., Adnyana, W. S., & Pujaastawa, I. B. (2020). Daya Dukung Air di Kawasan Pariwisata Nusa Penida, Bali. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, *7*(3), 117–123. https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2020.007.03.4
Sutapa, I. W. (2005). Kajian Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu Untuk Perhitungan Debit Banjir Rancangan Di Daerah Aliran Sungai Kodina. *Majalah Ilmiah Mektek*, *7*, 35–40.