BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Beton adalah gabungan dari beberapa bahan seperti semen, agregat kasar, agregat halus, air, serta bahan tambahan. Untuk membuat campuran beton yang baik, diperlukan memilih bahan-bahan yang tepat dalam proporsi yang benar, sehingga mendapatkan beton yang efisien. Ketika bahan-bahan ini dicampur bersama, mereka membentuk campuran beton yang mudah dicetak menjadi bentuk atau wadah sesuai yang diinginkan. Sifat terpenting dari beton adalah kekuatan tekanannya. Sifat ini erat kaitannya dengan sifat-sifat lain, artinya kekuatan tekan beton dipengaruhi oleh perbandingan air-semen, ukuran dan bentuk partikel agregat, serta usia beton. Salah satu bahan yang digunakan dalam membuat beton adalah air, dan standar utamanya adalah air tersebut harus bisa diminum. Didalam masa sekarang, dalam lingkup teknik sipil terkhusus pada negara maju ketersediaan air bersih sudah mereka pikirkan untuk kedepannya apakah masih tersedia untuk kebutuhan bahan pencampuran beton, terlebih lagi ditambah dengan semakin meningkatnya pembangunan infrastruktur. Data dari Organisasi Meteorologi Dunia PBB pada 2018, sebanyak 3,6 miliar penduduk tidak memiliki akses ke air bersih, setidaknya selama satu bulan per tahun. Diperparah dengan lebih dari lima miliar populasi di sunia akan menghadapi situasi dimana mereka akan mengalami kesulitan mengakses air bersih (tawar) pada 2050.

Indonesia adalah negara yang terdiri dari banyak pulau, sehingga setiap kota di Indonesia bisa terkena dampaknya. Setiap tahun, pembangunan infrastruktur terus berlangsung. Dalam situasi seperti ini, kemungkinan kebutuhan akan air bersih akan sulit terpenuhi dan dalam beberapa darerah untuk akses air bersihnya masih kurang tercukupi. Faktanya, saat ini banyak wilayah di kepulauan yang masih menggunakan air yang tercemar.

Untuk itu, dicoba menggunakan opsi lain yaitu air bekas dan air bekas yang dimaksud adalah air bekas wudhu. Banyak masjid yang menggunakan tampungan bak untuk menampung kembali air wudhu sehingga dapat digunakan untuk hal yang lainnya. Di Indonesia dengan mayoritas penduduk beragama islam sudah pasti disepanjang jalan dengan mudah menemukan masjid baik itu yang besar ataupun yang kecil.

Berdasarkan laporan Mastercard dan Crescent Rating tahun 2022, jumlah umat Muslim di dunia telah mencapai angka 2 miliar, tersebar di sekitar 200 negara, yang mencakup sekitar 25% dari total populasi global. Dalam konteks pendidikan, pendekatan yang menggabungkan unsur seni dan melibatkan siswa secara aktif melalui praktik langsung, kerja sama, serta integrasi nilai-nilai keagamaan, terbukti dapat membantu pemahaman terhadap konsep-konsep abstrak seperti kinematika. Sementara itu, menurut data dari Direktorat Jenderal Kependudukan dan Pencatatan Sipil (Dukcapil) Kementerian Dalam Negeri, jumlah penduduk Indonesia per Juni 2021 mencapai 272,23 juta jiwa. Dari jumlah tersebut, sekitar 236,53 juta jiwa atau 86,88% menganut agama Islam, menjadikan Islam sebagai agama mayoritas di Indonesia.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi sejauh mana karakteristik mekanik beton dapat dipengaruhi oleh penggunaan air bekas wudhu, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mampu meningkatkan mutu campuran beton dengan penambahan bahan tersebut.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah penelitian di atas, maka permasalahan yang muncul adalah:

1. Bagaimana karakteristik mikrostruktur beton yang dicampur dengan air bekas wudhu berdasarkan hasil analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)?
2. Bagaimana air bekas wudhu mempengaruhi reaksi semen dalam material beton ketika dilihat dari hasil analisis *Fourier Transform Infrared* (FTIR)?

C. Tujuan Penelitian

Sejalan dengan fokus kajian penelitian diatas, maka tujuan penelitian ini dikemukakan sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui karakteristik beton yang menggunakan air bekas wudhu sebagai air pencampur beton
2. Untuk menganalisis pengaruh air wudhu sebagai pereaksi semen dalam material beton.

D. Batasan Masalah

Agar pelaksanaan penelitin ini dapat berjalan secara terarah dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Beton yang digunakan dalam penelitian ini dicampur dengan air bekas wudhu, sementara proses perendaman sampel dilakukan menggunakan air tawar (air keran).
2. Benda uji yang dibuat berbentuk silinder dengan tiga variasi campuran, yaitu: beton normal (menggunakan 100% air keran), beton dengan campuran 50% air bekas wudhu, dan beton dengan campuran 100% air bekas wudhu.
3. Parameter utama yang diuji dari beton adalah kuat tekan, yang dianalisis pada umur beton 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.
4. Proses pembuatan beton dan pengujian kuat tekan dilaksanakan di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Parepare, sedangkan analisis mikrostruktur menggunakan XRD dan FTIR dilakukan di Laboratorium Fisika Material dan Energi, Universitas Hasanuddin.
5. Semua jenis beton dalam penelitian ini menggunakan semen Portland Komposit merek Tonasa sebagai bahan pengikat.
6. Pengujian mekanik (kuat tekan) dilaksanakan pada usia beton 7, 14, dan 28 hari.
7. Karakterisasi mikrostruktur beton dilakukan dengan menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) *dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR).

E. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini mungkin berguna dari perspektif akademis dan praktis yaitu sebagai berikut:

1. Agar dapat mengimplementasikan ilmu dan teori yang telah didapatkan di bangku perkuliahan, serta dapat menambah wawasan tentang Analisa Mikrostruktur Beton Menggunakan Air Bekas Wudhu.

2. Memberikan acuan atau referensi dan bahan kajian bagi upaya pengembangan pengetahuan lebih mengenai struktur beton.

F. Sistematika Penulisan

Secara umum, sistematika penulisan dalam skripsi ini terdiri atas lima bab utama yang dijabarkan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan gambaran umum mengenai latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat yang diharapkan, batasan masalah, serta sistematika penulisan skripsi secara keseluruhan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas landasan teori yang relevan dan mendukung penelitian, baik teori yang berkaitan dengan materi penelitian maupun metode analisis yang digunakan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci jenis penelitian yang dilakukan, lokasi dan waktu pelaksanaan, parameter yang diuji, tahapan-tahapan dalam metode penelitian, serta dilengkapi dengan bagan alir proses penelitian.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil-hasil yang diperoleh dari pengujian di laboratorium, yang ditampilkan dalam bentuk tabel, grafik, maupun ilustrasi, serta dilengkapi dengan analisis dan pembahasan yang mendalam terhadap temuan-temuan tersebut.

BAB V PENUTUP

Bab ini memuat kesimpulan dari keseluruhan hasil penelitian serta memberikan saran yang bersifat konstruktif sebagai masukan untuk penelitian selanjutnya atau penerapan hasil penelitian.

\

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Beton

Menurut SNI 2847:2013, beton merupakan campuran dari berbagai material penyusun, yaitu semen hidrolik (seperti semen Portland), agregat halus, agregat kasar, serta air, dengan kemungkinan penambahan bahan aditif. Campuran ini dirancang untuk menghasilkan massa padat setelah proses pengerasan. Pemahaman mengenai konsep beton juga dapat dikaitkan dengan pendekatan pembelajaran yang melibatkan partisipasi aktif siswa, seperti melalui praktik langsung, kerja sama kelompok, serta integrasi seni dalam proses pembelajaran. Pendekatan semacam ini terbukti efektif dalam memperkuat pemahaman terhadap konsep-konsep abstrak seperti kinematika, dan relevan pula dalam konteks studi beton. Secara khusus, umur beton 28 hari sering dijadikan acuan dalam pengujian karena pada fase ini beton umumnya telah mencapai kekuatan tekan maksimum. Inilah salah satu alasan utama mengapa beton banyak digunakan sebagai material struktural pada berbagai jenis bangunan, termasuk gedung bertingkat, jembatan, maupun infrastruktur jalan. Sementara itu, menurut definisi dari DPU-LPMB (Departemen Pekerjaan Umum – Lembaga Pengembangan Mutu Beton), beton adalah campuran dari semen Portland atau jenis semen hidrolik lainnya, agregat halus, agregat kasar, serta air, yang dapat ditambah bahan tambahan (aditif), dan akan membentuk massa padat setelah proses pengerasan berlangsung

Komposisi umum beton terdiri atas sekitar 15% semen, 8% air, 3% udara, dan sisanya berupa pasir dan kerikil. Setelah proses pengerasan selesai,

karakteristik beton akan sangat bergantung pada metode pembuatannya. Keterlibatan aktif dalam proses pembelajaran praktis, kerja sama tim, dan pendekatan kreatif turut membantu dalam memahami karakteristik beton, terutama pada aspek fisik dan mekaniknya, faktor-faktor ini dapat mempengaruhi performa dan kualitas akhir dari beton tersebut (Wuryati, 2001)

Menurut Nugraha (2007), beton yang baik ditandai dengan seluruh butiran agregat yang terbungkus sempurna oleh mortar. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi semen dalam campuran beton sangat menentukan mutu beton secara keseluruhan. Meskipun proporsinya hanya sekitar 7 hingga 15 persen dari total campuran, semen tetap menjadi komponen utama dalam pembuatan beton. Beton yang hanya mengandung sekitar 7 persen semen biasanya disebut sebagai beton kurus, sedangkan beton yang memiliki kadar semen lebih tinggi dikenal dengan istilah beton gemuk.

Menurut Mulyono (2006), secara garis besar beton dibedakan 2 jenis kelompok, yakni:

1. Beton berdasarkan kelas dan mutu beton.
    a. Beton kelas I merupakan beton yang diperuntukkan untuk pengerjaan yang tidak termasuk struktur utamanya. Untuk mengerjakan jenis beton ini tidak dibutuhkan keterampilan khusus. Pemeriksaan kualitas hanya dilakukan secara sederhana terhadap bahan-bahan yang digunakan, dan tidak wajib melakukan pengujian terhadap kekuatan tekan. Kualitas beton kelas I ditandai dengan B0.
    b. Beton kelas II umumnya digunakan dalam konstruksi struktural standar.

Proses pengerjaannya memerlukan tingkat keahlian yang memadai dan pelaksanaannya harus berada di bawah pengawasan tenaga profesional. Kategori ini mencakup beberapa mutu beton seperti B1, K-125, K-175, dan K-225. Untuk mutu B1, pengawasan difokuskan hanya pada kualitas bahan penyusun beton tanpa kewajiban melakukan uji kuat tekan. Sementara itu, untuk mutu K-125 dan K-175, pengujian kuat tekan harus dilakukan secara berkala melalui pengujian benda uji sebagai bagian dari kontrol mutu yang berkelanjutan.

2. Beton kelas III merupakan jenis beton yang digunakan untuk struktur dengan kekuatan yang tinggi yakni dengan mutu di atas K-225. Pekerjaan yang menggunakan beton kelas ini membutuhkan keahlian teknis khusus dan harus dilaksanakan di bawah pengawasan langsung dari tenaga ahli di bidang konstruksi. Salah satu persyaratan penting dalam pelaksanaannya adalah ketersediaan laboratorium beton yang dilengkapi dengan peralatan yang memadai, serta didukung oleh tenaga profesional yang kompeten dalam melakukan pengawasan mutu beton secara berkelanjutan. Berdasarkan jenisnya beton dibagi menjadi 4 jenis, yaitu:

   a. Beton ringan

      Beton ringan adalah jenis beton yang dirancang memiliki berat lebih rendah dibandingkan dengan beton konvensional. Hal ini dicapai melalui penggunaan agregat ringan sebagai material penyusunnya. Agregat ringan yang umum digunakan berasal dari hasil pembakaran material seperti shale, lempung, slate, sisa-sisa slag, residu batubara, serta material

vulkanik yang telah mengalami proses pembakaran. Berat jenis dari agregat ringan biasanya berada di sekitar 1900 kg/m³. Namun, untuk keperluan struktural, nilai ini umumnya berkisar antara 1440 hingga 1850 kg/m³. Beton ringan tetap mampu mencapai kekuatan tekan yang signifikan, yaitu lebih dari 17,2 MPa pada usia 28 hari.

b. Beton normal

Beton normal merupakan jenis beton yang disusun dari agregat halus berupa pasir dan agregat kasar berupa batu pecah. Kombinasi material ini menghasilkan beton dengan berat jenis berkisar antara 2200 hingga 2400 kg/m³. Dalam hal performa mekanis, beton normal mampu mencapai kuat tekan dalam rentang 15 hingga 40 MPa, tergantung pada mutu bahan penyusun serta proporsi campuran yang digunakan.

c. Beton berat

Beton berat adalah jenis beton yang disusun menggunakan agregat dengan berat jenis tinggi, sehingga menghasilkan beton dengan berat isi melebihi 2400 kg/m³. Agregat khusus seperti barit, magnetit, atau hematit sering digunakan dalam campuran beton jenis ini untuk meningkatkan massa jenisnya. Beton berat biasanya dimanfaatkan dalam konstruksi yang membutuhkan perlindungan terhadap radiasi atau dalam struktur yang memerlukan ketahanan terhadap gaya dinamis dan beban besar.

d. Beton massa (*massa concrete*)

Beton massa merupakan beton yang diaplikasikan pada proyek-proyek berskala besar yang memerlukan volume pengecoran dalam jumlah besar.

Jenis beton ini umum digunakan dalam pembangunan infrastruktur seperti bendungan, saluran irigasi, pondasi gedung bertingkat, dan struktur jembatan. Karena volumenya yang besar, pengendalian suhu dan proses hidrasi semen sangat penting untuk menghindari retak akibat penyusutan dan perubahan temperatur internal selama pengerasan.

Menurut Tjokrodimuljo (2007), beton memiliki sejumlah keunggulan dan kelemahan sebagai berikut:

a. Kelebihan

1) Relatif lebih murah karena menggunakan bahan-bahan umum yang mudah didapatkan.
2) Tahan lama, tahan terhadap abrasi, panas, dan korosi atau pembusukan akibat kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan menjadi lebih rendah.
3) Beton memiliki daya tahan tekan yang sangat tinggi, sehingga ketika dikombinasikan dengan material tulangan yang kuat terhadap tarik, keduanya mampu membentuk struktur yang memiliki ketahanan optimal baik terhadap gaya tekan maupun tarik. Karena itu, struktur beton bertulang sangat cocok diterapkan pada berbagai elemen konstruksi, seperti pondasi, kolom, balok, dinding, perkerasan jalan, landasan pesawat, tangki air, pelabuhan, bendungan, hingga jembatan dan struktur berat lainnya.
4) Bahan ini mudah dolah karena dapat dibentuk dan dicetak sesuai dengan bentuk dan ukuran yang diinginkan. Cetakan beton dapat

digunakan berulang kali, sehingga lebih efisien secara biaya.

b. Kekurangan

1) Bahan dasar yang digunakan dalam beton, seperti agregat halus dan kasar, bervariasi tergantung pada asal usulnya. Hal ini berarti metode perencanaan dan persiapan dapat berbeda.
2) Beton memiliki kelas kekuatan yang berbeda-beda, sehingga harus dirancang sesuai dengan bagian bangunan yang akan digunakan. Hal ini menyebabkan metode perencanaan dan konstruksi yang berbeda.
3) Beton memiliki kekuatan tarik yang rendah, sehingga rentan retak, patah, atau menjadi rapuh. Untuk mengatasi hal ini, metode seperti menambahkan baja penguat atau serat dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan tariknya.

Menurut Tjokrodimuljo (2007) beton memiliki beberapa sifat yang dimiliki dan sering dipergunakan untuk acuan adalah sebagai berikut ini.

1. Kekuatan

   Beton merupakan material yang bersifat getas, yang menyebabkan kuat tekan beton tinggi namun memiliki kuat tarik yang relatif rendah**.** Oleh karena itu, nilai kuat tekan menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi karakteristik dan kinerja keseluruhan dari beton.

Tabel 2.1. Beton menurut kuat tekannya (Tjokrodimuljo, 2007)

	Kuat Tekan (MPa)
Beton sederhana	≤10
Beton normal	15-30

Beton pra tegang	30-40
Beton kuat tekan tinggi	40-80
Beton kuat tekan sangat tinggi	> 80

2. Berat Jenis

Tabel 2.2 diuraikan mengenai berat jenis beton yang digunakanuntuk kontruksi bangunan.

Tabel 2.2. Berat jenis beton (Tjokrodimuljo, 2007)

Jenis beton	Berat jenis	Pemakaian
Beton sangat ringan	< 1,00	Non struktur
Beton ringan	1,00 - 2,00	Struktur ringan
Beton normal	2,30 - 2,40	Struktur
Beton berat	> 3,00	Perisai sinar X

B. Sifat Beton Segar

Sifat beton dalam keadaan segar memegang peranan penting karena berpengaruh langsung terhadap pemilihan metode pencampuran, alat pemadatan, serta dapat menemtukan kualitas akhir beton setelah mengeras. Dalam proses pembuatan beton, terdapat dua aspek utama yang harus dipenuhi. Pertama adalah karakteristik beton setelah mengeras dalam jangka panjang, seperti kekuatan tekan, daya tahan terhadap lingkungan, dan kestabilan volumenya. Kedua adalah perilaku beton saat masih dalam kondisi plastis, yakni kemudahan dalam pengerjaan (workability) tanpa menimbulkan segregasi atau bleeding.

Namun demikian, sifat-sifat beton segar tidak memiliki rumusan tunggal yang berlaku umum, karena sangat tergantung pada jenis bahan baku yang digunakan, serta kondisi cuaca dan lingkungan sekitar lokasi pengecoran. Sebagai contoh, campuran beton yang dirancang untuk pelat lantai mungkin tidak akan sesuai jika digunakan untuk pengecoran elemen struktur yang sempit dan penuh tulangan.

Perancangan campuran beton dilakukan dengan asumsi bahwa terdapat hubungan antara perilaku beton dalam kondisi segar dengan performanya setelah mengeras. Oleh karena itu, untuk menghasilkan beton berkualitas tinggi, proses pemadatan harus dilakukan secara merata di seluruh bagian cetakan. Pemahaman yang baik terhadap sifat-sifat beton, baik dalam kondisi segar maupun setelah mengeras, menjadi kunci utama keberhasilan dalam konstruksi beton.

Kemudahan pengerjaan dari suatu campuran beton ditentukan salah satunya melalui pengukutan nilai slump. Parameter ini menggambarkan sejauh mana beton segar dapat ditangani, ditempatkan dan dipadatkan tanpa mengalami segresi. Sifat ini dapat dijabarkan kedalam beberapa karakteristik yang lebih spesifik, yaitu:

1. Kemampuan untuk dipadatkan (compactibility): sejauh mana beton segar dapat dipadatkan hingga mencapai kepadatan maksimum tanpa kehilangan homogenitas.
2. Kemampuan untuk mengalir (mobility): menunjukkan seberapa mudah campuran beton mengalir dan menyebar di dalam cetakan atau bekisting.
3. Kemampuan untuk tetap seragam (stability): menggambarkan ketahanan campuran terhadap segregasi atau pemisahan material selama penanganan dan pengecoran.

Semua sifat yang diperlukan untuk campuran yang baik dipengaruhi oleh faktor internal dan eksternal.

1. Sifat kemudahan dipadatkan dan dialirkan

   Sifat mudah dipadatkan dan mudah dialirkan pada campuran beton segar saling berkaitan erat, bahkan dapat dikatakan bahwa campuran yang

mudah mengalir umumnya juga mudah untuk dipadatkan. Namun, untuk memahami perilaku aliran beton segar, prinsip-prinsip yang berlaku dalam ilmu aliran fluida seperti air atau gas tidak dapat diterapkan secara langsung. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik massa; air dan gas terdiri dari partikel atau molekul yang seragam ukurannya, sedangkan beton merupakan campuran heterogen dengan berbagai ukuran partikel. Salah satu parameter yang dapat mewakili kedua sifat tersebut adalah kekentalan campuran, meskipun kekentalan tidak sepenuhnya identik dengan tingkat kemudahan pengaliran. Untuk menilai kemudahan pengerjaan beton segar, umumnya digunakan metode pengujian slump test sebagai indikator praktis.

2. Sifat dapat bertahan seragam

   Sifat ini merupakan persyaratan penting untuk memastikan beton mencapai kekuatan maksimalnya. Sifat ini ditandai dengan stabilitas komposisi beton selama proses pengangkutan, pengecoran, hingga pemadatan. Gangguan terhadap stabilitas dapat terjadi apabila agregat kasar mengalami pemisahan dari pasta semen, atau ketika air dalam campuran naik ke permukaan dan terpisah dari bagian padat. Campuran yang tidak stabil umumnya menunjukkan gejala segregasi dan bleeding, yang dapat menurunkan kualitas dan kekuatan akhir beton.

   a. Pemisahan ini terjadi ketika daya kohesi campuran tidak cukup kuat untuk menjaga agregat kasar tetap tersebar secara merata didalam pasta semen. Akibatnya, agregat cenderung terpisah dan mengendap,

mengganggu proses pemadatan dan menyebabkan ketidakhomogenan struktur beton. Beton yang mengalami segregasi akan menunjukkan penurunan kualitas mekanis dan ketahanan jangka panjang. Untuk mengurangi potensi segregasi, diperlukan penyesuaian terhadap gradasi agregat dan proporsi semen dalam campuran, sehingga workability tetap terjaga namun tanpa mengorbankan stabilitas material.

b. Pemisahan air dari campuran

Pemisahan air dari campuran merupakan proses keluarnya air dari campuran beton ke permukaan akibat sedimentasi partikel padat. Hal ini sering terjadi setelah pengecoran ketika beton masih dalam keadaan plastis. Bleeding dapat menimbulkan genangan air pada permukaan beton dan menyebabkan kelemahan pada ikatan antara pasta semen dan agregat atau antara beton dan tulangan. Fenomena ini perlu dikendalikan karena berdampak negatif terhadap kekuatan permukaan beton dan durabilitas jangka panjangnya. Penggunaan bahan tambahan atau pengaturan rasio air-semen yang tepat dapat meminimalisir efek bleeding.

c. Penguapan dan susut plastis

Di wilayah beriklim torpis, tingginya suhu dan kelembapan dapat mempercepat proses penguapan air campuran beton segar. Kondisi ini menyebabkan campuran kehilangan keplastisannya lebih cepat sebelum proses pemadatan selesai secara optimal. Kecepatan

penguapan yang melebihi laju bleeding (keluarnya air ke permukaan) dapat menyebabkan retak susut plastis (plastic shrinkage cracks) dan berdampak negatif terhadap kualitas serta daya tahan beton. Oleh karena itu, perlindungan terhadap beton segar dengan metode curing yang tepat menjadi sangat penting, khususnya dalam kondisi cuaca panas dan berangin.

C. Sifat Mekanik Beton

Perilaku mekanik dari beton yang telah mengeras mencerminkan kapasitas material dalam menahan beban struktural secara optimal. Kinerja beton yang baik pada kondisi mengeras dicirikan oleh nilai kuat tekan yang tinggi, ketahanan tarik yang memadai, kemampuan deformasi (daktilitas) yang baik, serta daya tahan terhadap penetrasi air dan udara. Selain itu, beton yang ideal juga memiliki ketahanan terhadap serangan kimia seperti sulfat dan klorida, tingkat penyusutan yang rendah, serta ketahanan jangka panjang terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

1. Kuat tekan

Kuat tekan beton didefinisikan sebagai kemampuan maksimum beton dalam menahan beban tekan per satuan luas. Secara umum, nilai kuat tekan beton normal berada dalam rentang 20 hingga 40 MPa. Terdapat sejumlah faktor yang memengaruhi besar kecilnya kuat tekan beton, antara lain rasio air terhadap semen (water-cement ratio), karakteristik dan jenis agregat yang digunakan, komposisi campuran, tingkat workability (keluwesan) beton segar, metode dan kondisi perawatan (curing), serta umur beton itu sendiri. Di antara faktor-faktor tersebut, perbandingan air-

semen (w/c ratio) dianggap sebagai variabel yang paling berpengaruh terhadap performa kekuatan tekan beton.

Semakin kecil nilai rasio air terhadap semen (w/c), maka semakin sedikit volume air yang digunakan dalam campuran beton. Kondisi ini akan menghasilkan beton dengan kepadatan yang lebih tinggi dan, pada umumnya, kuat tekan yang lebih besar. Hubungan antara rasio air-semen dan kuat tekan beton telah menjadi prinsip dasar dalam teknologi beton. Nilai kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan yang tercantum dalam SNI 1974–2011 sebagai berikut:

$$Fc = \frac{P}{A} \quad \text{.....(1)}$$

Keterangan:

f'c = Kuat tekan beton (N/mm² atau MPa)

P = Beban maksimum saat pengujian (N)

A = Luas penampang benda uji yang menerima beban tekan (mm²)

Dalam penelitian ini, kuat tekan beton dinyatakan sebagai tegangan tekan maksimum yang dilambangkan dengan f'c, dan dinyatakan dalam satuan N/mm² atau MPa (Mega Pascal). Nilai tegangan maksimum ini diperoleh ketika beton mencapai regangan (εb) sebesar 0,002, yaitu titik di mana beton mulai mengalami deformasi maksimum sebelum kegagalan struktural terjadi.

2. Kuat Tarik Belah

Kekuatan tarik beton umumnya jauh lebih rendah dibandingkan dengan kuat tekannya, yaitu hanya berkisar antara 10 hingga 15 persen dari nilai kuat tekan. Hal ini disebabkan oleh keberadaan retak-retak mikro pada beton yang mempermudah terjadinya kegagalan saat menerima bebak tarik. Untuk mengetahui nilai kuat tarik belah beton, dapat digunakan persamaan sebabagi berikut:

$$f'sp = \frac{2\,P}{\pi LD} = \quad \text{..... (2)}$$

Dimana :

Fct = kuat tarik belah (MPa)

P = Beban uji maksimum (N)

L = Panjang benda uji (mm)

D = Diameter benda uji (mm)

3. Susut Beton

Susut beton merupakan perubahan volume yang terjadi tanpa adanya beban eksternal, melainkan disebabkan oleh hilangnya kadar air akibat penguapan selama proses pengeringan. Selain itu, susut juga dapat dipengaruhi oleh komposisi campuran beton serta perubahan sifat fisik dan kimia material seiring dengan waktu setelah beton mengalami proses pengerasan.

D. Kepadatan Beton

Kepadatan merupakan salah satu faktor penting untuk mencapai mutu beton yang optimal. Beberapa hal yang memengaruhi tingkat kepadatan beton antara lain:

1. Gradasi agregat

Tata susun butiran agregat memiliki peran penting dalam menentukan tingkat kepadatan dan kekuatan tekan beton. Agregat kasar alami seperti kerikil dengan bentuk bulat dan permukaan licin cenderung menghasilkan beton dengan kuat tekan yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh permukaan agregat yang halus, sehingga mengurangi kemampuan pasta semen untuk melekat secara optimal, berbeda dengan batu pecah yang memiliki permukaan lebih kasar dan bersudut tajam, sehingga meningkatkan ikatan antar komponen beton.

2. **Proporsi campuran**

   Proporsi atau perbandingan volume dari tiap bahan penyusun beton sangat berpengaruh terhadap kemudahan pengerjaan (workability) dan kepadatan akhir. Komposisi yang tepat akan menghasilkan beton yang lebih padat dan kokoh

3. **Kadar air**

   Kandungan air dalam campuran beton berkaitan erat dengan nilai w/c (water-cement ratio). Untuk mencapai beton yang padat dan minim pori, kadar air harus diatur agar nilai w/c tetap rendah, sehingga rongga-rongga dalam beton dapat ditekan seminimal mungkin.

E. Material Penyusun Beton

1. Agregat

Agregat merupakan komponen berbentuk butiran mineral alami yang berperan sebagai material pengisi dalam campuran beton atau mortar. Keberadaan agregat sangat krusial karena sifat dan karakteristiknya secara

langsung memengaruhi perilaku dan kualitas beton secara keseluruhan (Tjokrodimuljo, 1996).

Agregat juga merupakan material berbentuk butiran yang berasal dari batu pecah, kerikil, pasir atau jenis mineral padat lainnya. Material ini dapat diperoleh dari sumber alami maupun buatan, dan memiliki ukuran beragam mulai dari besar hingga kecil. Salah satu aspek penting dalam penggunaan agregat adalah gradasi, yaitu distribusi ukuran butiran agregat. Agregat dengan ukuran seragam cenderung menghasilkan volume pori yang lebih besar, sedangkan agregat dengan ukuran yang bervariasi dapat mengurangi volume pori karena partikel kecil dapat mengisi ruang kosong di antara partikel yang lebih besar. Dalam campuran beton, agregat yang memiliki tingkat kemampatan tinggi sangat diharapkan agar kebutuhan bahan pengikat seperti semen menjadi lebih sedikit, sehingga efisiensi material dan kekuatan beton dapat ditingkatkan.

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 03-2834-1992, agregat halus diklasifikasikan menurut distribusi ukuran butirannya ke dalam empat zona gradasi, yaitu: Zona I (gradasi kasar), Zona II (gradasi agak kasar), Zona III (gradasi agak halus), dan Zona IV (gradasi halus). Klasifikasi ini digunakan untuk menentukan kesesuaian agregat halus dalam campuran beton, terutama dalam kaitannya dengan workability dan kekuatan beton yang dihasilkan. Klasifikasi ini ditentukan berdasarkan persentase lolos ayakan standar dan ditampilkan dalam T**abel 2.3.** Sementara itu, distribusi gradasi untuk agregat kasar disajikan pada **Tabel 2.4,** yang mengikuti ketentuan ukuran maksimal

agregat dan proporsi lolos ayakan tertentu untuk menjamin kesesuaian dalam campuran beton.

Tabel 2.3. Batas-batas gradasi agregat halus (SNI 03-2834-1992)

Ukuran Saringan	Persentase Berat yang Lolos Saringan			
	Gradasi Zone I	Gradasi Zone II	Gradasi Zone III	Gradasi Zone IV
9,60 mm	100	100	100	100
4,80 mm	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,40 mm	60 – 95	75 – 95	85 – 95	95 – 95
1,20 mm	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,60 mm	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,30 mm	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15 mm	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

Tabel 2.4. Batas-batas gradasi agregat kasar (SNI 03-2834-1992)

Ukuran Saringan	Persentase Berat yang Lolos Saringan	
	5 mm sampai 38 mm	5 mm sampai 18 mm
38,0 mm	90 – 100	100
19,0 mm	35 – 70	90 – 100
9,6 mm	10 – 40	50 – 85
4,8 mm	0 – 5	0 – 10

Ukuran agregat umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok berdasarkan besar butirannya, yaitu:

a. Batu, apabila ukuran butir lebih dari 40 mm.

b. Kerikil**,** dengan ukuran butir antara 5 mm hingga 40 mm.

c. Pasir**,** apabila ukuran butir berada pada rentang 0,15 mm hingga 5 mm.

Agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton wajib memenuhi persyaratan ketahanan terhadap abrasi. Pengujian ini dilakukan menggunakan mesin Los Angeles, sebagaimana diatur dalam *Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia*. Nilai ketahanan abrasi yang diperbolehkan untuk agregat kasar dalam beton tercantum dalam Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Persyaratan kekerasan agregat kasar (SNI 03-2834-1992)

Kekuatan Beton	**Maksimum bagian yang hancur dengan Mesin Los Angeles, Lolos Ayakan 1,7 mm (%)**
Kelas I (sampai 10 MPa)	50
Kelas II (10 MPa – 20 MPa)	40
Kelas III (diatas 20 MPa)	27

2. Semen Portland

Semen merupakan material berbentuk bubuk halus yang berfungsi sebagai bahan pengikat antara agregat halus dan agregat kasar. Ketika dicampur dengan air, semen akan mengalami proses pengerasan secara bertahap dan berperan sebagai pengikat hidraulik. Campuran antara semen dan air disebut mortar, sedangkan apabila ditambahkan dengan agregat kasar seperti kerikil atau batu pecah, maka akan membentuk beton**.**

Peran utama semen adalah bereaksi dengan air untuk menghasilkan pasta semen, yang kemudian merekatkan partikel agregat menjadi satu kesatuan yang padat. Pasta ini juga berfungsi mengisi celah antar agregat sehingga struktur beton menjadi lebih solid. Meskipun porsi volume semen dalam beton hanya sekitar 10% dari total keseluruhan, perannya sangat krusial karena merupakan komponen aktif dalam pembentukan kekuatan beton. Semen juga merupakan bahan yang relatif lebih mahal dibandingkan dengan bahan penyusun lainnya, sehingga penggunaannya perlu direncanakan dan diteliti secara cermat.

Semen Portland pertama kali dikembangkan oleh Joseph Aspdin pada tahun 1824, seorang tukang batu asal Inggris. Nama "Portland" diberikan karena warna semen yang dihasilkan menyerupai batu alam dari Pulau

Portland.

Menurut Tjokroridimulyo (2004) komponen utama yang terdapat dalam semen dapat dikelompokkan ke dalam empat bagian antaranya :

a. Trikalsium silikat (C_3S) atau $3CaO \cdot SiO_2$ merupakan senyawa utama dalam semen yang bereaksi cepat dengan air. Reaksi hidrasi dari senyawa ini menghasilkan panas yang cukup tinggi, sehingga berperan penting dalam proses pengerasan awal beton, khususnya pada kurun waktu sebelum mencapai umur 14 hari.
b. Dikalsium silikat (C_2S) atau $2CaO \cdot SiO_2$ merupakan senyawa dalam semen yang bereaksi lebih lambat terhadap air dibandingkan trikalsium silikat. Senyawa ini berperan dominan dalam proses pengerasan semen setelah melewati hari ke-7, serta berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan akhir beton. Selain meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia, C_2S juga membantu mengurangi penyusutan yang terjadi selama proses pengeringan, sehingga meningkatkan stabilitas dimensi beton.
c. Trikalsium aluminat (C_3A) atau $3CaO \cdot Al_2O_3$ merupakan senyawa yang bertanggung jawab terhadap perkembangan kekuatan awal beton, khususnya dalam 24 jam pertama setelah pencampuran. Meskipun memberikan pengaruh signifikan terhadap percepatan pengerasan awal, kandungan C_3A dalam komposisi semen perlu dibatasi, idealnya tidak melebihi 10%. Hal ini karena kadar C_3A yang tinggi dapat menurunkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat, yang berpotensi merusak struktur beton dalam jangka panjang.

d. Tetrakalsium aluminoferrit (C_4AF) atau $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ merupakan senyawa yang memberikan kontribusi paling kecil terhadap kekuatan dan pengerasan semen dibandingkan senyawa lainnya. Keberadaan senyawa ini lebih berperan dalam memberikan warna abu-abu pada semen biasa. Dalam produksi semen putih, kadar besi yang rendah secara otomatis menurunkan jumlah C_4AF, yang secara tidak langsung dapat berkontribusi pada peningkatan kekuatan akhir semen karena berkurangnya senyawa yang tidak terlalu berpengaruh terhadap hidrasi.

Semen Portland diklasifikasikan ke dalam lima tipe utama sesuai dengan kebutuhan dan kondisi konstruksi sebagai berikut:

a. Tipe I, merupakan semen Portland yang dirancang untuk kebutuhan konstruksi umum tanpa persyaratan khusus. Jenis ini umum digunakan dalam pembangunan struktur bangunan yang tidak terpapar kondisi lingkungan ekstrem seperti serangan sulfat atau kebutuhan pengendalian panas hidrasi.
b. Tipe II, digunakan pada konstruksi yang memerlukan ketahanan sedang terhadap serangan sulfat dan pelepasan panas hidrasi yang tidak terlalu tinggi. Semen tipe ini sesuai untuk struktur yang berada di lingkungan yang agak agresif, seperti daerah dengan kandungan sulfat sedang dalam tanah atau air.
c. Tipe III, merupakan semen dengan laju pengerasan yang cepat dan menghasilkan kekuatan awal tinggi. Cocok diaplikasikan pada proyek yang membutuhkan kekuatan struktur dalam waktu singkat, seperti elemen

pracetak, perbaikan jalan, atau konstruksi dalam kondisi cuaca dingin.

d. Tipe IV, diperuntukkan bagi konstruksi dengan volume besar yang memerlukan pelepasan panas hidrasi rendah, misalnya pada pembangunan bendungan atau pondasi masif. Tujuan penggunaannya adalah untuk meminimalkan risiko retak akibat peningkatan suhu internal yang signifikan selama proses hidrasi.
e. Tipe V, jenis ini memiliki ketahanan tinggi terhadap serangan sulfat, sehingga sangat sesuai digunakan pada lingkungan dengan tingkat sulfat tinggi seperti tanah rawa, wilayah pesisir, atau area industri kimia yang korosif.

3. Air

Air merupakan elemen penting dalam pembentukan beton karena berperan dalam proses kimiawi dengan semen, yaitu reaksi hidrasi. Selain itu, air juga berfungsi sebagai pelumas yang membantu pergerakan partikel agregat dalam campuran, sehingga mempermudah proses pencampuran dan pemadatan. Untuk menunjang reaksi hidrasi secara optimal, dibutuhkan air sekitar 25% dari berat semen yang digunakan. Namun, secara praktik, beton segar umumnya memerlukan rasio air-semen minimal 35% agar tetap mudah diolah. Apabila rasio tersebut terlalu rendah, beton akan sulit dicetak dan setelah mengeras cenderung menjadi berpori dan memiliki kekuatan tekan yang rendah. Air tambahan yang digunakan di luar kebutuhan hidrasi berguna untuk memperoleh konsistensi campuran yang sesuai, tetapi kelebihan air tersebut akan menguap selama proses pengeringan atau tertinggal di dalam

struktur beton sebagai pori-pori mikroskopis, yang dapat memengaruhi kekuatan dan ketahanan beton jangka panjang.

Air dalam campuran beton memiliki peran penting dalam mengaktifkan proses hidrasi semen sebagai bahan pengikat, sekaligus berfungsi sebagai pelumas agar agregat mudah dicampur dan dibentuk. Mutu air yang digunakan sangat memengaruhi kualitas akhir beton. Kehadiran zat berbahaya seperti minyak, garam, atau bahan pencemar lainnya dalam air dapat menurunkan kekuatan beton secara signifikan. Umumnya, air yang memenuhi standar air minum dianggap aman dan sesuai untuk digunakan dalam pencampuran beton.

Peran air sangat penting dalam mencapai tingkat kelecakan yang diperlukan pada campuran beton. Volume air yang digunakan sangat ditentukan oleh sifat-sifat material penyusun beton. Jika air mengandung kotoran dalam jumlah yang cukup tinggi, hal tersebut dapat mengganggu proses pengerasan serta mengurangi ketahanan beton secara keseluruhan.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan terkait kualitas air antara lain: kandungan lumpur tidak melebihi 2 gram per liter, kandungan garam yang bersifat merusak maksimal 15 gram per liter, kadar klorida tidak lebih dari 0,5 gram per liter, serta kandungan sulfat maksimum 1 gram per liter. Secara umum, air dinilai layak digunakan sebagai campuran beton apabila mampu menghasilkan kuat tekan beton minimal 90% dari kuat tekan beton yang menggunakan air suling (Tjokrodimuljo, 1996). Jika kandungan sulfat dalam air melebihi batas tersebut, maka air tersebut tidak direkomendasikan untuk

digunakan dalam pencampuran beton.

Berdasarkan SNI S-04-1989-F, mutu air yang digunakan dalam pencampuran beton segar memiliki dampak signifikan terhadap kualitas beton yang dihasilkan. Air yang mengandung senyawa kimia seperti garam, minyak, atau bahan kimia lainnya dapat menurunkan kekuatan dan mutu beton. Oleh karena itu, tingkat keasaman (pH) air menjadi aspek penting yang harus diperhatikan secara serius.

Secara umum, air yang layak dikonsumsi atau air minum dianggap sesuai digunakan sebagai air pencampur beton. Namun demikian, terdapat beberapa jenis air lain yang dapat digunakan dengan syarat tertentu, antara lain:

a. Air hujan memiliki kemampuan menyerap gas dari atmosfer selama proses jatuh ke permukaan bumi. Umumnya, air hujan mengandung unsur-unsur seperti oksigen (O_2), nitrogen (N_2), dan karbon dioksida (CO_2) yang larut di dalamnya.
b. Air tanah biasanya mengandung unsur kation dan anion, seperti kalsium, magnesium, klorida, dan sulfat. Selain itu, dalam beberapa kasus, air tanah juga dapat mengandung karbon dioksida (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), dan amonia (NH_3).
c. Air permukaan, mencakup sumber-sumber seperti sungai, danau, genangan serta waduk. Air yang berasal dari sungai atau danau umunya digunakan sebagai bahan pencampur beton asalkan tidak terkontaminasi oleh limbah industri. Sebaliknya, air yang berasal dari rawa atau genangan

dengan kandungan zal alkali yang tinggi tidak direkomendasikan karena dapat merusak reaksi hidrasi semen dan menurunkan mutu beton.

d. Air laut. Air laut memiliki kandungan garam antara 30.000 hingga 36.000 mg/liter atau sekitar 3% hingga 3,6%. Jenis air ini hanya diperbolehkan untuk mencampur beton tanpa tulangan, karena kadar garam yang tinggi dapat menyebabkan korosi pada baja tulangan. Air laut dengan kandungan garam melebihi 3% umumnya tidak direkomendasikan karena risiko kerusakan struktural yang tinggi.

Dalam praktiknya, pemanfaatan air yang memenuhi standar dan ketetntuan teknis beton seringkali sulit dilakukan karena keterbatasan sumber daya alam di lapangan. Akibatnya, air yang digunakan sebagai bahan pencampur betin seringkali tidak lagi sesuai dengan peraturan yang berlaku, baik yang ditetapkan oleh pemerintah maupun lembaga teknis terkait. Di banyak proyek konstruksi, para pekerja atau tukang cenderung menggunakan sumber air yang tersedia di sekitar lokasi pekerjaan tanpa mempertimbangkan apakah kualitas air tersebut memenuhi standar teknis yang telah ditentukan, serta tanpa menyadari potensi dampak negatif dari penggunaannya terhadap mutu beton yang dihasilkan.

Air yang digunakan dalam pencampuran beton harus memenuhi kriteria tertentu agar tidak memengaruhi proses hidrasi dan kekuatan akhir beton. Berdasarkan standar British Standard (BS 3148:1980) sebagaimana dijelaskan oleh Mulyono (2003) berikut adalah beberapa syarat mutu air pencampur beton, antara lain:

a. Garam Organik. Air pencampur beton dapat mengandung berbagai ion terlarut seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), natrium (Na^{+}), kalium (K^{+}), bikarbonat (HCO_3^{-}), sulfat (SO_4^{2-}), klorida (Cl^{-}), dan nitrat (NO_3^{-})**.** Gabungan konsentrasi dari ion-ion tersebut sebaiknya tidak melebihi 2000 mg/l agar tidak mengganggu proses kimiawi selama hidrasi semen. Kelebihan kandungan ion dapat menyebabkan gangguan pada waktu ikat (setting time) dan menurunkan kuat tekan beton**,** karena dapat menghambat pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berperan penting dalam kekuatan akhir beton.
b. NaCl dan Sulfat. Batas maksimum kandungan NaCl dalam air campuran beton adalah 20.000 ppm**.** NaCl yang berlebihan dapat menyebabkan beton bersifat higroskopis, dan ketika bereaksi dengan agregat yang mengandung alkali, dapat mengakibatkan beton mengembang**.** Selain itu, kandungan sulfat yang tinggi berpotensi menurunkan daya tahan atau keawetan beton.
c. Air asam. Air yang memiliki pH di bawah 3,0 (bersifat sangat asam) dapat menyulitkan proses pengolahan dan pengerjaan beton karena dapat mengganggu reaksi kimia dalam campuran.
d. Air basa. Air yang mengandung Natrium Hidroksida (NaOH) dalam kadar kurang dari 0,5% dari berat semen dianggap tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan beton. Namun, jika kadar tersebut melebihi 0,5%, maka kekuatan tekan beton dapat menurun secara signifikan.
e. Air gula. Penambahan zat gula dalam campuran beton dengan konsentrasi lebih dari 0,25% dapat mengakibatkan penundaan waktu ikat pada semen,

serta berkontribusi terhadap penurunan kekuatan akhir beton.

f. Air yang mengandung minyak tananh atau senyawa hidrokarbon lainnya lebih dari 2% dari total volume dapat menyebabkan penurunan kuat tekan beton hingga 20%. Hal ini terjadi karena kontaminan minyak mengganggu interaksi antara pasta semen dan agregat, serta menghambat proses hidrasi semen. Oleh karena itu, air yang tercemar minyak tidak direkomendasikan untuk digunakan dalam pencampuran beton, terutama pada struktur yang menuntut daya tahan tinggi.

g. Rumpur laut. Air laut yang tercampur dengan rumput laut atau material organik laut lainnya dapat menurunkan daya rekat pasta semen**,** menyebabkan terbentuknya gelembung udara**,** dan menjadikan beton keropos, sehingga menurunkan kekuatan strukturalnya.

h. Zat-zat organik. Air yang mengandung zat-zat organik seperti senyawa humat, vulvat atau partikel lumpur halus dapat menghambat proses hidrasi semen. Gangguan ini berpotensi menurunkan ikatan antar partikel dalam pasta semen, terutama jika agregat yang digunakan mengandung kadar alkali tinggi. Interaksi antara alkali dan senyawa organik dapat memicu reaksi ekspansif dalam beton, yang menyebabkan pengembangan volume dan retak-retak dini pada struktur. Untuk menghindari risiko tersebut, air yang mengandung lumpur halus wajib diendapkan terlebih dahulu sebelum digunakan, guna meminimalkan gangguan terhadap reaksi hidrasi

i. Air limbah. Air limbah pada umumnya mengandung sekitar 400 ppm senyawa organik**.** Agar dapat digunakan sebagai campuran beton,

kandungan senyawa organik tersebut harus diencerkan atau dinetralisir terlebih dahulu hingga mencapai batas maksimum 20 ppm**.**

F. Pengamatan Miksrostruktur Beton Dengan Menggunakan XRD dan FTIR

1. *X-Ray Diffraction* (XRD)

Analisis terhadap mikrostruktur material memiliki peranan penting dalam pengujian karena struktur internal suatu bahan sangat memengaruhi sifat fisik, mekanik, maupun termalnya. Melalui pengamatan terhadap bentuk dan susunan mikrostruktur, dapat diperoleh informasi mengenai kemampuan suatu material untuk diproses atau dikerjakan lebih lanjut.

Salah satu metode karakterisasi material yang umum digunakan adalah *X-Ray Diffraction* (XRD). Teknik ini berfungsi untuk mengidentifikasi struktur kristal serta ukuran butir kristal dari bahan padat. Setiap material yang memiliki sifat kristalin akan menunjukkan pola difraksi sinar-X yang unik dan spesifik dalam bentuk puncak-puncak (peaks) pada grafik hasil analisis, yang mencerminkan jenis dan susunan fase kristalnya.

Metode *X-ray Diffraction* (XRD) secara luas digunakan untuk mengidentifikasi senyawa kristalin dalam suatu material padat yang belum diketahui komposisinya. Identifikasi ini dilakukan dengan membandingkan pola difraksi yang dihasilkan dengan database standar dari *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) yang tersedia dalam bentuk *Powder Diffraction File* (PDF)**.**

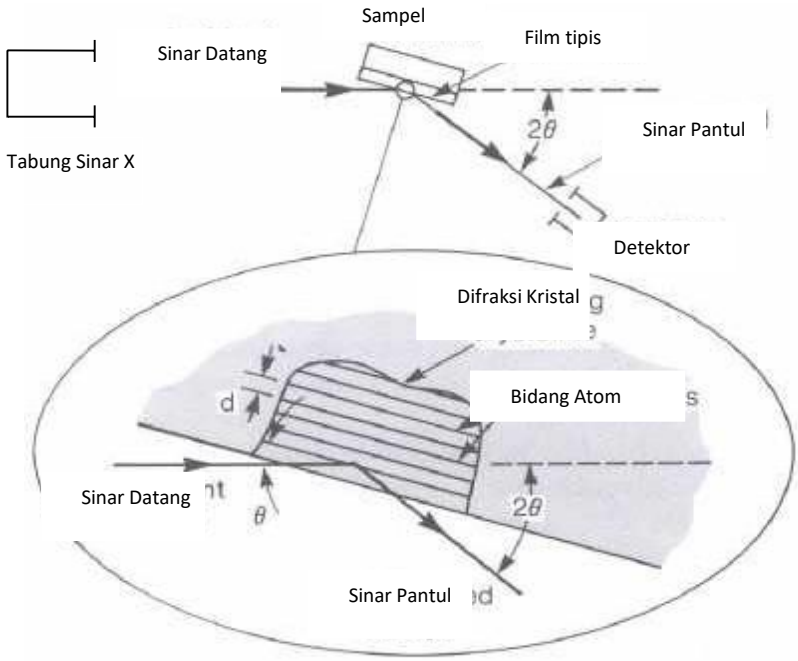
XRD bekerja menggunakan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang sangat pendek, yaitu berkisar antara 0,5 hingga 2,5 Ångström, yang sebanding dengan jarak antar atom dalam struktur kristal. Sinar-X yang sejajar dan monokromatik diarahkan ke permukaan sampel; ketika mengenai atom-atom dalam kisi kristal, sinar tersebut akan diserap sebagian dan dihamburkan ke berbagai arah.

Hasil dari proses ini adalah pola difraksi sinar-X, yang dapat digunakan untuk memperoleh informasi berikut:

a. Panjang gelombang sinar-X (λ) yang digunakan dalam analisis,
b. Orde difraksi (n) yang berkaitan dengan intensitas pembiasan, dan
c. Sudut difraksi (θ) antara sinar datang dengan bidang kristal.

Dasar teori dari proses ini merujuk pada persamaan Bragg, yang menyatakan bahwa sinar-X akan mengalami difraksi jika panjang gelombangnya sesuai dengan jarak antar bidang kristal (d) dalam material. Sinar-X yang dibiaskan ini kemudian diterima oleh detektor dan ditampilkan sebagai puncak-puncak (peaks) pada pola difraksi. Setiap puncak mencerminkan satu jenis bidang kristal dengan orientasi tertentu dalam struktur tiga dimensi.

Semakin banyak dan beragam bidang kristal dalam sampel, semakin banyak pula puncak difraksi yang dihasilkan, serta semakin besar intensitasnya. Visualisasi mengenai cara kerja alat ini umumnya ditunjukkan melalui skema eksperimen XRD, yang menggambarkan bagaimana sinar-X berinteraksi dengan kisi kristal dan bagaimana detektor menangkap pantulan difraksinya.



Gambar 2.1. Skema dasar percobaan XRD
(sumber:Lab Pengujian XRD)

2. *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Ketika gelombang elektromagnetik mengenai suatu material, terjadi interaksi berupa penyerapan energi oleh atom atau molekul di dalam material tersebut. Pada daerah panjang gelombang ultraviolet (UV) dan cahaya tampak**,** penyerapan energi ini akan menyebabkan eksitasi elektron ke tingkat energi yang lebih tinggi. Sementara itu, radiasi inframerah tidak

memiliki cukup energi untuk mengeksitasi elektron, tetapi dapat meningkatkan vibrasi atau getaran antar atom dalam suatu molekul**.** Menariknya, setiap senyawa memiliki pola penyerapan khas pada panjang gelombang tertentu, yang bergantung pada struktur kimianya**.** Pola penyerapan unik inilah yang menjadi dasar dalam teknik spektroskopi**,** baik spektroskopi atom maupun molekul, yang sangat berguna dalam analisis struktur dan komposisi zat dalam berbagai bidang ilmu.

Salah satu teknik spektrokospi yang banyak digunakan adalah FTIR *(Fourier Transform Infrared)*, yaitu suatu metode spektroskopi inframerah yang memanfaatkan transformasi Fourier untuk mengolah dan menganalisis spektrum yang dihasilkan. Teknik ini termasuk dalam kategori spektroskopi absorpsi, yang prinsip kerjanya didasarkan pada perbedaan tingkat penyerapan radiasi inframerah oleh suatu senyawa. Penyerapan sinyal inframerah oleh suatu materi hanya akan terjadi apabila dua syarat terpenuhi: pertama, frekuensi radiasi inframerah harus sesuai dengan frekuensi vibrasi molekul pada sampel; dan kedua, selama proses vibrasi terjadi perubahan momen dipol dalam molekul tersebut.

Pengukuran dengan spektroskopi inframerah dilakukan pada wilayah inframerah tengah, yang mencakup panjang gelombang antara 2,5 hingga 50 mikrometer atau setara dengan bilangan gelombang 4000 hingga 200 cm^{-1}. Rentang ini sangat efektif untuk mengidentifikasi senyawa organik. Ketika senyawa organik menerima energi dari radiasi inframerah, maka akan terjadi proses penyerapan frekuensi tertentu sesuai dengan

karakteristik ikatan dalam molekul tersebut. Intensitas penyerapan ini diukur dalam satuan persen transmitansi. Nilai transmitansi sebesar 100% menunjukkan bahwa tidak ada radiasi inframerah yang diserap, sedangkan nilai transmitansi sebesar 5% menunjukkan bahwa hampir seluruh radiasi inframerah yang dilewatkan telah diserap oleh senyawa dalam sampel tersebut (Dachriyanus, 2004).

G. Kajian Hasil Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian sebelumnya dijadikan sebagai bahan perbandingan sekaligus referensi untuk mendukung landasan teori dalam penelitian ini. Selain itu, tinjauan terhadap penelitian terdahulu juga bertujuan untuk menghindari adanya kesamaan hipotesis dan memastikan orisinalitas topik yang diangkat. Oleh karena itu, peneliti mencantumkan beberapa hasil penelitian terdahulu yang relevan sebagai berikut:

1. Mansyur (2013) melakukan penelitian berjudul "Perilaku Mekanik Beton yang Menggunakan Air Laut". Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan air laut sebagai bahan pencampur dalam beton. Hasil yang diperoleh menunjukkan hal-hal berikut: Beton yang menggunakan air laut menghasilkan kuat tekan sebesar 44,88 MPa dan modulus elastisitas sebesar 32.209,46 MPa pada umur 28 hari. Sementara itu, beton dengan campuran air tawar memiliki kuat tekan 44,03 MPa dan modulus elastisitas 31.804,47 MPa pada umur yang sama. Perbedaan ini dianggap tidak signifikan karena kedua beton menggunakan rasio air-semen (w/c) yang sama. Dalam beton yang menggunakan air laut, terbentuk senyawa garam Friedel akibat reaksi antara ion

klorida dan senyawa kalsium dalam semen. Garam Friedel ini mengikat ion klorida bebas dan mengisi pori-pori beton, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan kerapatan beton. Konsentrasi garam Friedel meningkat secara bertahap dan mencapai 7,71% pada hari ke-28. Sebaliknya, kandungan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) mengalami penurunan menjadi 6,81% karena bereaksi dengan ion klorida. Kandungan klorida dalam air laut Barombong tercatat sebesar 0,19% terhadap berat semen dalam campuran, masih di bawah batas maksimum 0,4% yang ditetapkan oleh British Standard. Hal ini menunjukkan bahwa air laut dari lokasi tersebut dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam produksi beton selama kadar kloridanya memenuhi standar yang ditetapkan.

2. Sri Fatonatut Toharoh, Nugrahani Primary P., dan Lydia Rohmawati (2015) melakukan penelitian berjudul Analisis Mikrostruktur dan Nilai Rendaman pada Beton Geopolimer Berbasis Resin Epoksi dengan Filler SiO_2 dan $CaCO_3$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rendaman beton polimer berada dalam rentang 1,478 – 23,210 N·s/m, dengan nilai loss factor antara 0,516% – 5,255%. Modulus elastisitasnya berkisar antara 34,445 – 90,824 GPa, dengan degradasi sebesar 0,25% – 6,69%. Dari segi morfologi, penyebaran filler dalam beton polimer terlihat tidak merata. Komposisi terbaik dalam pengujian korosi dan elastisitas diperoleh pada beton polimer dengan komposisi 10% berat filler. Sementara itu, nilai rendaman dan loss factor tertinggi dicapai pada beton polimer dengan komposisi 20% berat filler.
3. Hartini (2017) melakukan penelitian berjudul Analisa Mikrostruktur Beton dengan Air Laut sebagai Air Pencampur dan Air Perendaman pada Self

Compacting Concrete (SCC). Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penggunaan air laut terhadap struktur mikro beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa: reaksi antara komponen utama semen, yaitu dikalsium silikat dan trikalsium silikat, dengan air laut membentuk senyawa tobermorite dan portlandite. Terbentuk pula garam Friedel dan ettringite sebagai hasil reaksi hidrasi semen dengan ion klorida dan sulfat yang terkandung dalam air laut. Senyawa-senyawa ini mengisi pori-pori beton setelah mengalami kristalisasi. Meskipun terjadi pembentukan senyawa tambahan tersebut, tidak ditemukan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kuat tekan maupun modulus elastisitas dari beton yang dihasilkan.

4. Ardianto Soamole, Mufti Amir Sultan, Arbain Tata (2022) melakukan penelitian tentang Efek Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Mortar Semen dengan Penambahan *Fly Ash.* Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fly ash dalam campuran mortar memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik mekanik material tersebut. Proporsi optimal fly ash ditemukan sebesar 20% dari berat semen, di mana komposisi ini menghasilkan peningkatan kuat tekan yang paling stabil dan efisien. Selain itu, perlakuan pemanasan hingga suhu 300°C terbukti memberikan dampak positif terhadap peningkatan kuat tekan pada seluruh jenis variasi mortar yang diuji. Perubahan struktur mikro akibat pemanasan diamati menggunakan uji SEM (Scanning Electron Microscope), yang menunjukkan bahwa pada suhu 300°C, tekstur mortar menjadi lebih padat dan solid. Hal ini mengindikasikan bahwa pemanasan dalam batas suhu tertentu mampu memperkuat struktur internal mortar melalui pengurangan porositas.

Dukungan dari analisis XRD juga menunjukkan bahwa sampel dengan komposisi fly ash 20% dan dipanaskan hingga 300°C (kode sampel MF-20:300) memiliki susunan unsur yang lebih stabil dan menguntungkan. Kandungan unsur karbon (C) yang dapat mengganggu proses penguatan tercatat dalam kadar rendah, sementara unsur-unsur seperti aluminium (Al), silikon (Si), dan besi (Fe) yang berperan meningkatkan fleksibilitas dan kekuatan mortar, berada pada komposisi yang optimal. Hasil ini membuktikan bahwa kombinasi antara fly ash dan perlakuan panas dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan mutu mortar secara efektif, baik dari segi kekuatan mekanik maupun karakteristik mikrostrukturnya.

5. Cut Yusnar, Syukur Hidayat (2017) melakukan penelitian mengenai Investigasi Kekuatan Beton Silinder Geopolimer Abu Ampas Tebu. Berdasarkan penelitian mereka menemukan bahwa dalam mikrostrktur sampel uji yang mengandung bahan pengisi pozzolanik, terdapat ikatan C-S-H yang khas. Mereka mengamati tiga jenis ikatan C-S-H: tipe I (acicular), tipe II (honeycomb), dan tipe III (compact). Mereka juga menemukan kristal hidroksida kalsium heksagonal. Pada sampel kontrol (yang tidak menggunakan SiCO2), uji SEM menunjukkan hanya ikatan C-S-H tipe III dan hidroksida kalsium, tetapi tidak dalam bentuk kristalin.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian kuantitatif yaitu jenis penelitian yang menitikberatkan pada pengolahan dan analisis data numerik. Seluruh tahapan mulai dari proses pengumpulan data, interpretasi hasil, hingga penyajian data dilakukan dalam bentuk angka dan divisualisasikan melalui tabel, grafik, atau gambar untuk mendukung pemahaman hasil secara objektif. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis berdasarkan prosedur yang berlaku dalam pengujian laboratorium. Adapun metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental, yaitu pendekatan yang bertujuan untuk mengamati pengaruh variabel tertentu terhadap objek yang diuji. Dalam konteks penelitian ini, dilakukan pembandingan terhadap tiga variasi campuran beton guna mengevaluasi perbedaan karakteristik kuat tekan, serta mikrostruktur dari beton yang telah dibuat. Melalui metode ini, diperoleh pemahaman mendalam mengenai bagaimana masing-masing variasi campuran memengaruhi performa beton secara mekanis dan struktural.

B. Lokasi dan Waktu Penelitian

Sesuai dengan tujuan penelitian, studi ini difokuskan pada pengujian mikrostruktur beton. Proses pembuatan sampel beton dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Parepare yang berlokasi di Jl. Jend. Ahmad Yani Km. 6, Kelurahan Bukit Harapan,

Kecamatan Soreang, Kota Parepare. Sementara itu, pengujian karakteristik mikrostruktur menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) dilakukan di Laboratorium Fisika Material dan Energi, Universitas Hasanuddin, Makassar. Penelitian ini dilaksanakan selama tiga bulan.

Tabel 3.1 Time Schedule Perencanaan Pra Penelitian

No	Kegiatan	Waktu																			
		Februari				Maret				April				Mei				Juni			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Identifikasi masalah dan tujuan penelitian																				
2	Studi literature																				
3	Persiapan alat dan bahan																				
4	Pembuatan sampel penelitian																				
5	Analisa laboratorium																				
6	Pengumpulan data - Sekunder - primer																				
7	Pengolahan dan penyusunan analisis data																				
8	penyusunan kesimpulan laporan																				
9	Penulisan laporan akhir																				

C. Alat dan Bahan

1. Alat Penelitian

a. Saringan

1) Saringan untuk agregat halus (pasir) digunakan saringan dengan nomor berturut-turut: 4,75 mm (No. 4), 2,40 mm (No. 8), 1,20 mm (No. 16), 0,60 mm (No. 30), 0,30 mm (No. 50), 0,15 mm (No. 100).
2) Saringan No. 200 yang dilengkapi dengan tutup pan dan alat penggetar, digunakan untuk mengetahui gradasi agregat halus (pasir) secara lebih akurat, terutama pada fraksi yang sangat halus.
3) Saringan untuk agregat kasar (kerikil) digunakan saringan dengan nomor berturut-turut: 56,25 mm (No. 1½), 37,50 mm (No. 1), 19,05 mm (No. ¾), 9,60 mm (No. ⅜), 4,75 mm (No. 4) dilengkapi tutup pan dan alat penggetar untuk memperoleh distribusi ukuran partikel agregat kasar secara akurat.

b. Oven

Digunakan untuk proses pengeringan agregat, khususnya saat pengujian kadar air dan berat jenis.

c. Gelas Ukur

Berfungsi untuk menentukan volume air yang dibutuhkan dalam proses pencampuran beton.

d. Timbangan

Digunakan untuk menakar setiap bahan yang digunakan dalam pembuatan benda uji.

e. Cetakan Beton

Benda uji dicetak menggunakan cetakan silinder berukuran 150 mm x 300 mm.

f. Concrete mixer / mesin pencampur

Berfungsi untuk mencampur semua bahan pembuatan benda uji secara merata.

g. Piknometer

Digunakan untuk menentukan jenis agregat halus dengan kapasitas 500 gram.

h. Jangka sorong

digunakan untuk mengukur dimensi benda uji presisi.

i. Kerucut *abrams.*

Digunakan untuk mengukur nilai kelecakan (slump) adukan beton.

j. Penggaris

Digunakan bersamaan dengan kerucut *abrams* untuk mengukur tinggi slump.

k. Batang baja

Digunakan untuk memadatkan adukan beton dalam cetakan.

l. *Universal Testing Machine*

Mesin uji tekan yang digunakan untuk menguji kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas beton.

m. Mesin Los Angeles

Digunakan untuk menguji ketahanan keausan agregat dilengkapi dengan bola-bola baja sebagai media penggosok.

n. Alat *X-Ray Diffraction* (XRD)

Digunakan untuk megnidentifikasi dan menganalisis pada suatu material dalam bentuk serbuk atau padatan baik kristalin maupun amorf.

o. Alat *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Digunakan untuk menganalisis struktur molekul dengan menyinari sampel menggunakan sinar inframerah yang kemudian akan diserap dan memicu vibrasi (getaran) molekul.

2. Bahan Penelitian

a. Agregat

Penelitian ini menggunakan dua jenis agregat yaitu, agregat halus dan agregat kasar sebagai komponen utama dalam pembuatan campuran beton.

b. Semen

Jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen Portland tipe I yang umum digunakan dalam pembuatan beton untuk keperluan konstruksi umum.

c. Air

Air yang digunakan da;am pencampuran beton berasal dari air bekas wudhu yang diperoleh dari tempat ibadah sepeperti masjid atau mushola yang berada di lingkungan Universitas Muhammadiyah Parepare.

D. Prosedur Standar Penelitian

1. Pemeriksaan Berat Jenis Agregat

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis agregat dan tingkat penyerapan air oleh agregat halus yang digunakan dalam campuran beton mengacu pada standar SNI 03-1969-1990.

Adapun penjelasan dari masing-masing parameter adalah sebagai berikut:

a. Berat jenis kering permukaan (*Bulk Specific Grafity*)

   Merupakan perbandingan antara berat agregat dalam kondisi kering oven dengan berat air yang volumenya sama dengan volume agregat dalam kondisi jenuh dan kering permukaan pada suhu tertentu.

b. Berat jenis permukaan (SSD)

   Berat jenis SSD adalah perbandingan antara berat agregat dalam kondisi jenuh dan kering permukaan (SSD) dengan berat air yang volumenya setara dengan volume agregat SSD pada suhu tertentu.

c. Berat jenis semu (Apparent Specific Grafity)

   Berat jenis semu merupakan perbandingan antara berat agregat kering dengan berat air yang volumenya sama dengan volume agregat padat tidak termasuk pori-pori yang dapat menyerap air.

d. Penyerapan

   Penyerapan adalah persentase berat air yang diserap oleh pori-pori agregat terhadap berat agregat dalam kondisi kering. Nilai ini menunjukkan sejauh mana kemampuan agregat menyerap air yang dapat memengaruhi kebutuhan air dalam pencampuran beton.

   Adapun prosedur percobaan adalah sebagai berikut :

a. Benda uji terlebih dahulu dicuci untuk menghilangkan kotoran atau partikel asing yang mungkin menempel di permukaannya.
b. Setelah dibersihkan, benda uji dikeringkan dalam oven dengan suhu 105°C hingga diperoleh berat yang stabil (tidak berubah lagi meski dikeringkan lebih lanjut).
c. Benda uji yang telah dikeringkan kemudian didinginkan pada suhu ruang selama kurang lebih satu jam. Setelah itu, dilakukan penimbangan dengan ketelitian 0,5 gram untuk mendapatkan berat kering oven (Bk).
d. Selanjutnya, benda uji direndam dalam air bersuhu ruang selama beberapa waktu agar air dapat mengisi seluruh pori-pori di dalam agregat.
e. Setelah proses perendaman, benda uji diangkat lalu dikeringkan menggunakan kain penyerap hingga mencapai kondisi jenuh kering permukaan (SSD). Untuk agregat kasar, pengeringan dilakukan satu per satu agar lebih akurat.
f. Setelah berada dalam kondisi SSD, benda uji kembali ditimbang untuk memperoleh nilai berat SSD (Bj).
g. Kemudian, benda uji ditempatkan dalam keranjang dan digoyangkan secara perlahan guna mengeluarkan udara yang mungkin terperangkap. Setelah itu, benda uji ditimbang dalam air untuk memperoleh berat dalam air (Ba).
h. Pengukuran suhu air dilakukan untuk memastikan bahwa hasil pengujian dapat disesuaikan terhadap suhu standar, yaitu 25°C.

2. Perkiraan Kadar Agregat

a. Perkiraan kadar agregat kasar

Agregat kasar dengan ukuran nominal maksimum serta gradasi yang seragam pada umumnya dapat menghasilkan beton dengan tingkat kemudahan pengerjaan (workability) yang baik, apabila digunakan dalam jumlah volume tertentu dan dalam kondisi kering oven untuk setiap satuan volume beton.

Pada kondisi tertentu, seperti ketika pengecoran dilakukan dengan menggunakan pompa beton atau saat pemasangan beton di area yang memiliki kepadatan tulangan tinggi, volume agregat kasar dapat dikurangi sebesar 10% dari nilai standar yang tertera dalam **Tabel 3.1.** Pengurangan ini bertujuan untuk meningkatkan kelancaran saat pengecoran dan penempatan beton di cetakan yang sempit. Namun demikian, penyesuaian volume agregat kasar harus dilakukan secara hati-hati untuk memastikan bahwa hasil pengujian slump, rasio air-semen (w/c), serta kekuatan tekan beton tetap berada dalam batas yang direkomendasikan oleh standar dan tetap memenuhi spesifikasi teknis proyek yang sedang dilaksanakan. Selanjutnya, pada **Tabel 3.1** akan disajikan data mengenai volume agregat kasar per satuan volume beton, sebagai acuan dalam menentukan kebutuhan campuran agregat kasar pada berbagai kondisi pengecoran.

Tabel 3.2. Volume agregat kasar per satuan volume beton (*Sumber: SNI 7656:2012*)

Ukuran nominal agregat maksimum (mm)	**Volume agregat kasar kering oven (SSD) per satuan volume beton untuk berbagai modulus kehalusan dari agregat halus**			
	2,40	**2,60**	**2,80**	**3,00**
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44

12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Pemilihan volume ini didasarkan pada hubungan empiris guna menghasilkan beton dengan tingkat kemudahan pengerjaan yang sesuai untuk kebutuhan konstruksi secara umum. Pada beton dengan konsistensi lebih kaku (kelecakan rendah), seperti yang digunakan pada pekerjaan perkerasan lantai (pavement), volume agregat dapat ditingkatkan sekitar 10%.

b. Perkiraan kadar agregat halus

Penentuan jumlah agregat halus dalam campuran beton dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu berdasarkan metode berat atau metode volume absolut. Apabila berat beton segar per satuan volume telah diketahui atau dapat diestimasi berdasarkan pengalaman sebelumnya, maka jumlah agregat halus yang dibutuhkan dapat dihitung dengan mengurangkan berat total bahan lain (semen, air, dan agregat kasar) dari berat beton segar tersebut. Dalam praktiknya, informasi mengenai berat satuan beton segar biasanya telah tersedia dengan tingkat ketelitian yang memadai, terutama jika menggunakan bahan-bahan yang sama seperti pada proyek sebelumnya. Namun, apabila data tersebut tidak tersedia, maka **Tabel 3.2** dapat dimanfaatkan sebagai perkiraan awal untuk menentukan nilai berat beton per meter kubik. Meskipun taksiran awal ini bersifat kasar, namun perbandingan campuran yang dihasilkan masih dapat dianggap cukup akurat untuk digunakan sebagai dasar. Selanjutnya,

penyesuaian campuran dapat dilakukan dengan mudah melalui percobaan campuran (trial mix) untuk memperoleh hasil yang lebih tepat dan sesuai dengan kebutuhan mutu beton yang diinginkan.

Tabel 3.3 Perkiraan awal berat beton segar (*Sumber: SNI 7656:2012*)

Ukuran nominal maksimum agregat (mm)	Perkiraan awal berat beton, kg/m^3	
	Beton tanpa tambahan udara	Beton dengan tambahan udara
9,5	2280	2200
12,5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37,5	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

E. Teknik Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data dilakukan secara kuantitatif melalui serangkaian pengujian terhadap benda uji di laboratorium. Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini terbagi menjadi tiga jenis, yaitu sebagai berikut:

1. Data Primer

Data primer dalam penelitian ini diperoleh melalui serangkaian pengujian yang dilakukan di laboratoriu, meliputi:

a. Pengujian analisis saringan pada ageragt,
b. Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat,
c. Pengujian keausan pada agregat kasar (kerikil) serta kadar organik pada agregat halus (pasir),
d. Pengujian berat volume agregat,
e. Pengujian kadar air agregat,

f. Pengujian kadar lumpur dalam agregat,
g. Penentuan perbandingan bahan dalam campuran beton (perancangan campuran/mix design),
h. Pengujian kekentalan adukan beton segar (uji slump),
i. Uji kuat tekan beton,
j. Uji kuat tarik belah beton.

2. Data sekunder

Data sekunder berperan sebagai pendukung dalam memberikan gambaran umum mengenai wilayah studi yang menjadi fokus penelitian. Proses pengumpulan data sekunder dilakukan secara tidak langsung, yaitu melalui berbagai sumber yang telah ada sebelumnya, bukan dari objek penelitian secara langsung, diperoleh dari berbagai jenis literatur tertulis, seperti buku-buku teori, laporan hasil penelitian, dokumen peraturan, maupun publikasi resmi lainnya. Sumber data dapat berasal dari instansi yang relevan atau dari hasil telaah pustaka yang berkaitan dengan topik yang diteliti. Data sekunder digunakan untuk memperkuat analisis dan memberikan dasar teoritis dalam menyusun kerangka berpikir penelitian.

3. Benda uji

Campuran tanah-semen dan air sebanyak yang direncanakan dan dipadatkan dalam silinder cetakan tertentu. Adapun contoh gambar 3.1 benda uji yang dibuat



Gambar 3. 1 Benda uji selinder 300 mm × 150 mm
(sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Tabel 3.4 Variasi campuran air bekas wudhu untuk kuat tekan beton
(sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Kode	Variasi campuran beton	Umur beton (hari)			Jumlah
		3	7	28	
BN	BN	3	3	3	9
BABW50	B + ABW 50%	3	3	3	9
BABW100	B + ABW 100%	3	3	3	9
Total					27

Tabel 3.5 Variasi campuran air bekas wudhu untuk kuat belah beton
(sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Kode	Variasi campuran beton	Umur beton (hari)	Jumlah
		28	
BN	BN	3	3

BABW50	B + ABW 50%	3	3
BABW100	B + ABW 100%	3	3
Total			9

Keterangan:

BN : Beton Normal

ABW : Air Bekas Wudhu

Adapun untuk pengujian XRD dan FTIR sampel yang digunakan dengan bahan yang sama dan berbentuk serbuk atau bubuk.

Tabel 3.6 Variasi campuran air bekas wudhu untuk pengujian XRD (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Kode	Variasi campuran beton	Umur beton (hari)	Jumlah
		28	
BN	BN	3	3
BABW50	B + ABW 50%	3	3
BABW100	B + ABW 100%	3	3
Total			9

Tabel 3.7 Variasi campuran air bekas wudhu untuk pengujian FTIR (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Kode	Variasi campuran beton	Umur beton (hari)	Jumlah
		28	
BN	BN	3	3
BABW50	B + ABW 50%	3	3
BABW100	B + ABW 100%	3	3
Total			9

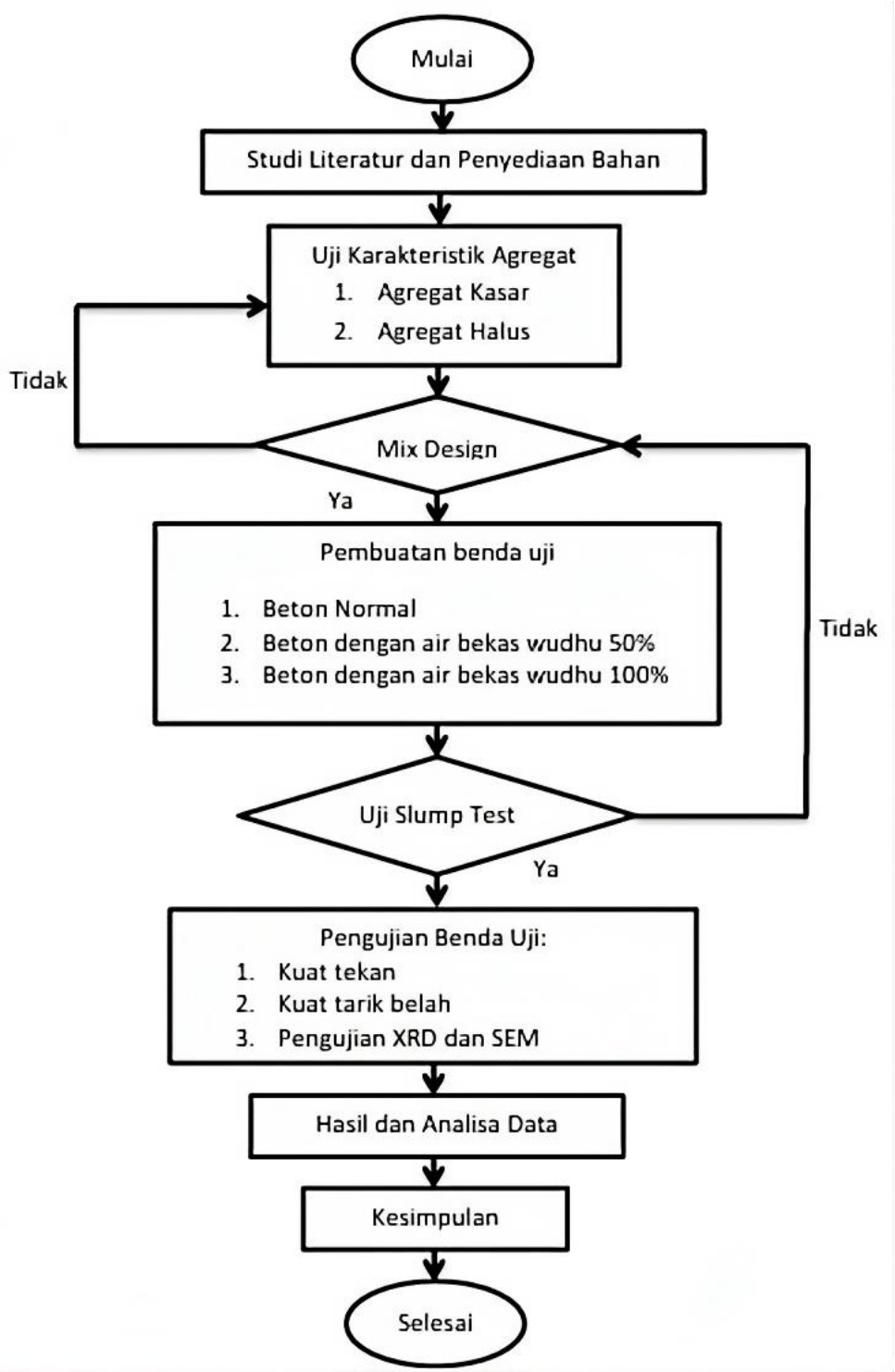
F. Teknik Analisis Data

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis deskriptif dengan pendekatan parametrik, yang bertujuan untuk menggambarkan hasil uji laboratorium secara kuantitatif. Teknik ini diterapkan dalam menganalisis nilai kuat

tekan beton, yang dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima oleh benda uji terhadap luas penampang silinder beton. Seluruh hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik guna mempermudah interpretasi data serta menunjang penyusunan kesimpulan yang objektif. Tahapan-tahapan dalam proses pengujian kuat tekan beton dijelaskan sebagai berikut:

1. Melakukan penimbangan terhadap benda uji sebelum dilakukan proses pengujian untuk mencatat berat awalnya.
2. Menempatkan benda uji pada alat penguji tekan beton, yaitu *Universal Testing Machine.*
3. Mengaktifkan mesin *Universal Testing Machine.* yang secara otomatis akan memberikan beban tekan secara bertahap pada benda uji. Besarnya beban dapat dibaca melalui manometer atau tampilan digital yang tersedia pada alat.
4. Beban terus diberikan hingga benda uji mengalami keretakan atau kerusakan akibat melebihi batas kekuatan tekan maksimal. Saat titik maksimum tercapai, jarum manometer atau indikator akan berhenti**,** menunjukkan nilai beban tertinggi yang mampu ditahan oleh benda uji sebelum mengalami kegagalan.

G. Diagram Alur Penelitian



Gambar 3. 2 Bagan alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Agregat

Pengujian terhadap agregat, baik agregat kasar maupun agregat halus, dilakukan mengacu pada standar yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI). Rekapitulasi hasil dari masing-masing pengujian disajikan pada tabel berikut.

1. Agregat kasar

Tabel 4.1 Rekapitulasi hasil pengujian agregat kasar
(sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

NO.	KARAKTERISTIK AGREGAT	INTERVAL	HASIL PENGAMATAN		NILAI RATA-RATA	KET.
			I	II		
1	Kadar lumpur	Maks 1%	0.0%	0.50%	0.25%	Memenuhi
2	Keausan	Maks 50%	13.4%	16.7%	15.1%	Memenuhi
3	Kadar air	0,5% - 2%	1.01%	1.32%	1.16%	Memenuhi
4	Berat volume					
	a. Kondisi lepas	1,6 - 1,9 kg/liter	1.66	1.59	1.62	Memenuhi
	b. Kondisi padat	1,6 - 1,9 kg/liter	1.73	1.75	1.74	Memenuhi
5	Absorpsi	Maks 4 %	1.81%	1.79%	1.80%	Memenuhi
6	Berat jenis spesifik					
	a. Bj. Nyata	1,6 - 3,3	2.62	2.70	2.66	Memenuhi
	b. Bj. dasar kering	1,6 - 3,3	2.51	2.57	2.54	Memenuhi
	c. Bj. Kering permukaan	1,6 - 3,3	2.56	2.62	2.59	Memenuhi
7	Modulus kehalusan	6,0 - 8,0	6.72	6.72	6.72	Memenuhi

Berdasarkan hasil pengujian terhadap agregat kasar yang telah dilakukan, diperoleh data dan temuan sebagai berikut:

a. Kadar Lumpur

Hasil pengujian terhadap kadar lumpur pada agregat kasar menunjukkan nilai sebesar 0,25%, yang masih berada di bawah ambang batas maksimum sebesar 1% sesuai ketentuan standar. Dengan demikian, agregat kasar tersebut dinyatakan masih memenuhi syarat untuk digunakan dalam campuran beton. Meskipun demikian, pembersihan atau pencucian tetap disarankan guna menghilangkan sisa lumpur yang menempel, sehingga tidak mengganggu proses ikatan antar material dalam adukan beton.

b. Keausan Agregat

Pengujian keausan agregat kasar dengan menggunakan mesin Los Angeles menghasilkan nilai sebesar 15,1%, yang secara signifikan berada di bawah batas maksimum 50% sesuai standar. Hasil ini mengindikasikan bahwa agregat tersebut memiliki tingkat ketahanan aus yang tinggi, sehingga memenuhi kriteria kelayakan untuk digunakan dalam campuran beton struktural.

c. Kadar Air

Hasil pengujian terhadap kadar air pada agregat kasar menunjukkan nilai sebesar 1,16%, yang masih berada di bawah batas toleransi maksimal yaitu 2%. Kondisi ini menunjukkan bahwa agregat kasar tidak mengandung kelembapan berlebih, sehingga aman dan layak digunakan dalam proses

pencampuran beton tanpa berisiko memengaruhi proporsi air dalam adukan.

d. Berat Volume

Pengujian terhadap berat volume agregat kasar menghasilkan nilai sebesar 1,62 kg/l untuk kondisi berongga dan 1,74 kg/l untuk kondisi padat. Kedua hasil tersebut masih berada dalam rentang standar, yakni antara 1,6 hingga 1,9 kg/l. Hal ini mengindikasikan bahwa agregat kasar memiliki tingkat kepadatan yang sesuai dan memenuhi syarat untuk digunakan dalam campuran beton.

e. Penyerapan Air

Nilai penyerapan air pada agregat kasar tercatat sebesar 1,80%, yang masih berada di bawah ambang batas maksimum sebesar 4%. Hal ini mengindikasikan bahwa agregat kasar tersebut memiliki porositas yang relatif rendah, sehingga aman digunakan dalam campuran beton tanpa berisiko menambah kadar air berlebih yang dapat mempengaruhi mutu beton.

f. Berat Jenis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai berat jenis nyata agregat kasar adalah 2,66, berat jenis kering sebesar 2,54, dan berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 2,59. Seluruh nilai tersebut berada dalam rentang standar yaitu 1,6 hingga 3,3. Hal ini menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki massa jenis yang memenuhi kriteria sebagai material yang layak digunakan dalam konstruksi beton.

g. Modulus Kehalusan

Modulus kehalusan agregat kasar diperoleh sebesar 6,72, yang berada dalam kisaran standar 6,0 hingga 8,0 sesuai dengan ketentuan SNI. Nilai tersebut menunjukkan bahwa gradasi agregat memiliki tingkat kehalusan yang sesuai untuk mendukung kekuatan serta kepadatan beton, sehingga layak digunakan dalam campuran beton struktural.

2. Agregat Halus

Tabel 4.2 Rekapitulasi hasil pengujian agregat halus
(sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

NO.	KARAKTERISTIK AGREGAT	INTERVAL	HASIL PENGAMATAN		NILAI RATA-RATA	KET.
			I	II		
1	Kadar lumpur	Maks 5%	4.0%	4.6%	3.88%	Memenuhi
2	Kadar organik	< No. 3	No. 2	No. 2	No. 2	Memenuhi
3	Kadar air	2% - 5%	3.80%	3.52%	3.66%	Memenuhi
4	Berat volume					
	a. Kondisi lepas	1,4 - 1,9 kg/liter	1.63	1.61	1.62	Memenuhi
	b. Kondisi padat	1,4 - 1,9 kg/liter	1.75	1.73	1.74	Memenuhi
5	Absorpsi	0,2% - 2%	1.83%	1.69%	1.76%	Memenuhi
6	Berat jenis spesifik					
	a. Bj. Nyata	1,6 - 3,3	2.65	2.63	2.64	Memenuhi
	b. Bj. dasar kering	1,6 - 3,3	2.53	2.52	2.53	Memenuhi
	c. Bj. kering permukaan	1,6 - 3,3	2.58	2.56	2.57	Memenuhi
7	Modulus kehalusan	1,50 - 3,80	2.71	2.94	2.82	Memenuhi

Dari pengujian agregat halus di atas, diperoleh hasil sebagai berikut:

a. Kadar Lumpur

   Hasil pengujian kadar lumpur pada agregat halus adalah sebesar 4,30%, yang masih berada di bawah batas maksimum 5%. Dengan demikian, agregat halus dinyatakan layak untuk digunakan sebagai bahan campuran beton.

b. Kadar Organik

   Pengujian kadar organik menunjukkan bahwa tingkat warna larutan berada pada tingkat No.2, lebih kecil dari batas maksimum No.3 sesuai standar. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan bahan organik tidak mengganggu proses pengikatan semen, sehingga agregat halus layak digunakan dalam campuran beton.

c. Kadar Air

   Kadar air pada agregat halus diperoleh sebesar 3,66%, yang masih di bawah ambang batas 5%. Oleh karena itu, agregat halus dapat digunakan dalam campuran beton tanpa menyebabkan perubahan signifikan pada rasio air-semen.

d. Berat Volume

   Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat volume rongga agregat halus adalah 1,62 kg/l, dan berat volume padat sebesar 1,74 kg/l. Kedua nilai tersebut masih berada dalam kisaran standar 1,4 – 1,9 kg/l, sehingga agregat halus sesuai untuk digunakan dalam campuran beton.

e. Penyerapan Air

Nilai penyerapan air pada agregat halus diperoleh sebesar 1,76%, yang masih di bawah batas maksimum 2%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat memiliki porositas rendah dan tidak akan menyebabkan kelebihan air dalam campuran beton.

f. Berat Jenis

Hasil pengujian berat jenis agregat halus adalah sebagai berikut: berat jenis nyata sebesar 2,64, berat jenis kering 2,53, dan berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 2,57. Ketiga nilai tersebut masih berada dalam kisaran standar 1,6 – 3,3, sehingga agregat halus memenuhi syarat sebagai material konstruksi beton.

g. Modulus Kehalusan

Modulus kehalusan agregat halus diperoleh sebesar 2,82, yang masih berada dalam rentang standar 1,5 – 3,8 sesuai spesifikasi SNI. Nilai ini menunjukkan bahwa gradasi agregat berada pada tingkat kehalusan yang sesuai untuk mendukung kekuatan dan kepadatan beton, serta dapat digunakan dalam campuran beton.

B. Perencanaan Adukan Beton (Mix Design)

Perencanaan adukan beton dihitung menggunakan metode SNI 03-2834-2000 dengan hasil data sebagai berikut :

Tabel 4.3 Mix desain berdasarkan SNI 03-2834-2000 (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

No	Uraian	
1	Kuat tekan karakteristik umur 28 hari (fc')	25 MPa
2	Deviasi standar	60
3	Nilai margin/nilai tambah (M)	98,4 MPa

4	Kekuatan rata-rata yang hendak dicapai (fcr')	35,03 MPa
5	Jenis semen (PC)	Jenis I
6	Jenis agregat halus	Alami
8	Jenis agregat kasar	Pecah
9	Faktor air semen (FAS)	0,469
10	Slump (untuk plat, balok, kolom, dinding)	75 - 100 mm
11	Ukuran agregat maksimum	40 mm
12	Kebutuhan air	197,75 liter
13	Kebutuhan semen Portland	421,12 kg/m^3
14	Daerah gradasi agregat halus	Zona 2
15	Berat jenis beton	2400 kg/m^3
16	Kebutuhan agregat halus	650,45 kg/m^3
17	Kebutuhan agregat kasar	1069,48 kg/m^3

Maka didapatkan perbandingan semen, kerikil, pasir dan air untuk 1 m^3 adalah :

Air koreksi = 197,749 kg

Semen = = = 421,127 kg

Ag. Kasar = Berat ag. kasar + berat kadar air ag. kasar – berat penyerapan ag. Kasar

= 1076,3564 + 12,525 – 19,395 = 1069,486 kg

Ag. Halus = Berat ag. halus + berat kadar air ag. halus – berat penyerapan ag. halus

= 638,335 + 23,359 – 11,238 =650,456 kg

Jumlah = Air + ag. Kasar + ag. Halus

= 197,749 + 1069,486 + 650,456 = 2338,818 kg

Tabel 4.4 Kebutuhan campuran bahan untuk 1 m^3 beton (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

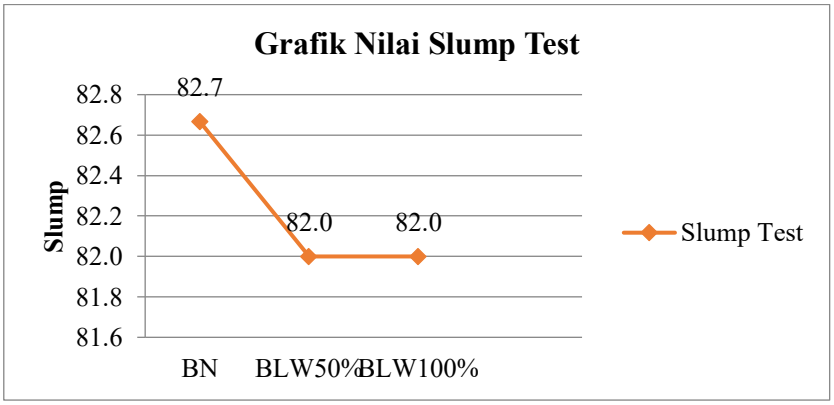
	Berdasarkan Koreksi terhadap kadar air (kg)	Berdasarkan perkiraan massa beton (kg)	Berdasarkan volume absolute (kg)
Air (berat bersih)	197.7	203.0	203.0
Semen	421.1	432.3	432.3
Ag. Kasar (kering)	1069.5	1076.4	1076.4
Ag. Halus (kering)	650.5	638.3	569.5

Perbandingan berat = W semen : W pasir : W kerikil : W air

1	1.32	2.49	0.47

C. Nilai Slump

Pengujian nilai *Slump test* Pengujian nilai slump beton dilakukan menggunakan alat kerucut Abrams. Proses dimulai dengan membasahi bagian dalam kerucut terlebih dahulu, lalu meletakkannya di atas permukaan datar dan rata. Selanjutnya, kerucut diisi dengan beton segar dalam tiga lapisan bertahap, di mana setiap lapisan mewakili sepertiga dari total volume kerucut. Setelah masing-masing lapisan dimasukkan, dilakukan penusukan sebanyak 25 kali menggunakan batang penusuk standar, dengan cara menekan hingga mencapai dasar lapisan tersebut agar pemadatan merata. Setelah ketiga lapisan selesai dimasukkan dan dipadatkan, permukaan atas beton diratakan. Dalam waktu sekitar 30 detik, kerucut diangkat secara vertikal dan perlahan-lahan tanpa menggoyangkan beton. Nilai slump ditentukan dengan mengukur penurunan tinggi beton segar dari puncak kerucut awal terhadap puncak campuran beton setelah pengangkatan kerucut dilakukan. Selisih ketinggian inilah yang menjadi nilai slump beton, yang menggambarkan konsistensi dan workability campuran.



Gambar 4.1 Perbandingan nilai slump pada setiap variasi (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Dari gambar 4.1 tampak bahwa untuk kondisi beton normal berada di angka 82,7 mm sedangkan di variasi air bekas wudhu 50% dan variasi air bekas wudhu 100% itu sama di angka 82 mm.

D. Kuat Tekan

Setelah proses pembuatan dan perawatan benda uji selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian kuat tekan pada masing-masing sampel beton. Pengujian ini dilakukan saat beton mencapai umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari, dengan jumlah total sebanyak 27 sampel uji. Sampel-sampel tersebut dibagi ke dalam tiga variasi campuran, yaitu beton normal yang menggunakan air bersih, beton dengan campuran 50% air bekas wudhu, dan beton dengan campuran 100% air bekas wudhu. Untuk setiap variasi campuran dibuat tiga benda uji berbentuk silinder dengan dimensi 15 cm × 30 cm. Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada usia beton sesuai dengan yang telah ditentukan. Sebelum dilakukan pengujian kuat tekan, setiap benda uji terlebih dahulu ditimbang untuk memperoleh data berat awal, yang selanjutnya digunakan sebagai bagian dari analisis karakteristik beton secara menyeluruh. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, terdapat sedikit variasi berat antar sampel silinder beton.

Namun, hal ini tidak menunjukkan adanya perubahan komposisi material**,** karena semua beton dalam penelitian ini menggunakan komposisi campuran yang sama, baik dari segi jumlah semen, agregat halus, agregat kasar, maupun volume air. Perbedaan berat lebih mungkin disebabkan oleh kondisi pengecoran**,** kadar air aktual saat pencampuran, serta kandungan air bekas wudhu yang digunakan**.** Meskipun berat beton dapat memengaruhi kuat tekan secara umum, dalam penelitian ini pengaruh berat terhadap kuat tekan tidak dominan, karena selisih berat antar sampel sangat kecil dan tidak mencerminkan perubahan material. Oleh karena itu, faktor utama yang memengaruhi kuat tekan adalah karakteristik air pencampur, bukan berat total benda uji.

Data hasil pengujian kuat tekan dari ketiga jenis campuran beton disusun dalam bentuk tabel dan grafik. Penyajian ini bertujuan untuk mengevaluasi serta membandingkan pengaruh pemakaian air bekas wudhu terhadap nilai kuat tekan beton pada masing-masing umur pengujian.

1. Beton normal

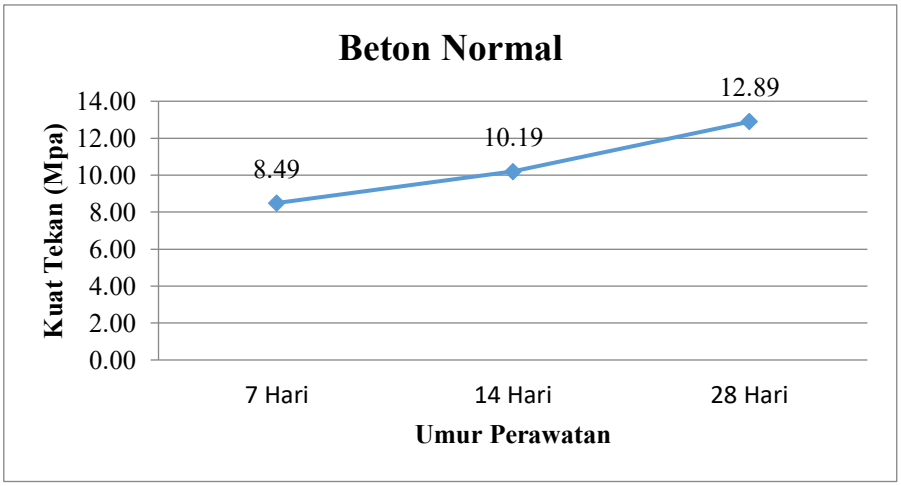
Berdasarkan hasil penelitian, kuat tekan rata-rata pada beton normal yang didapat pada pengujian 7, 14 dan 28 hari ialah sebagai berikut:

Tabel 4.5 Rekap hasil kuat tekan beton normal (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

No.	Umur	Berat (Kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan f'c (MPa)
1	7 Hari	11.737	150	8.49
2	14 Hari	11.860	180	10.19
3	28 Hari	11.764	227.7	12.89

Pengujian terhadap sampel beton normal berbentuk silinder berukuran 15 x 30 cm sebanyak tiga buah menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata

sebesar 8,49 MPa pada umur 7 hari, 10,19 MPa pada umur 14 hari, dan 12,89 MPa pada umur 28 hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa beton normal telah mencapai nilai kuat tekan yang ditargetkan, yang kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik berikut:



Gambar 4.2 Grafik pengujian kuat tekan beton normal
(sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

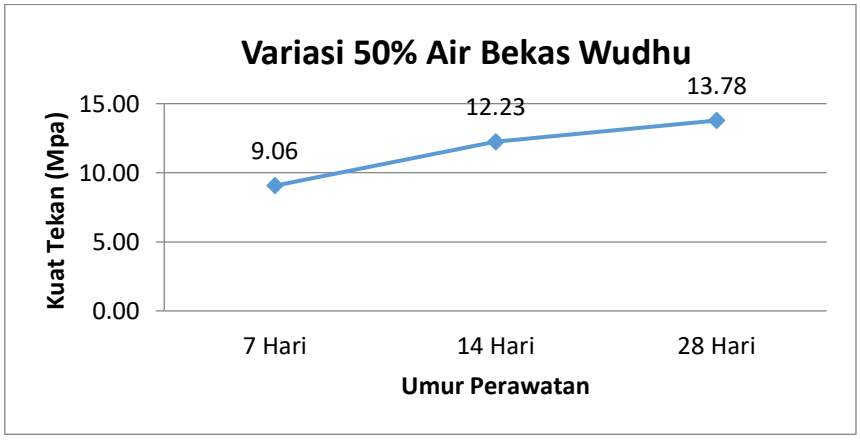
Berdasarkan grafik yang ditampilkan, terlihat bahwa beton normal mengalami peningkatan kuat tekan secara bertahap seiring bertambahnya umur beton. Pada pengujian umu 7 hari hingga 14 hari, terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 1,70 Mpa, yang mencerminkan berlangsungnya proses hidrasi secara aktif pada tahap awal pengerasan beton. Selanjutnya, dari umur 14 hari ke 28 hari, peningkatan kuat tekan mencapai 2,70 Mpa, menunjukkan bahwa reaksi hidrasi berlanjut secara progresif hingga beton mencapai kematangan struktural pada umur standar 28 hari.

2. Rekap hasil kuat beton variasi beton 50% air bekas wudhu

Berdasarkan hasil pengujian, nilai rata-rata kuat tekan beton dengan variasi penggunaan 50% air bekas wudhu pada umur 7, 14, dan 28 hari diperoleh sebagai berikut:

Tabel 4.6 Rekap hasil kuat tekan beton variasi 50% air bekas wudhu (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

No.	Umur	Berat (Kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan f'c (MPa)
1	7 Hari	12.015	160.00	9.06
2	14 Hari	11.931	216.00	12.23
3	28 Hari	11.993	243.33	13.78



Gambar 4.3 Grafik pengujian kuat tekan beton variasi 50% (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Dari grafik yang disajikan, dapat diamati bahwa beton dengan campuran 50% air bekas wudhu menunjukkan tren peningkatan kuat tekan secara konsisten seiring bertambahnya umur beton. Pada periode 7 hingga 14 hari, terjadi peningkatan sebesar 3,17 MPa, yang mengindikasikan aktivitas hidrasi masih berlangsung secara intens pada fase awal pengerasan. Selanjutnya, antara umur 14 hingga 28 hari, kuat tekan meningkat sebesar 1,55

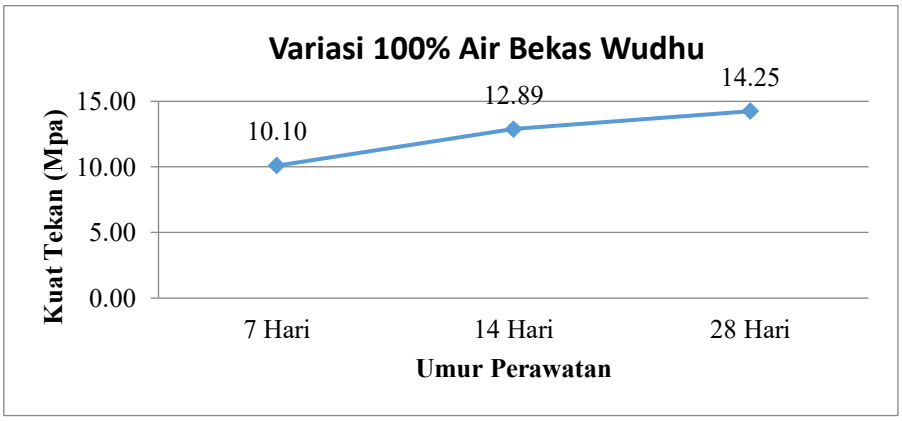
MPa, yang menunjukkan bahwa proses hidrasi tetap berlanjut secara berkelanjutan hingga beton mencapai kekuatan optimal pada umur 28 hari.

3. Variasi beton 100% air bekas wudhu

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata nilai kuat tekan beton dengan komposisi 100% air bekas wudhu pada umur 7, 14, dan 28 hari diperoleh dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 4.7 Rekap hasil kuat tekan beton variasi 100% air bekas wudhu (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

No.	Umur	Berat (Kg)	Beban (KN)	Kuat Tekan f'c(MPa)
1	7 Hari	11.971	178.33	10.10
2	14 Hari	11.873	227.67	12.89
3	28 Hari	11.976	251.67	14.25

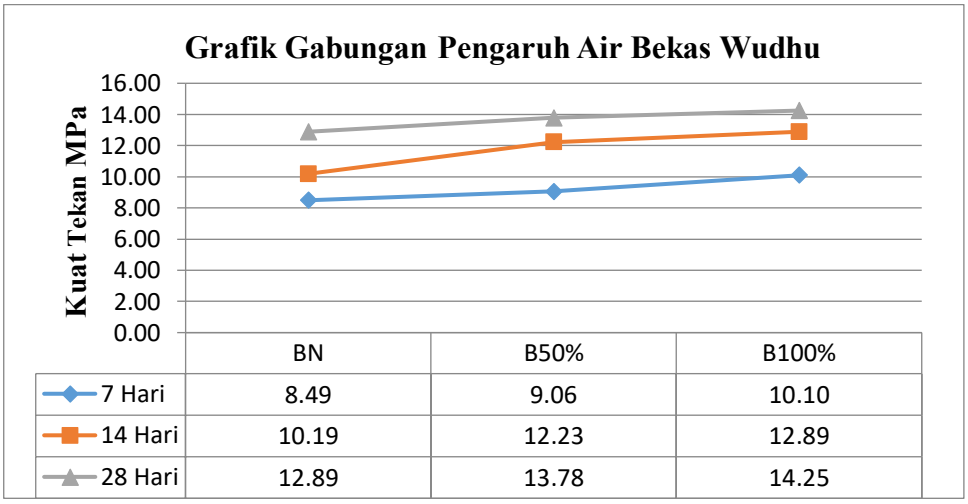


Gambar 4.4 Grafik pengujian kuat tekan beton variasi 100% (sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Merujuk pada grafik yang tersaji, dapat diamati bahwa beton normal menunjukkan peningkatan kuat tekan secara konsisten seiring dengan bertambahnya umur beton. Pada periode pengujian antara hari ke-7 hingga hari ke-14, tercatat adanya kenaikan kuat tekan sebesar 2,79 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa proses hidrasi berlangsung intensif selama tahap awal

pengerasan. Selanjutnya, antara hari ke-14 hingga ke-28, kuat tekan meningkat sebesar 1,36 MPa, yang menunjukkan bahwa reaksi hidrasi terus berlanjut secara bertahap hingga beton mencapai kekuatan optimal pada usia 28 hari.

Berikut adalah grafik hubungan presentase campuran ketiga variasi pada sampel uji beton :



	BN	B50%	B100%
7 Hari	8.49	9.06	10.10
14 Hari	10.19	12.23	12.89
28 Hari	12.89	13.78	14.25

Gambar 4.5 Grafik gabungan kuat tekan beton 3 variasi
(sumber: Hasil olah laboratorium Umpar 2025)

Pada umur 7 hari, beton dengan campuran 50% air bekas wudhu menunjukkan peningkatan sebesar 0,57 MPa**,** sedangkan beton dengan 100% air bekas wudhu mengalami peningkatan yang lebih besar yaitu sebesar 1,04 MPa dibandingkan dengan beton normal.

Kemudian, pada usia 14 hari, peningkatan kuat tekan dibandingkan dengan beton normal tercatat sebesar 2,04 MPa untuk campuran dengan 50% air bekas wudhu, serta sebesar 0,66 MPa pada campuran dengan 100% air bekas wudhu.

Sedangkan pada umur 28 hari**,** beton dengan 50% air bekas wudhu mengalami peningkatan sebesar 0,89 MPa**,** dan pada variasi 100% terjadi peningkatan sebesar 0,47 MPa terhadap beton normal.

Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa seluruh variasi 0%, 50%, maupun 100% air bekas wudhu mampu memenuhi kuat tekan rencana beton**,** sesuai dengan standar umur 28 hari. Penggunaan air bekas wudhu, terutama pada kadar tertentu, dapat memberikan kontribusi positif terhadap perkembangan kekuatan tekan beton**.** Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase penggunaan air bekas wudhu dalam campuran beton berpotensi mendukung performa beton dalam konstruksi, asalkan tetap dalam batas optimal yang dianalisis secara teknis dan laboratorium.

E. Hasil Pengujian Mikrostruktur

Pengujian terhadap mikrostruktur beton mengindikasikan adanya perbedaan karakteristik internal antara beton normal dan beton yang dicampur dengan variasi air bekas wudhu. Perbedaan ini sebagian besar disebabkan oleh variasi komposisi kimia dalam air yang digunakan sebagai bahan pencampur beton. Air bekas wudhu yang mengandung ion-ion tertentu dari sabun, kulit manusia, atau residu lainnya dapat mempengaruhi proses hidrasi dan oembentukan senyawa semen dalam beton. Hal ini dapat diamati melalui hasil grafik pada **Gambar 4.5** dan **Gambar 4.6,** yang menampilkan profil mikrostruktur dari beton normal dan beton dengan campuran air bekas wudhu pada umur 28 hari. Dari gambar memperlihatkan variasi fase kristalin dan distribusi senywa yang terbentuk, serta mengindikasikan adanya perbedaan tingkat kerapatan pori dan perkembangan senyawa hidrat antara ketiga variasi beton.

Perbedaan ini menjadi dasar dalam mengevaluasi pengaruh langsung air bekas wudhu terhadap kekuatan dan kualitas mikrostruktur beton yang pada akhirnya berkontribusi terhadap performa beton dalam pengaplikasiannya di lapangan.

Penggunaan beton pada usia 28 hari sebagai titik evaluasi utama dalam pengujian kuat tekan beton merupakan standar yang telah diadopsi secara luas dalam dunia teknik sipil. Hal ini tidak hanya berdasarkan kebiasaan teknis, tetapi juga didukung oleh berbagai regulasi dan temuan ilmiah.

Menurut SNI 03-1974-1990 tentang *"Metode Pengujian Kuat Tekan Beton"*, beton diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari, di mana usia 28 hari ditetapkan sebagai acuan standar kuat tekan (f'c) beton normal. Hal ini diperkuat oleh standar internasional seperti ASTM C39/C39M dan ACI 318, yang menetapkan bahwa kuat tekan beton umumnya dinyatakan dalam bentuk nilai pada hari ke-28 setelah pencetakan. Secara kimiawi, reaksi hidrasi antara semen dan air adalah proses berkelanjutan yang menyebabkan pengikatan dan pengerasan beton. Pada usia 28 hari, diperkirakan bahwa beton telah mengalami sekitar 90% dari total hidrasi yang terjadi selama masa hidupnya. Setelah titik ini, peningkatan kekuatan berjalan lebih lambat dan tidak signifikan untuk aplikasi struktural jangka pendek.

Neville (2011) dalam bukunya *Properties of Concrete* menjelaskan bahwa kekuatan beton dapat terus meningkat setelah 28 hari, terutama pada beton dengan bahan tambahan mineral, namun peningkatan tersebut bersifat marginal dan biasanya tidak menjadi dasar evaluasi mutu struktural.

Dari sisi praktis, umur 28 hari dianggap ekonomis dan efisien karena memberikan waktu yang cukup untuk hidrasi berlangsung, tetapi juga memungkinkan

pengambilan keputusan konstruksi secara tepat waktu. Hal ini sangat penting dalam proyek konstruksi yang padat jadwal.

1. Analisa *X-Ray Diffraction* (XRD)

Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan metode karakterisasi kristalografi yang sangat krusial dalam memahami mekanisme hidrasi dan pembentukan produk hidrat dalam sistem pasta semen. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip difraksi sinar-X oleh kisi atom dalam struktur kristalin, sehingga memungkinkan identifikasi fase-fase senyawa yang terbentuk akibat reaksi antara semen dan air pencampur. Dalam konteks teknologi beton, senyawa seperti kalsium hidroksida (portlandit), kalsium silikat hidrat (C-S-H), dan kalsium aluminat silikat hidrat (C-A-S-H) merupakan produk dominan dari reaksi hidrasi yang sangat menentukan sifat mekanik, durabilitas, serta mikrostruktur beton secara keseluruhan.

Penggunaan air dengan karakteristik kimia berbeda diketahui mampu memengaruhi jalannya reaksi hidrasi secara signifikan, baik dari segi kinetika maupun morfologi produk yang terbentuk. Air wudhu, yang dalam penelitian ini digunakan sebagai alternatif air pencampur beton, secara alami telah melalui beberapa tahapan eksposur terhadap anggota tubuh manusia, dan karenanya diduga membawa muatan ionik spesifik seperti Ca^{2+}, Mg^{2+}, dan anion-anion lain yang dapat berperan sebagai nukleator atau bahkan inhibitor terhadap pertumbuhan kristal hidrat tertentu. Hal ini memberikan hipotesis bahwa substitusi air wudhu, baik secara parsial maupun penuh, berpotensi mengubah proporsi fase kristalin dan amorf

dalam beton, yang secara langsung berkaitan dengan sifat mekanik serta ketahanannya terhadap lingkungan agresif.

Melalui analisis XRD, pola difraksi yang dihasilkan memberikan gambaran mengenai dinamika reaksi hidrasi yang terjadi pada setiap variasi substitusi air wudhu. Penurunan intensitas puncak $Ca(OH)_2$, misalnya, dapat diinterpretasikan sebagai peningkatan reaktivitas sistem, di mana $Ca(OH)_2$ lebih lanjut bereaksi membentuk fase C-S-H, yang dikenal sebagai fase gel utama yang menyumbang terhadap kekuatan tekan beton. Di sisi lain, keberadaan fase amorf yang lebih dominan pada substitusi penuh mengindikasikan transformasi sistem ke arah struktur yang lebih tidak teratur secara kristalografi, namun justru dapat meningkatkan resistensi beton terhadap degradasi kimia seperti reaksi sulfat atau karbonasi.

Dengan demikian, analisis XRD dalam penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai alat identifikasi senyawa, namun juga sebagai pendekatan diagnostik terhadap pengaruh mikrostruktur terhadap performa makroskopik beton. Temuan ini menjadi sangat penting sebagai landasan ilmiah dalam mengevaluasi potensi air wudhu sebagai air substitusi ramah lingkungan dalam konstruksi berkelanjutan, sekaligus membuka ruang diskursus antara nilai-nilai spiritual dan teknologi material modern.

Melalui grafik yang tertera dikemukakan bahwa, pada beton normal (0% air wudhu), teridentifikasi puncak-puncak kuat pada sudut 2θ sekitar $21°$ dan $55°$, yang mengindikasikan keberadaan senyawa $Ca(OH)_2$ sebagai

produk utama hidrasi semen. Puncak tambahan pada 27°, 29°, dan 40° menunjukkan terbentuknya senyawa C-S-H, C-A-S-H, dan C_2S, yang seluruhnya mendukung peningkatan kekuatan beton. Senyawa C-S-H merupakan produk utama dalam proses hidrasi semen yang berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik beton. Keberadaan C-A-S-H pada sudut sekitar 29° menunjukkan bahwa reaksi antara aluminat dan silikat juga terjadi, yang dapat meningkatkan durabilitas beton. Keberadaan SiO_2 dalam jumlah kecil juga terdeteksi, yang kemungkinan berasal dari agregat halus (pasir) atau dari hidrasi yang tidak sempurna.

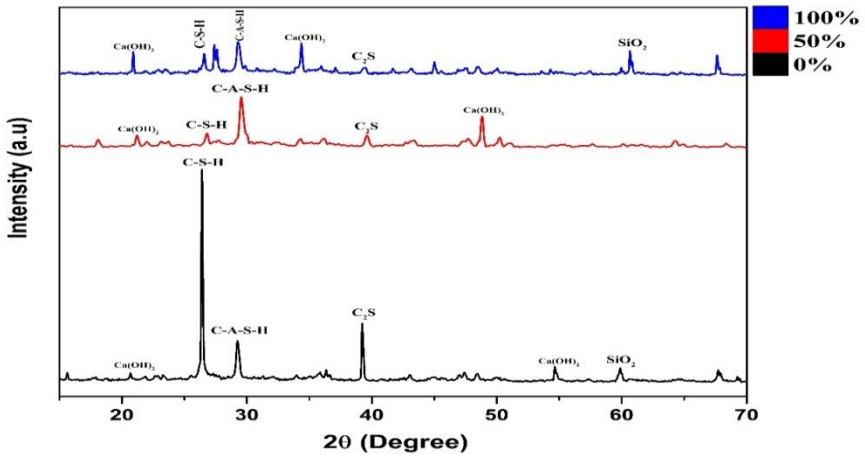
Sementara pada beton substitusi air wudhu sebesar 50%, terlihat adanya penurunan intensitas $Ca(OH)_2$, bersamaan dengan peningkatan pada puncak C-S-H, yang mengindikasikan bahwa ion-ion mineral dalam air wudhu (seperti Ca^{2+} dan Mg^{2+}) turut memengaruhi reaksi hidrasi. Hal ini konsisten dengan temuan Mesecke et al. (2022) bahwa senyawa tambahan dapat mempercepat konversi $Ca(OH)_2$ menjadi gel C-S-H yang memperkuat struktur beton. Selain itu, peningkatan intensitas C-S-H pada 28° menunjukkan bahwa substitusi air wudhu dapat mempercepat proses hidrasi dan meningkatkan fase gel hidrat yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan awal beton.

Dan pada sampel dengan 100% air wudhu, pola difraksi menunjukkan penurunan yang lebih signifikan pada puncak $Ca(OH)_2$, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar kalsium hidroksida telah bereaksi membentuk senyawa hidrat lainnya. Hal ini mengarah pada dominasi fase

amorf, yang dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif karena berkurangnya ketersediaan $Ca(OH)_2$ yang rentan terhadap reaksi sulfat atau karbonasi. Selain itu, intensitas puncak C-S-H tetap tinggi, menunjukkan bahwa substitusi penuh air wudhu tetap mendukung pembentukan fase hidrat utama dalam beton. Namun, peningkatan jumlah ion dalam air wudhu mungkin juga memengaruhi struktur mikro beton, yang perlu dievaluasi lebih lanjut dalam aspek mekanis dan durabilitasnya.

Tabel 4.8 Reaksi kimia dan senyawa hasil dari analisis XRD (sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

No	Senyawa yang Terindentifikasi	Reaksi atau Asal Terbentuknya	Peran dalam Beton
1	$Ca(OH)_2$ (Portlandit)	$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$	Produk hidrasi awal, rentan terhadap karbonasi dan sulfat
2	C-S-H (Calcium Silicate Hydrate)	$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2$	Fase gel utama, memberi kekuatan beton
3	C-A-S-H (Calcium Alumino-Silicate Hydrate)	Reaksi aluminat dan silikat dengan Ca^{2+} dan air	Meningkatkan durabilitas dan mikrostruktur
4	C_2S (Dicalcium Silicate)	Komponen semen yang mengalami hidrasi lambat	Memberi kekuatan jangka panjang
5	SiO_2 (Silika amorf)	Dari agregat atau hidrasi tidak sempurna	Dapat bereaksi membentuk C-S-H sekunder



Gambar 4.6 Grafik analisis XRD
(sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

Air wudhu yang digunakan dalam penelitian ini bukan hanya sekedar zat cair, tetapi juga memiliki nilai kesucian yang tinggi. Dalam konteks material teknik sipil, penggunaannya dalam pembuatan beton tak hanya menghadirkan pendekatan ilmiah tapi juga mencerminkan filosofi Islam dalam menjaga kebersihan dan keberkahan dalam setiap setiap aspek kehidupan termasuk dalam teknologi suatu konstruksi.

2. Analisa *Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier* (FTIR)

Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) merupakan teknik analitik non-destruktif yang digunakan secara luas dalam kajian material semen untuk mengidentifikasi gugus fungsional dan senyawa kimia yang terbentuk selama proses hidrasi dan karbonasi. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip penyerapan selektif sinar inframerah oleh molekul dalam rentang frekuensi tertentu, sehingga menghasilkan spektrum unik yang mencerminkan interaksi kimia dalam matriks semen. Dalam konteks penelitian ini, pendekatan FTIR digunakan untuk mengkaji

dampak substitusi air wudhu terhadap struktur kimia beton, dengan tujuan mengevaluasi bagaimana keberadaan ion-ion dalam air wudhu mempengaruhi perkembangan fasa hidrat dan tingkat karbonasi dalam sistem pasta semen.

Berdasarkan spektrum yang diperoleh, identifikasi beberapa gugus utama seperti hidroksil (OH^-), sulfat (SO_4^{2-}), karbonat (CO_3^{2-}), dan silika (Si-O) menjadi indikator penting terhadap kemajuan reaksi hidrasi. Puncak absorbansi di sekitar 3400 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi ikatan O-H, menandakan keberadaan air bebas atau terikat dalam sistem semen. Sementara itu, puncak kuat di daerah 1400 cm^{-1} dan 870 cm^{-1} menunjukkan terbentuknya karbonat, yang berkaitan dengan reaksi karbonasi antara $Ca(OH)_2$ dan CO_2 dari udara. Gugus silika (Si-O) di daerah sekitar 1000 cm^{-1} diinterpretasikan sebagai bagian dari fase C-S-H, senyawa gel utama yang menentukan kekuatan mekanik dan ketahanan beton.

Analisis komparatif menunjukkan bahwa pada sampel dengan 0% air wudhu (menggunakan air biasa), intensitas puncak OH lebih tinggi, mengindikasikan tingginya kandungan air bebas yang belum berpartisipasi dalam reaksi hidrasi. Namun, pada sampel dengan 50% air wudhu, terjadi penurunan puncak OH disertai peningkatan karbonat dan intensitas Si-O, menunjukkan bahwa ion dalam air wudhu mendorong pembentukan C-S-H dan mempercepat proses karbonasi. Hal ini dapat disebabkan oleh kandungan Ca^{2+}, Mg^{2+}, atau ion lainnya yang bersifat promotif terhadap pembentukan senyawa hidrat yang lebih stabil. Pada substitusi penuh

(100%), tren ini semakin menguat: penurunan drastis intensitas OH, peningkatan CO_3^{2-}, dan kehadiran spektrum Si-O yang tajam menyiratkan struktur gel C-S-H yang lebih berkembang dan rapat, yang berpotensi menurunkan porositas total beton dan meningkatkan ketahanannya terhadap lingkungan agresif.

Dari sudut pandang mikrostruktur, substitusi air wudhu menunjukkan kontribusi terhadap evolusi sistem menjadi lebih padat dan stabil secara kimia. Fenomena ini sangat penting dalam pengembangan material beton berkelanjutan, mengingat karbonasi yang terkontrol dan peningkatan proporsi C-S-H dapat memperpanjang umur layanan beton. Secara filosofis, penggunaan air wudhu sebagai bagian dari teknologi rekayasa sipil merepresentasikan sinergi antara ilmu pengetahuan dan nilai spiritual. Air yang telah digunakan untuk tujuan penyucian dalam ibadah, ternyata juga mampu memberikan manfaat fungsional dalam memperbaiki karakteristik mikrostruktur beton. Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya mendukung konsep keberlanjutan (sustainability), tetapi juga memperkuat narasi bahwa prinsip keislaman dalam menjaga kesucian dapat diterjemahkan secara nyata ke dalam praktik teknologi material yang inovatif dan kontekstual.

Melalui grafik bisa dilihat pada sampel beton dengan 0% substitusi air wudhu (menggunakan air biasa), spektrum FTIR menunjukkan puncak intensitas tinggi pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm^{-1}, yang merepresentasikan gugus hidroksil (OH^-) dari air terikat dalam struktur

beton. Puncak ini mengindikasikan keberadaan air bebas dan air hidrasi dalam jumlah besar. Selain itu, teridentifikasi pula puncak 1400 cm^{-1} dan 870 cm^{-1} yang menandakan kehadiran gugus karbonat (CO_3^{2-}), serta puncak 1000 cm^{-1} yang diasosiasikan dengan ikatan silika (Si–O), menandakan pembentukan awal senyawa C-S-H (Calcium Silicate Hydrate).

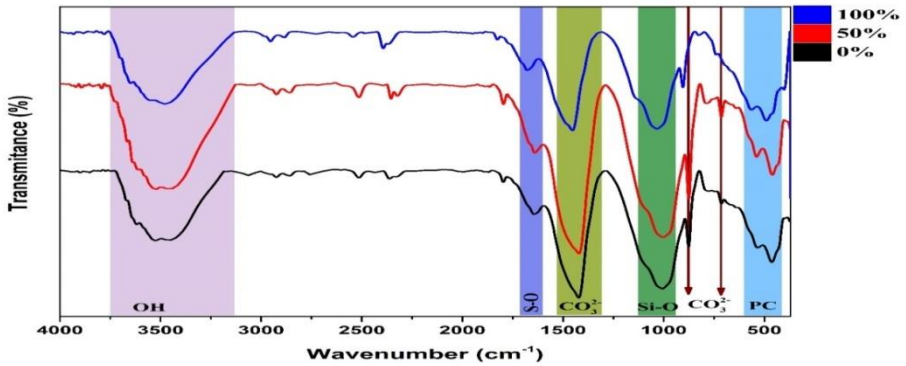
Pada variasi dengan 50% substitusi air wudhu, terjadi penurunan intensitas pada gugus OH, yang menunjukkan bahwa jumlah air bebas berkurang. Sebaliknya, intensitas gugus karbonat (CO_3^{2-}) mengalami peningkatan. Hal ini dapat diartikan bahwa ion-ion dalam air wudhu berinteraksi secara kimia dengan senyawa semen, menghasilkan karbonasi yang lebih tinggi. Peningkatan gugus Si–O juga diamati, yang mengindikasikan pembentukan senyawa C-S-H yang lebih kompleks dan terhidrasi lebih baik.

Sementara itu, pada sampel dengan 100% substitusi air wudhu, intensitas gugus OH berada pada titik terendah, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar air telah bereaksi dalam proses hidrasi. Puncak CO_3^{2-} menjadi lebih dominan dibandingkan sampel lainnya, menandakan tingkat karbonasi yang tinggi dalam material. Gugus Si–O menunjukkan intensitas yang sangat tajam, mengindikasikan bahwa pembentukan struktur C-S-H berlangsung lebih sempurna dan dominan. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh positif dari penggunaan air wudhu terhadap perkembangan

mikrostruktur beton, khususnya dalam hal peningkatan ketahanan terhadap karbonasi dan penetrasi zat agresif dari luar.

Tabel 4.9 Reaksi kimia dan senyawa hasil dari analisis FTIR (sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

No	Gugus Fungsional /Senyawa	Rentang Serapan (cm^{-1})	Reaksi atau Asal Terbentuknya	Interpretasi dalam Beton
1	OH^- (Hidroksil)	~3400	Hidrasi semen, air bebas/terikat	Menunjukkan kadar air, indikasi hidrasi aktif
2	CO_3^{2-} (Karbonat)	~1400 dan ~870	$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$	Indikasi karbonasi, mengurangi $Ca(OH)_2$ bebas
3	SO_4^{2-} (Sulfat)	~1100 – 1400	Dari semen Portland (gypsum)	Dapat mempengaruhi durabilitas
4	Si-O (Silikat)	~1000	Dari C-S-H atau pasir	Indikasi terbentuknya fase gel C-S-H
5	$CaCO_3$ (Kalsium Karbonat)	~870 dan 1400	Karbonasi dari $Ca(OH)_2$	Membentuk struktur lebih rapat, mengurangi porositas



Gambar 4.7 Grafik analisis FTIR
(sumber: Hasil olah lab kimia Unhas 2025)

Dengan demikian, hasil analisis FTIR memperkuat temuan dari XRD bahwa substitusi air wudhu dalam beton memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas hidrat dan interaksi kimia dalam struktur mikro beton.

Pengurangan air bebas dan peningkatan karbonasi dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap degradasi kimia dari lingkungan luar, meskipun perlu dikaji lebih lanjut terhadap dampaknya pada kekuatan mekanik beton jangka panjang.

Dalam Islam, kebersihan dan kesucian memiliki nilai utama, sebagaimana sabda Rasulullah SAW: "Kebersihan adalah sebagian dari iman." (HR. Muslim). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa air wudhu, yang telah digunakan untuk tujuan ibadah dan suci secara syariat, dapat memberikan manfaat tambahan dalam proses hidrasi beton. Penggunaan air wudhu dalam pembuatan beton berpotensi meningkatkan kualitas beton melalui pengurangan porositas dan peningkatan karbonasi yang berdampak pada ketahanan terhadap lingkungan agresif. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan nilai-nilai Islam dalam teknik sipil tidak hanya relevan secara spiritual tetapi juga dapat memberikan manfaat nyata dalam bidang rekayasa material.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton terhadap tiga variasi campuran, yakni beton normal, beton dengan campuran 50% air bekas wudhu, dan beton dengan 100% air bekas wudhu, diperoleh rata-rata kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 12,89 MPa untuk beton normal, 13,78 MPa untuk beton dengan 50% air bekas wudhu, dan 14,25 MPa untuk beton dengan 100% air bekas wudhu. Dari hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan air bekas wudhu sebagai substitusi air pencampur mampu meningkatkan kuat tekan beton. Ketiga variasi tersebut telah memenuhi standar kekuatan tekan beton, sehingga layak digunakan sebagai material konstruksi.
2. Substitusi air wudhu dalam campuran beton memberikan pengaruh signifikan terhadap struktur kristal dan komposisi kimia beton. Hal ini ditunjukkan melalui perubahan intensitas puncak-puncak pada analisis XRD dan munculnya variasi gugus fungsi pada spektrum FTIR. Pada beton variasi 50% air wudhu, terjadi peningkatan pembentukan senyawa C-S-H dan penurunan $Ca(OH)_2$ yang menunjukkan reaksi hidrasi yang lebih optimal. Kondisi ini mencerminkan peningkatan kekuatan dan durabilitas beton secara seimbang. Sementara pada beton dengan variasi penuh (100%) air wudhu menghasilkan dominasi fase amorf dan peningkatan karbonasi, yang dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap

lingkungan agresif. Namun, kemungkinan dampak terhadap kekuatan mekanik beton dalam jangka panjang masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Penggunaan air wudhu sebagai pengganti air pencampur beton tidak hanya memiliki nilai teknis, tetapi juga nilai spiritual, sejalan dengan prinsip kesucian dalam ajaran Islam. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis nilai agama dapat berkontribusi dalam inovasi material teknik sipil.

B. Saran

1. Penelitian lanjutan disarankan untuk menguji sifat mekanik beton (seperti kuat tekan dan tarik) dari beton dengan substitusi air wudhu secara menyeluruh.
2. Diperlukan pengujian jangka panjang untuk melihat ketahanan beton terhadap karbonasi, sulfat, dan lingkungan agresif lainnya.
3. Perlu dilakukan analisis terhadap struktur mikro menggunakan teknik lain untuk memperkuat hasil dari XRD dan FTIR.

DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 304. (2000). *Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete* (ACI 304R-00).

ACI Committee 305. (2010). *Hot Weather Concreting (ACI 305R-10)*.

ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*.

Analysis of the Influence of Water Qualities on the Strength of Concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71, Article 110.

ASTM International. (2020). *ASTM C39/C39M – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

Badan Standardisasi Nasional. (1992). *SNI 03-2834-1992: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*.

Badan Standardisasi Nasional. (2013). *SNI 2847:2013: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI 7656:2012 - Cara Uji Slump Beton*.

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

Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1974-1990 – Metode Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*.

British Standard BS 3148-1980. *Methods of Test for Water for Making Concrete*.

Chatwal, G., 2985, "*Spectroscopy Atomic and Molecule*", Himalaya Publishing House, Bombay.

Choirul Anam, Sirojudin. K, Soffian Firdausi. "Analisis Gugus Fungsi Pada Sampel Uji, Bensin Dan Spiritus Menggunakan Metode Spektroskopi FTIR". Labroratorium Fisika Atom & Nuklir, Jurusan Fisika Fakultas MIPA INDIP Vol. 10 No.1 April 2007.

Dachriyanus. 2004. *Analisis Struktur Senyawa Organik Secara Spektroskopi.* Padang: Lembaga Pengembangan Teknologi Informasi dan Komunikasi (LPTIK) Universitas Andalas.

De Oliveira, A.M., Oliveira, A.P., Vieira, J.D., Junior, A.N., Cascudo, O., 2023. *Study of the development of hydration of ternary cement pastes using X-ray computed microtomography, XRD-Rietveld method, TG/DTG, DSC, calorimetry and FTIR techniques.* Journal of Building Engineering 64, 105616.

Dependable Concrete Contractor. (2025). *How Water Quality Impacts Concrete Durability*. Dependable Concrete Contractor Blog.

Drs. Muhtarom Riyadi, SST., Amalia, Spd.,SST. *Buku Teknologi Bahan I*. Politeknik Negeri Jakarta (2005)

Dynamic Concrete Pumping. (2023). *What Is Concrete Workability?*. Retrieved August 12, 2025, from https://www.dcpu1.com/blog/what-is-concrete-workability

Fesseden, 1997, "*Kimia Organik*", jilid 1, edisi ketiga Erlangga, Jakarta.

Fraga, Y.S.B., Martins, G.L.O., Rêgo, J.H. da S., Terrades, A.M., Rojas, M.F., 2025. Investigation of the microstructure of Portland cement pastes with functionalized nanosilica with different contents of shrinkage-reducing additive. Constr Build Mater 462, 139991.

Hana Haritsah, 2019. "Analisis Struktur, Gugus Fungsi Dan Sifat Fisis Paduan Silika Sekam Padi Pada Aspal". Skripsi Universitas Lampung, Bandar Lampung.

Hartini. "Analisis Mikrostruktur Beton Dengan Air Laut Sebagai Air Pencampur dan Air Perendaman" dalam Jurnal Media Inovasi Teknik Sipil Unidayan Vol. 6 No.1 (2017). Sulawesi Tenggara.

Hoang, N. D., & Pham, A. D. (2016). *Estimating Concrete Workability Based on Slump Test with Least Squares Support Vector Regression*. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 6(1), 1–15. Retrieved from

Hoshino, S., Yamada, K., Hirao, H., 2006. XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement, Journal of Advanced Concrete Technology.

Kokoszka, W. (2019). *Impact of Water Quality on Concrete Mix and Hardened Concrete Parameters*. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 29(3), 174–182.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2016). *Design and Control of Concrete Mixtures* (16th ed.). Portland Cement Association.

Li, Z., Liu, Y., Hua, Y., Zhang, Z., Huang, Y., Qian, J., 2025. Effect of further water curing on properties of carbonated reactive magnesia cement. Journal of Building Engineering 100, 111700.

Mansyur, 2013. *Perilaku Mekanik Beton Menggunakan Air Laut*. Tesis Universitas Hasanuddin Makassar.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill.

Mesecke, K., Warr, L.N., Malorny, W., 2022. Structure modeling and quantitative X-ray diffraction of C-(A)-S-H. J Appl Crystallogr 55, 133–143.

Mulyono, T. (2005). *Teknologi Beton*. Yogyakarta : Andi

Mulyono, T. (2006.) *Teknologi Beton*. Yogyakarta : Andi

Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.

Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Samekto, Wuryati, Candra Rahmadiyanto. 2001. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Kanisius

Santos, V.H.J.M. dos, Pontin, D., Ponzi, G.G.D., Stepanha, A.S. de G. e, Martel, R.B., Schütz, M.K., Einloft, S.M.O., Dalla Vecchia, F., 2021. *Application of Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) coupled with multivariate regression for calcium carbonate (CaCO3) quantification in cemen*t. Construction Build Mater 313, 125413.

Snellings, R. (2016). X-ray diffraction applied to hydrated Portland cement and its constituents. *Cement and Concrete Research*, 76, 201–216.

Snellings, R., 2018. *Thermogravimetric analysis,* in: SNELLINGS, R. (Ed.), A *Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials.* CRC Press, pp. 196–231.

SNI 7656:2012. *Beton – Cara Uji Slump Beton*. Badan Standardisasi Nasional (BSN)

Suda, Y., Saeki, T., Saito, T., 2015. *Relation between Chemical Composition and Physical Properties of C-S-H Generated from Cementitious Materials.* Journal of Advanced Concrete Technology 13, 275–290.

Tjokrodimuljo, 1996. *Teknologi Beton*. Yogyakarta : Nafiri.

Wuryati, N. (2001). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Graha Ilmu.