BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Infrastruktur jalan merupakan bagian penting dalam sistem jaringan jalan untuk mendukung peningkatan pembangunan di Indonesia. Pemerintah dalam hal ini menjadikan pembangunan, pemeliharaan dan peningkatan infrastruktur jalan menjadi salah satu program prioritas ditambah dengan peningkatan pertumbuhan lalu lintas baik dari segi jumlah kendaraan dan muatan yang diangkut, baik dari segi jumlah kendaraan dan muatan yang diangkut. Kegiatan pembangunan dan pemeliharan jalan di Indonesia diperlukan aspal sekitar 1,3 juta ton pertahunnya, apabila campuran beraspal mempunyai kadar aspal sebesar 6% terhadap berat campuran, maka 1,3 juta ton aspal tersebut itu akan menghasilkan sebanyak 21,6 juta ton campuran beraspal panas/*hot mix asphalt* (HMA), berdasarkan data tersebut dengan persentase agregat dalam campuran sekitar 90-95% maka dibutuhkan 20,3 juta agregat sehingga menyebabkan penggunaan material alam sebagai bahan baku semakin berkurang secara bertahap (Rindu dkk 2022).

Penggunaan dan pembaharuan limbah dari produk sampingan kegiatan industri merupakan isu penting dalam beberapa tahun ini untuk mengurangi penggunaan bahan baku infrastruktur jalan, salah satunya adalah penggunaan slag nikel sebagai material infrastruktur jalan menggantikan agregat alam.

Indonesia memiliki cadangan nikel nomor 1 di dunia yang mencapai 72 juta ton atau 52% dari total cadangan dunia. Produksi biji nikel Indonesia pada tahun

2019 sebesar 800 ribu ton atau sekitar 30% dari produksi total di dunia, pemerintah terus mendorong untuk program hilirisasi industri dengan mengurangi ekspor bahan mentah atau raw material dan pemrosesan bijih nikel didalam negeri. Besarnya peningkatan produksi ini sejalan dengan limbah limbah sampingan produksi terak (slag) yang dihasilkan dari pengolahan nikel. Industri peleburan dan pemurnian domestik menghasilkan sekitar 21,8 juta slag per tahun dimana baja dan nikel menjadi industri yang menghasilkan slag terbesar, dimana pada kurun waktu tahun 2019 sampai dengan 2024 diperkirakan dapat menghasilkan limbah slag sekitar 14.173.000 ton. Namun berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 101 tahun 2014, terak nikel masuk dalam kategori sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (LB3). Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik serta potensi dari terak nikel, khususnya yang berasal dari bijih nikel lateritik Indonesia, untuk penerapannya sebagai agregat pada aspal beton.

Adapun slag nikel yang digunakan pada penelitian ini berasal dari perusahaan PT Huadi Nickel-Alloy Indonesia yang saat ini memulai investasinya di bidang industri pengolahan dan pemurnian mineral nikel. Dibangun di area seluas 100 hektar yang masuk dalam area Kawasan Industri Bantaeng dengan jumlah produksi sebagai berikut:

1. Kapasitas Tanur

Tahap 1: 16.500 KVA dengan nilai investasi 80 juta USD

2. Kapasias Tanur

Tahap 2: 36.000 KVA dengan nilai investasi 160 juta US

3. Produksi Tahunan

Tahap 1: 50.000 ton feronickel yang sebagian besar diekspor ke China

4. Produksi Tahunan

Tahap 2: 200.000 ton feronickel yang sebagian besar diekspor ke China

Hingga saat ini, jumlah karyawan yang bekerja di Huadi Nickel-Alloy

Indonesia sebanyak lebih kurang 2000 orang. Sebagian besar dari karyawan adalah putra-putri asli Bantaeng dan sejauh ini PT Huadi Nickel Alloy telah memproduksi lebih dari dua juta ton limbah slag nikel

Teknologi *recycling* ini juga diharapkan akan mengurangi pemakaian material baru, perlindungan sumber daya alam, penghematan sumber daya, dan penghematan proses industry dimana hal tersebut merupakan hal yang sangat penting untuk dipertimbangakan. Dari beberapa uraian yang telah di bahas di atas, melatar belakangi penulis untuk mengambil judul penelitian **"Study Eksperimental Slag Nikel Pada Campuran Aspal Beton (Study Kasus Slag Nikel PT Huadi Nickel-Alloy Indonesia)"**

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang telah diuraikan maka rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik penggunaan slag nikel pada campuran aspal AC-WC?
2. Bagaimana parameter campuran aspal AC-WC terhadap penggunaan slag nikel?
3. Bagaimana Stabilitas Marshall pada campuran beton terhadap penggunaan slag nikel?

C. Tujuan Penelitian

Terkait dengan rumusan masalah di atas, maka tujuan yang ingin dicapai dari *penelitian* ini, yaitu

1. Untuk mengetahui karakteristik penggunaan slag nikel pada campuran aspal AC-WC.
2. Untuk mengetahui parameter campuran aspal AC-WC terhadap penggunaan slag nikel.
3. Untuk mengetahui Stabilitas Marshall pada campuran beton terhadap penggunaan slag nikel.

D. Batasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut;

1. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan dan Aspal, Prodi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Parepare.
2. Ketentuan bahan dalam penelitian ini yaitu:
    a. Aspal yang digunakan adalah aspal dengan penetrasi 60-70.
    b. Material agregat kasar diambil dari PT Huadi Alloy-Nickel Inonesia di Bantaeng sebagai agregat slag nikel 0,5-1cm
    c. Dalam pengujian untuk KAO dengan variasi perkiraan kadar aspal optimum, yaitu: 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0%, dan 6.5% masing-masing persentase yang terdiri dari 3 sampel dengan total 15 sampel dengan bentuk briket.
    d. Variasi slag nikel yang digunakan sebesar 100% sebagai subtitusi dari agregat 0,5-1 cm

3. Pengujian material agregat dalam penelitian meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan, pengujian keausan agregat kasar (abrasi), dan pengujian analisa saringan agregat.
4. Pengujian aspal dalam penelitian meliputi pengujian penetrasi, titik lembek, kehilangan berat aspal, dan berat jenis aspal.
5. Standar Pengujian marshall menggunakan SNI 03-1737-1989

E. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian yang dilakukan penulis pada tugas akhir ini yaitu:

1. Mengetahui karakteristik agregat pada campuran aspal beton, apakah memenuhi spesifikasi menurut standart SNI 03-1737-1989
2. Dapat mengetahui persen rongga diantara agregat Void In Mineral Aggregate (VMA), persen stabilitas (stability), kelelehan (flow) dan Marshall Quatinet
3. Dapat mengetahui nilai kadar aspal optimum (KAO) dengan menggunakan agregat kasar PT Huadi Nickel-Alloy Indonesia Bantaeng.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Lapisan Aspal Beton (Laston)

Lapis aspal beton adalah lapisan pada konstruksi jalan raya, yang terdiri dari campuran aspal keras dan agregat yang bergradasi menerus (*well graded*) dicampur, dihamparkan dan dipadatkan dalam keadaan panas pada suhu tertentu. Jenis agregat yang digunakan terdiri dari agregat kasar, agregat halus dan *filler*, sedangkan aspal yang digunakan sebagai bahan pengikat untuk lapis aspal beton harus terdiri dari salah satu aspal keras penetrasi 40/50, 60/70 dan 80/100 yang seragam, tidak mengandung air bila dipanaskan sampai suhu 175°C tidak berbusa dan memenuhu persyaratan sesuai dengan yang ditetapkan. Pembuatan Lapis Aspal Beton (*Laston*) dimaksudkan untuk mendapatkan suatu lapisan permukaan atau lapis antara (binder) pada perkerasan jalan yang mampu memberikan sumbangan daya dukung yang terukur serta berfungsi sebagai lapisan kedap air yang dapat melindungi konstruksi dibawahnya (Bina Marga, 1987). Menurut Sukirman, S (2003) menjelaskan bahwa lapis aspal beton (*Laston*) digunakan untuk jalan-jalan dengan beban lalu lintas berat, laston juga dikenal dengan nama AC (*Asphalt Concrete*).

Campuran asphalt concrete wearing course (AC-WC) merupakan lapis aus dan berada di lapis permukaan paling atas yang memungkinkan terjadinya perubahan karakteristik yang dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan (udara, temperature dan sinar matahari). Fungsi utama dari aspal AC-WC adalah sebagai lapisan yang pertama kali menahan beban kendaraan. Inilah sebabnya aspal AC-

WC harus memiliki stabilitas yang tinggi untuk menghindari perubahan bentuk, alur, dan *bleeding*. Aspal beton campuran panas, terbagi menjadi 3 yaitu :

1. Lapisan aspal beton sebagai lapisan aus, dikenal dengan nama AC-WC (*Asphalt Cocrate- Wearing Course*) dengan tebal minimum AC-WC adalah 4 cm. lapisan ini adalah lapisan yang berhubungan langsung dengan ban kendaraan dan dirancang untuk tahan terhadap perubahan cuaca, gaya geser, tekanan roda ban kendaraan serta memberikan lapis kedap air untuk lapisan dibawahnya.
2. Lapisan aspal beton sebagai lapisan pengikat, dikenal dengan nama AC-BC (*Asphalt Concrete – Binder Course*) dengan tebal minimum AC-BC adalah 5 cm. lapisan ini untuk membentuk lapis pondasi jika digunakan pada pekerjaan peningkatan atau pemeliharaan jalan.
3. Lapisan aspal beton sebagai lapisan pondasi dikenal dengan nama AC-BC (*Asphalt Concrete – Base course*) dengan tebal minimum AC-BC adalah 6 cm. Lapisan ini tidak berhubungan langsung dengan cuaca tetapi memerlukan stabilitas untuk memikul beban lalu lintas yang dilimpahkan melalui roda kendaraan

   a. Karakteristik aspal AC-WC

      Lapisan aspal AC-WC adalah lapisan yang memiliki struktur paling halus dibandingkan dengan lapisan lainnya. Adanya campuran bergradasi rapat yang memiliki sedikit rongga pada campuran aspal AC-WC menyebabkan lapisan ini lebih peka

terhadap variasi dan proporsi campuran. Sebagai lapisan yang terletak di susunan palong atas, tentu saja lapisan aspal AC-WC akan langsung berhubungan dengan kondisi luar, seperti cuaca lingkungan dan ban kendaraan. Oleh sebab itu lapisan ini harus dibuat kedap air dan memiliki kekerasan yang tinggi. Untuk ketebalan minimum aspal AC-WC adalah 4 cm.

b. Fungsi lapisan aspal AC-WC

1) Sebagai lapisan aus

Selain sebagai penahan beban secara langsung, lapisan aspal AC-WC juga akan menerima gesekan ban kendaraan secara langsung yang membuat ban tersebut menjadi aus atau menyusut. Struktur lapisan permukaan ini perlu dibuat supaya mampu memberikan gaya gesek dalam kondisi basah supaya kendaraan tidak tergelincir.

2) Melindungi lapisan di bawahnya

Adanya air dan udara dari lingkungan dapat mempercepat proses penuaan dan pengelupasan selimut aspal. Supaya lapisan kedua dan ketiga tetap aman dan terlindungi dari air hujan, maka sebagai lapisan pertama, aspal AC-WC harus didesain supaya dapat kedap air. Untuk mengetahui kekedapa air suatu lapisan, jumlah pori-pori pada campuran beton setelah dipadatkan dapat menjadi salah satu indikator.

3) Menyebarkan beban

Setiap lapisan aspal memiliki beban yang berbeda beda sebagai lapisan surface course atau lapisan yang berada di permukaan, tentu lapisan ini akan menerima beban yang paling besar. Inilah mengapa lapisan AC-WC

harus mampu mendistribusikan beban tersebut secara merata ke lapisan di berikutnya.

Untuk mencapai fungsi diatas, lapisan permukaan biasanya terbuat dari material dan pengikat yang menciptakan lapisan anti air dengan stabilitas yang tinggi. Ketentuan campuran AC-WC dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Sifat-Sifat Campuran AC-WC *(Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Divisi 6 revisi 2)*

Sifat-Sifat Campuran		Laston		
		Lapis Aus	Lapis Antara	Pondasi
Jumlah tumbukan perbidang		75		112
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min	0,6		
	Maks	1,2		
Rongga dalam campuran (%)	Min	3,0		
	Maks	5,0		
Rongga Tirisi Aspal (%)	Min	65	65	65
Rongga dalam agregat (VMA) (%)	Min	15	14	13
Stabilitas Marshall (kg)	Min	800		1800
	Min	2		3
	Maks	4		6
Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	Min	90		
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membal (refusal)	Min	2		

c. Material campuran aspal AC-WC

Pada umumnya, campuran untuk menyusun beton aspal terdiri dari agregat halus, agregat kasar, bahan pengisi, dan aspal. Beberapa kriteria dan persyaratan material campuran untuk aspal AC-WC adalah sebagai berikut:

1) Fraksi agregat kasar yang akan digunakan adalah yang tertahan saringan.

   Selain itu, struktur agregat harus keras, bersih, awet, dan bebas dari lempung.

2) Agregat halus terdiri dari pasir atau pengayakan batu pecah dan lolos ayakan. Presentase maksimum pasir yang diisyaratkan untuk campuran aspal AC-WC adalah 10%. Kondisi agregat halus harus bersih, keras, dan beban dari lempung.

3) Bahan pengisi atau *filler* harus kering, bebas gumpalan, dan memiliki sifat non-plastis.

4) Aspal adalah material yang dapat mencair dan membungkus agregat ketika dipanaskan.

Aspal adalah material perekat berwarna hitam atau coklat tua dengan unsur utama bitumen yang diperoleh dari residu hasil pengilangan minyak bumi berfungsi sebagai pengikat agregat dalam pembuatan jalan. Aspal dipilih untuk konstruksi jalan karena mempunyai sifat pekat (consistency), tahan terhadap pelapukan yang disebabkan oleh cuaca, derajat pengerasan dan ketahanan terhadap air. Aspal mempunyai sifat visco-elastis dan tergantung dari waktu pembebanan. Aspal akan mencair jika dipanaskan sampai temperature tertentu

dan kembali membeku jika temperature turun. Kandungan aspal terdiri dari 80 % karbon, 10 % hydrogen, 6 % belerang, dan sisanya Oksigen, Nitrogen serta sejumlah renik besi, nikel dan vanadium. Aspal terbuat dari minyak mentah melalui proses penyulingan atau dapay ditemukan dalam kandungan alam sebagai bagian dari komponen alam yang ditemukan bersama-sama material lain.

d. Sifat dan Bahan Penyusun Aspal

Aspal banyak digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan karena memiliki sifat sebagai pengikat dan pengisi rongga udara antara agregat. Adapun sifat-sifat aspal adalah sebagai berikut (Sukirman, 1993):

1) Mempunyai daya tahan (durability)

Daya tahan aspal adalah kemampuan aspal mempertahankan sifat asalnya akibat pengaruh cuaca selama masa pelayanan jalan. Sifat ini merupakan sifat dari campuran aspal, jadi tergantung dari sifat agregat, campuran dengan aspal, faktor pelaksanaan dan sebagainya.

2) Kohesi dan adhesi

Kohesi merupakan kemampuan aspal untuk mengikat unsur-unsur penyusun dari dirinya sendiri sehingga terbentuknya aspal dengan daktilitas yang tinggi. Sedangkan adhesi menyatakan kemampuan aspal untuk berikatan dengan agregat dan tetap mempertahankan agregat pada tempatnya setelah berikatan.

3) Kepekaan terhadap temperature

Kepekaan aspal terhadap temperatur adalah sensitivitas perubahan sifat viskoelastis aspal akibat perubahan temperatur, sifat ini dinyatakan sebagai indeks penetrasi aspal (IP)

4) Kekerasan aspal

Aspal pada proses pencampuran dipanaskan dan dicampur dengan agregat sehingga agregat dilapisi aspal atau aspal panas disiramkan ke permukaan agregat yang telah disiapkan pada proses peleburan.Pada waktu proses pelaksanaan, terjadi oksidasi yang menyebabkan aspal menjadi getas(viskositas bertambah tinggi)

5) Viskoelastisitas Aspal

Viskoelastisitas aspal adalah suatu material yang bersifat viskoelastisitas yang sifatnya akan berubah tergantung pada temperature atau waktu pembebanan. Sifat viskoelastisitas aspal adalah untuk menentukan pada temperatur berapa pencampuran aspal dengan agregat harus dilakukan agar mendapatkan campuran yang homogen dimana semua permukaan agregat dapat terselimuti oleh aspal secara merata dan aspal mampu masuk kedalam pori-pori agregat untuk membentuk ikatan kohesi yang kuat dan untuk mengetahui pada temperatur berapa pemadatan dapat dilakukan dan kapan harus dihentikan.

Aspal akan diuji mengenai sifat kekerasannya atau yang biasa disebut tahap penetrasi. Sifat penting ini harus diketahui sehingga bisa tahu kualitasnya baik atau tidak untuk menjadi pelapis paling

luar sebuah jalan. Berat jenisnya juga harus diketahui untuk mengetahui kandungan minyak bumi yang terkandung. Semakin tinggi berat jenis, semakin banyak kandungan minyak bumi. Seberapa tinggi aspal bisa melekat pada suatu material lain juga harus diuji supaya tahu seberapa tahan lama nanti jalan akan kuat.

Satu hal yang harus diketahui dengan jelas dari material ini dalam pengujian adalah mengenai titik nyala dan titik bakar. Jalanan sering mengalami gesekan dan akan bertambah tinggi ketika musim kemarau sehingga titik nyala harus benar-benar diketahui supaya tidak menimbulkan bahaya untuk pengguna jalan.

Titik lembek, kelarutan, dan daktilitas adalah tiga hal terakhir yang harus dilakukan pengujian terhadap aspal yang akan digunakan. Jika kedelapan tahan tersebut memiliki hasil yang memuaskan, aspal lolos dan bisa digunakan untuk pembuatan jalan.

6) Marshall Test

Pemeriksaan Marshall pada perkerasan jalan meliputi pengukuran ketahanan (stabilitas) dan kelelehan (flow) dari suatu campuran aspal. Ketahanan (stabilitas) merupakan suatu kemampuan campuran aspal dalam menerima beban sampai terjadi kelelehan plastis yang dinyatakan dalam kilogram.

Kelelehan (flow) merupakan keadaan perubahan bentuk suatu campuran aspal akibat diberikan suatu beban sampai batas runtuh yang dinyatakan dalam satuan mm.

Pemeriksaan Marshall bertujuan untuk mendapatkan suatu campuran aspal yang memenuhi ketentuan-ketentuan yang telah ditetapkan di dalam kriteria perencanaan perkerasan jalan.

Berdasarkan spesifikasi umum tahun 2018 revisi 2, parameter Marshall ditinjau pada penelitian ini yaitu :

a) Stabilitas

Stabilitas merupakan kemampuan campuran aspal menerima beban tanpa terjadi perubahan bentuk. Pada campuran aspal AC-WC memiliki standar nilai stabilitas yaitu 800 kg.

b) Kelelehan

Kelelehan merupakan perubahan bentuk campuran aspal setelah mengalami pembebanan. Pada campuran aspal AC-WC memiliki standar nilai kelelehan (flow) yaitu minimum 2 mm dan maksimum 4 mm.

c) Rongga dalam Campuran (VIM)

VIM *(Void in Mix)* yaitu rongga yang terletak diantara agregat didalam campuran yang telah dipadatkan. VIM dinyatakan dalam (%) terhadap volume total campuran. Campuran Aspal Beton ACWC memiliki persyaratan untuk nilai VIM minimum yaitu 3 % dan maksimum 5%.

d) Rongga antar Mineral Agregat (VMA)

VMA *(Void in Mineral Aggregate)* merupakan rongga yang terletak diantara agregat didalam campuran yang telah dipadatkan dalam satuan persen (%) terhadap total volume campuran. Pada campuran aspal AC-

WC memiliki standar nilai VMA yaitu minimum 15%.

e) Rongga Terisi Aspal (VFA atau VFB)

VFA *(Void Filled with Asphalt)* atau *VFB (Void Filled with Bitumen)* merupakan rongga yang dapat diselimuti atau terisi aspal dalam campuran yang telah dipadatkan dalam satuan persen (%) terhadap total volume campuran. Pada aspal AC-WC memiliki standar nilai VFA yaitu minimum 65%.

f) *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ) merupakan perbandingan stabilitas terhadap kelelehan dalam satuan Kg/mm. Pada campuran aspal ACWC memiliki standar nilai MQ 250 Kg/mm.

B. Slag Nikel

Hasil penambangan dan pengolahan bijih nikel menghasilkan limbah padat yang disebut dengan slag, dengan komposisi bahan antara lain 70% komposisi kimia terdiri dari Silika 41,47%, Ferri Oksida 30,44% dan Aluminia 2,58%. Dengan komposisi silica yang cukup besar pada slag nikel diharapkan proses hidrasi yang terjadi antara pasta dan semen agregat membentuk interface yang lebih sempurna,sehingga kehancuran beton tidak terjadi pada interface, atau kalaupun terjadi pada interface diperlukan energi yang cukup tinggi. Limbah slag terbentuk melalui proses peleburan bijih nikel adalah: slag cair dengan temperatur kisaran ±1550°C langsung dikeluarkan melewati slag runner ke kolam granulasi (slag granulation pond) kemudian slag cair yang mengalir akan mengalami pendinginan. Metode pendinginan pada pengolahan slag terdapat 2 proses dimana dibantu dengan semprotan air dengan tekanan tinggi untuk memecah ukuran slag sehingga

terbentuk granule (butiran- butiran) dan pendinginan dengan udara, dimana ukuran butir agregat limbah slag nikel bisa diatur dengan alat pemecah batu (stone crusher).

Fakta *Slag* sebagai pengganti bahan baku jalan

a. Indonesia raja nikel dunia. menguasai 20 persen ekspor bijih nikel dunia.
b. Setiap tahun, ada sekitar 1 juta ton slag dihasilkan dari dalam negeri.
c. Subsitusi terhadap material alam yang kian menipis.
d. Kementerian PUPR akan membangun jalan baru hingga 2030. sepanjang 3.000 km jalan utama, 2.000 km jalan tol, dan 70 km fly over.

Penggunaan material alam sebagai bahan baku jalan selama ini, menyebabkan ketersediaannya semakin berkurang secara bertahap. Biaya untuk pengadaan dan proses memperoleh agregat jalan pun kian hari kian meningkat. Sehingga keputusan pemrosesan bijih nikel di dalam negeri oleh pemerintah dapat menopang kebutuhan ini. Sayangnya, penggunaan slag nikel sebagai bahan baku jalan menemui kendala. Slag nikel dikategorikan sebagai limbah Bahan Beracun dan Berbahaya (B3) kategori bahaya 2, dari sumber spesifik khusus. Kendala bahan perkerasan jalan tidak hanya masalah teknis, tapi juga lingkungan. Pemanfaatannya harus melalui berbagai tahap termasuk berkoordinasi dengan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) untuk pemenuhan aspek tertentu. Berbicara tentang pembuatan jalan, struktur perkerasan jalan umumnya terdiri dari lapis tanah dasar, lapis fondasi bawah, lapis fondasi, dan lapis permukaan. Bentuk fisik limbah slag nikel yang menyerupai batu alam, menyebabkan potensi sebagai bahan jalan sangat dimungkinkan.

Di beberapa daerah, slag nikel bahkan telah dimanfaatkan masyarakat sebagai bahan paving block dan batako. Namun penyerapan volume limbah slag nikel pun sangat rendah yaitu 1% dari volume limbah slag nikel dalam negeri. Satu-satunya pemanfaatan yang potensial menyerap lebih banyak limbah slag nikel adalah sebagai bahan lapis perkerasan jalan. Dikarenakan pengaruhi sifat fisik dan sifat kimia, perlu dilakukan pengujian laboratorium terlebih dahulu sebelum digunakan meluas.

Peraturan Pemerintah No.101 tahun 2014 menyebutkan: pemanfaatan limbah B3 harus dilakukan pengujian untuk mengetahui kandungan zat berbahaya. Salah satu cara adalah dengan uji Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCPL). Uji karakteristik beracun melalui TCLP ini untuk mengetahui konsentrasi zat pencemar pada slag nikel yang akan dibandingkan

dengan persyaratan spesifikasi pada PP 101 Tahun 2014. Berdasarkan hasil pengujian TCLP yang disyaratkan dalam PP 101 tahun 2014 maka limbah slag nikel, kandungan bahan beracun seluruhnya lebih kecil dari kolom TCLP-A dan TCLP-B sesuai Tabel 2.1. Hal tersebut berarti bahwa limbah slag nikel dapat digunakan sebagai bahan perkerasan jalan pengganti agregat alam.

Tabel 2. 2 hasil uji TCLP slag nikel
(*Sumber:binamarga.pu.go.id/index.php/article/pemanfaatan-limbah-slag-nikel- sebagai-bahan-perkerasan-jalan*)

NO	Parameter	Unit	Hasil	Persyaratan		Metode
				TCLP-A	TCLP-B	
1	Antomony	Mg/L	<0,04	6	1	US EPA
2	Arsenic	Mg/L	<0,07	3	0.5	US EPA
3	Barium	Mg/L	0,03	210	35	US EPA
4	Beryllium	Mg/L	<0,03	4	0.5	US EPA
5	Boron	Mg/L	0,05	150	25	US EPA
6	Cadmium	Mg/L	<0,01	0.9	0.15	US EPA

7	Chromium	Mg/L	<0,01	15	2.5	US EPA
8	Copper	Mg/L	<0,01	60	0.15	US EPA
9	Lead	Mg/L	0,06	3	2.5	US EPA
10	Mercury	Mg/L	<0,018	0.3	10	US EPA
11	Molybidenum	Mg/L	<0,01	21	0.5	US EPA
12	Selecium	Mg/L	<0,13	3	0.05	US EPA
13	Silver	Mg/L	<0,03	40	3.5	US EPA
14	Selenium	Mg/L	<0,13	3	0.5	US EPA
15	Zink	Mg/L	<0,03	40	5	US EPA

Hasil Pengujian Laboratorium Sifat Fisik Limbah Slag Nikel

Ada dua proses pengujian yang dilakukan, yakni limbah slag nikel dengan proses pendinginan mendadak, dan limbah slag nikel dengan pendinginan udara. Limbah *slag* nikel dengan proses pendinginan mendadak:

Jika hendak mengetahui apakah dapat dimanfaatkan sebagai bahan jalan, limbah slag nikel harus diuji sifat fisik dan dibandingkan dengan persyaratan bahan jalan sesuai dengan Spesifikasi Umum 2018 revisi 1. Hasil pengujian sifat fisik slag nikel dengan sistem pendinginan mendadak adalah sesuai Tabel 2.1.

Tabel 2. 2 Hasil pengujian sifat fisik slag nikel dengan proses pendinginan mendadak(*Sumber:binamarga.pu.go.id/index.php/article/pemanfaat an-limbah-slag-nikel-sebagai-bahan-perkerasan-jalan*)

No	**Pengujian**	**Hasil pengujian**	**Spesifikasi LFA kelas A**
1	Abrasi	50	Maks. 40%
2	Berat jenis		
	Bulk	2,81	-
	SSD	2,83	-
	Apparent	2,88	
3	Penyerapan, %	0,8	
4	Angularitas,	77/77	Min. 95/90
5	Lolos no 200, %	2,3	
6	Kepipihan %	0	Maks. 10%
7	Pelapukan %	2,26	
8	Gumpalan lempung %	0,018	

Berdasarkan data hasil uji laboratorium untuk sifat fisik *slag* nikel terdapat beberapa catatan penting untuk memanfaatkan sebagai bahan lapis fondasi jalan, yaitu:

Pertama, nilai abrasi yang tinggi dan melebihi standar yang ditentukan yaitu lebih dari 40%. Abrasi merupakan sifat agregat terkait ketahanan terhadap beban. Daya tahan agregat terhadap beban ditunjukkan dengan nilai abrasi.

Agregat yang memenuhi spesifikasi adalah agregat dengan nilai abrasi yang rendah (maksimal 40%). Abrasi merupakan proses pecahnya agregat akibat proses mekanis seperti gaya- gaya yang terjadi selama proses pelaksanaan pembuatan jalan (penimbunan, penghamparan, pemadatan), pelayanan terhadap beban lalu lintas dan proses kimiawi, seperti pengaruh kelembaban, kepanasan, dan perubahan suhu sepanjang hari.

Kedua, nilai bidang pecah/ angularitas slag nikel kurang dari 95/90 dan bentuk fisik yang rounded yang menyebabkan interlocking antar agregat slag nikel menjadi rendah. Hal tersebut dapat menyebabkan nilai stabilitas atau kemampuan perkerasan dalam menerima beban menjadi rendah.

Rendahnya mutu limbah slag nikel tersebut dipengaruhi oleh proses pengelolaan yang dilakukan, di mana lumpur slag nikel yang masih dalam keadaan panas dengan temperatur >1550oC langsung dimasukkan ke dalam slag pond / kolam untuk memudahkan proses pengangkutan ke dumping slag nikel.

Sifat fisik limbah slag nikel dapat digunakan untuk lapisan fondasi berbutir adalah nilai kekuatan daya dukung lapisan tersebut yang diuji melalui tes California Bearing Ratio (CBR). Lapis base fondasi atas mensyaratkan nilai CBR minimal

90%, lapis fondasi bawah nilai CBR minimal 60%, dan timbunan pilihan minimal nilai CBR 10%. Pengujian CBR dilakukan dengan uji CBR kondisi soaked dan unsoaked. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan diperoleh nilai CBR soaked adalah 34% dan CBR unsoaked adalah 44%, berdasarkan hasil pengujian CBR maka slag nikel yang diperoleh cara pendinginan mendadak hanya dapat dimanfaatkan sebagai bahan timbunan pilihan.

Limbah Slag Nikel dengan Proses pendinginan udara:

Penelitian ini berupaya untuk meningkat potensi pemanfaatan yang lebih banyak untuk mengurangi penumpukan limbah slag nikel. Penelitian mengkaji pada sistem pengelolaan, di mana limbah slag nikel akan diuji tanpa melalui proses pendinginan mendadak. Sesuai hasil analisis sebelumnya bahwa sistem pendinginan mendadak memberikan efek negatif limbah slag nikel untuk bahan jalan. Limbah slag nikel yang dicoba tanpa pendinginan mendadak (sistem pendinginan udara) diambil dari PT Growth Java Industry, Cilegon, Jawa Barat. Limbah slag nikel dituangkan pada tempat terbuka dan didiamkan selama beberapa jam sampai mengeras. Kemudian dilakukan proses pemecahan dengan menggunakan alat stone crusher. Berbeda dengan sistem pendinginan mendadak, pada proses ini ukuran limbah slag nikel dapat diatur sesuai kebutuhan. Hasil pengujian sifat fisik slag nikel hasil proses pendinginan tanpa kolam pendingin adalah sesuai Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Hasil pengujian sifat fisik slag nikel tanpa proses pendinginan mendadak(*Sumber:binamarga.pu.go.id/index.php/article/pemanfaa tan-limbah-slag-nikel-sebagai-bahan-perkerasan-jalan)*

Pengujian	**Agregat kasar**	**Agregat sedang**	**Agregat halus**	**Spesifikasi LFA kelas A**
Abrasi, %	39,5	-	-	Maks 40%
Berat jenis				
Bulk	2,82	2,75	2,92	-
SSD	2,86	2,79	2,93	-
Apparent	2,94	2,87	2,95	-
Penyerapan, %	1,40	1,54	0,40	
Angularitas, %	100/100	100/100	-	Min 95/90
Perbandingan lolos # 200/# 400	-	0,26	0,33	Maks 2/3
Kepipihan, %	0	0	-	Maks 10%
Pelapukan, %	0,1	0,2	0,9	Maks 3%
Gumpalan lempung, %	0	0,02	1,22	Maks 5%

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik terhadap slag nikel sistem pendinginan udara, diperoleh hasil bahwa terdapat peningkatan sifat abrasi dan angularitas yang memenuhi syarat spesifikasi, serta ukuran butir / gradasi yang dapat diatur sesuai kebutuhan. Limbah slag nikel tersebut kemudian dilakukan uji CBR.

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik, pemadatan, dan CBR dari limbah slag nikel dengan sistem pendinginan udara, agregat tersebut memenuhi spesifikasi sifat dan syarat lapis fondasi atas perkerasan jalan. Nilai CBR soaked lebih besar dari syarat minimum yaitu 90%.

Tabel 2. 4 Hasil uji sifat-sifat agregat *(sumber: jurnal teknik sipil – macca)*

No Pecah	Jenis Pengujian	Batu Pecah (Split)		Abu Batu	Slag Nikel	Spesifikasi
		1-2	0,5-1			
	Formula	15%	37%	48%	0-25%	
1	Ayakan (%Lolos)					
	3/4”	100	100	100	100	100
	1/2”	58,67	100	100	100	90-100
	3/8”	17,93	89,87	100	100	77-90
	No. 4	0,73	32,63	100	100	53-69
	No. 8	0	0,57	85,80	77,65	33-53
	No. 16		0	60,34	48,85	21-40
	No. 30	0	0	44,17	22,35	14-30
	No. 50	0	0	31,36	3,10	9-22
	No. 100	0	0	20,05	0,55	6-15
	No. 200	0	0	11,32	0,15	4-9
2	Berat jenis agregat					
	a. Bulk	2,548	2,551	2,591	2,640	2,4-2,9
	b. SSD	2,587	2,600	2,706	2,776	2,4-2,9
	c. Apparent	2,652	2,682	2,523	2,563	2,4-2,9
	d. Penyerapan	1,531	1,905	2,670	2,987	Maks. 3%
3	Berat isi					
	a. Gembur	1,429	2,049	1,540	-	-
	b. Padat	1,475	2,219	1,729	-	-

Berdasarkan hasil uji sifat-sifat agregat sesuai tabel di atas, didapatkan secara keseluruhan hasil uji sifat-sifat fisik agregat batu pecah 1-2, batu pecah 0,5- 1, abu batu dan slag nikel memenuhi syarat dalam Spesifikasi Umum Tahun 2018.

Tabel 2. 5 Hasil Uji Marshall (Kadar Slag Nikel Optimum) *(sumber: jurnal teknik sipil – macca)*

Sifat-sifat campuran	Hasil pengujian sifikasi						Spe AC-WC
	0%	5%	10%	15%	20%	25%	
Stabilitas (Kg)	930,64	1056,81	1140,97	1115,98	1080,83	992,96	Min. 800 kg
Flow	2,93	2,70	2,57	2,63	2,80	3,27	2-4 mm
Density (Kg/Mm)	4,40	4,01	3,61	3,13	2,81	2,29	≥2,2 kg/mm³
Vim (%)	15,88	15,11	14,22	14,48	14,77	15,19	3-5%
Vma (%)	72,29	73,45	74,61	78,35	80,94	83,48	Min. 15%
Vfa (%)	2,289	2,310	2,334	2,327	2,319	2,308	Min. 65%
Marshall Quetiont	318,10	390,84	444,71	423,84	387,78	327,40	Min. 250 kg/mm

Pengujian Marshall ini dilakukan kembali dengan menguji campuran variasi slag nikel 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% dan kadar aspal optimum,tujuannya untuk mendapatkan kadar campuran slag nikel optimum. Hasil uji Marshall diatas (tabel 4) dipertimbangkan dalam penentuan besar Kadar Slag Nikel Optimum (KSNO). Kadar Slag Nikel Optimum (KSNO) ini ditentukan berdasarkan variasi-variasi campuran slag nikel yang memenuhi memenuhi 7 karakteristik Marshall.

C. Agregat

Agregat adalah batu pecah, kerikil, pasir atau bahan galian lainnya, baik alam maupun buatan dalam bentuk mineral padat dengan ukuran besar atau kecil. Agregat merupakan komponen penting dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90% sampai 95% agregat berdasarkan persentase berat, atau 75% sampai 85% agregat berdasarkan persentase volume. Menurut Bina Marga 2018 Revisi 2, agregat dibagi

menjadi beberapa bagian, yaitu agregat kasar (agregat tertahan pada saringan No. 4), agregat halus (agregat yang lolos saringan No. 4 dan tertahan saringan No. 200) dan bahan pengisi (agregat lolos saringan No. 200). Adapun agregat terbagi menjadi dua yaitu:

1. Agregat Kasar

Tabel 2. 6 Ketentuan Agregat Kasar *(Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018 Divisi 6 Revisi 2)*

<table>
<tr><th colspan="3">Pengujian</th><th>Metode Pengujian</th><th>Nilai</th></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan</td><td>Natrium Sulfat</td><td rowspan="2">SNI 3407:2008</td><td>Maks. 12%</td></tr>
<tr><td>Magnesium Sulfat</td><td>Maks. 18%</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Abrasi dengan mesin Los Angeles</td><td rowspan="2">Campuran AC Modifikasi dan SMA</td><td>100 putaran</td><td rowspan="4">SNI 2417:2008</td><td>Maks. 6%</td></tr>
<tr><td>500 putaran</td><td>Maks. 30%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya</td><td>100 putaran</td><td>Maks. 8%</td></tr>
<tr><td>500 putaran</td><td>Maks. 40%</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Butir pecah pada agregat kasar</td><td>SMA</td><td rowspan="2">SNI 7619:2012</td><td>100/90%</td></tr>
<tr><td>Lainnya</td><td>95/90%</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Partikel Pipih dan Lonjong</td><td>SMA</td><td rowspan="2">ASTM D4791-10 Perbandingan 1:5</td><td>Maks. 5%</td></tr>
<tr><td>Lainnya</td><td>Maks. 10%</td></tr>
</table>

2. Agregat halus

Tabel 2. 7 Ketentuan Agregat Halus *(Sumber: Spesifikasi Bina Marga 2018 Divisi 6 Revisi 2)*

Pengujian	Metode pengujian	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min 50%
Uji Kadar Rongga Tanpa Pemadatan	SNI 03-6677-2002	Min 45%
Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah pecah dalam Agregat	SNI 03-4141-1996	Maks. 1%
Agregat Lolos Ayakan No.200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10%

Agregat didefenisikan secara umum sebagai formasi kulit bumi yang keras dan padat. ASTM mendifinisikan agregat sebagai suatu bahan yang terjadi dari mineral padat, berupa massa berukuran besar ataupun berupa fragmen- fragmen. Agregat merupakan komponen utama dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90-95% agregat berdasarkan prosentase berat, atau 75-85% agregat berdasarkan prosentase volume.

Pemelihan agregat yang akan digunakan harus memperhatikan ketersediaan bahan dilokasi, jenis konstruksi, gradasi, ukuran maksimum, kebersihan, daya tahan, bentuk, tekstur, daya letak agregat terhadap aspal dan berat jenis lainya.

3. Nilai Kekuasaan Agregat

Daya tahan agregat merupakan ketahanan agregat terhadap adanya penurunan mutu akibat proses mekanis dan kimiawi. Agregat dapat mengalami degradasi, yaitu perubahan gradasi, akibat pecahanya butir agregat. Kehancuran agregat dapat disebabkan oleh proses mekanis, seperti gaya-gaya yang terjadi selama proses pelaksanaan perkerasan jalan (penimbunan,

penghamparan dan pemadatan),pelayanan terhadap beben lalu lintas, dan proses kimiawi, seperti pengaruh kelembapan, kepanasan, dan perubahan suhu sepanjang hari.

Faktor-faktor yang mempengarui tingkat degradasi yang terjadi sangat ditentukan oleh jenis agregat, gradasi campuran, ukuran partikel, bentuk agregat dan besarnya energy yang dialami oleh agregat tersebut:

4. Bentuk Dan Tekstur Agregat

Berdasarkan bentuknya , partikel atau butir agregat dikelompokan sebagai berbentuk bulat, lonjong, pipih, kubus, tak beraraturan atau mempunyai bidang pecahan.

a. Agregat berbentuk bulat

Agregat yang ditemui di sungai pada umumnya telah mengalami erosi, sehingga berbentuk bulat (*rounded*) dan licin. Bidang kontak antar agregat berbentuk bulat sangat sempit, hanya berupa titik sunggung, sehingga menghasilkan penguncian antar agregat yang tidak baik dan menghasilkan kondisi kepadatan lapisan perkerasan yang kurang baik.

b. Agregat Berbentuk Kubus

Agregat berbentuk kubus (cubical) pada umumnya merupakan agregat hasil pemecahan batu massif atau hasil pemecahan mesin pemeca batu. Bidang kontak agregat ini luas, sehingga mempunyai daya saling mengunci yang baik. Kesetabilan yang diperoleh lebih baik dan lebih tahan terhadap pormasi. Agregat ini merupakan agregat yang terbaik untuk dipergunakan sebagai material perkerasan jalan.

c. Agregat Berbentuk Lonjong

Agregat berbentuk lonjong (elongated) dapat ditemukan disungai atau bekas endapan sungai. Agregat dikatakan lonjong jika ukuran terpanjang lebih dari 1,8 kali diameter rata-rata. Indek kelonjongan (elongated index) adalah persentase berat agregat lonjong berat total. Sifat campuran agregat bentuk lonjong ini hampir sama dengan agregat berbentuk bulat.

d. Agregat Berbentuk Pipih

Agregat berbentuk pipih *(flacky)* merupakan hasil produksi dari mesin pemecah batu, dan biasanya agregat ini meman cenderung pecah dengan bentuk pipih. Agregat pipih yaitu agregat yang ketebalannya lebih tipis dari 0,6 kali diameter rata-rata. Indeks kepipihan adalah berat total agregat yang lolos slot dibagi berat total agregat yang tertahan slot pada ukuran nominal tertentu.

D. Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2

Spesifikasi Umum Binamarga 2018 Revisi 2 merupakan evolusi penting dalam standardisasi konstruksi jalan di Indonesia yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Dokumen ini hadir sebagai penyempurnaan dari Spesifikasi Umum 2018 edisi pertama, dengan beberapa modifikasi dan penyesuaian yang signifikan untuk meningkatkan kualitas dan daya tahan infrastruktur jalan nasional. Revisi ini dilakukan berdasarkan evaluasi komprehensif terhadap implementasi spesifikasi sebelumnya, kemajuan teknologi konstruksi jalan, serta kebutuhan adaptasi terhadap kondisi geografis dan klimatologis yang

beragam di Indonesia. Spesifikasi ini menjadi acuan teknis yang bersifat mengikat dalam pelaksanaan konstruksi, rehabilitasi, dan pemeliharaan jalan nasional di seluruh wilayah Indonesia, sehingga menjamin keseragaman standar kualitas infrastruktur jalan.

Dalam penerapannya, Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 mencakup aspek yang lebih komprehensif dibandingkan dengan edisi sebelumnya, meliputi pengaturan tentang material konstruksi, metode kerja, pengendalian mutu, dan sistem evaluasi. Salah satu penekanan utama dalam revisi ini adalah peningkatan durabilitas infrastruktur jalan melalui pengetatan spesifikasi material dan penerapan teknologi baru dalam pencampuran dan penghamparan. Revisi ini juga memberikan perhatian lebih pada aspek ramah lingkungan dengan mendorong penggunaan material daur ulang dan teknologi konstruksi yang hemat energi. Dalam konteks ini, spesifikasi mengatur secara detail tentang prosedur perencanaan campuran (*mix design*), pengendalian kualitas produksi di unit pencampur aspal (*Asphalt Mixing Plant*), hingga metode evaluasi hasil akhir perkerasan jalan. Keseluruhan pendekatan ini bertujuan untuk menghasilkan infrastruktur jalan yang tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga ekonomis dan berkelanjutan dari segi lingkungan. Perubahan signifikan dalam Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 mencakup penyesuaian parameter pengujian material, terutama pada aspek gradasi agregat, karakteristik bitumen, dan sifat-sifat campuran beraspal. Untuk agregat, terdapat penyesuaian persyaratan kekuatan, kebersihan, dan gradasi yang bertujuan untuk meningkatkan *interlocking* antar partikelsehingga

menghasilkan struktur perkerasan yang lebih stabil. Pada bitumen atau aspal, revisi mencakup pengetatan nilai penetrasi, titik lembek, dan daktilitas untuk menjamin ketahanan terhadap deformasi permanen dan retak pada berbagai kondisi beban dan suhu. Sementara untuk campuran beraspal, seperti *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC), terdapat penyesuaian pada rentang nilai *Void in Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), dan parameter stabilitas Marshall yang bertujuan untuk memastikan kinerja optimal perkerasan dalam menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang ekstrim. Perubahan-perubahan ini menghasilkan spesifikasi yang lebih ketat namun juga lebih adaptif terhadap beragam kondisi geografis dan klimatologis di Indonesia.

Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 mengadopsi pendekatan berbasis kinerja (*performance-based*) yang merupakan paradigma baru dalam pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada pemenuhan persyaratan bahan dan metode kerja, tetapi juga pada performa akhir perkerasan jalan selama masa layanannya. Dalam pendekatan ini, kontraktor diberikan fleksibilitas dalam memilih material dan metode kerja selama dapat memenuhi parameter kinerja yang ditentukan, seperti kekesatan permukaan (*skid resistance*), kerataan permukaan (*roughness*), dan ketahanan terhadap deformasi permanen. Untuk mendukung pendekatan ini, spesifikasi mengatur secara detail tentang metode pengujian kinerja perkerasan, termasuk penggunaan alat *Wheel Tracking* untuk mengukur ketahanan terhadap deformasi permanen, pengujian *Hamburg Wheel Tracking*

untuk ketahanan terhadap pengaruh air, dan pengujian *Overlay Tester* untuk ketahanan terhadap retak reflektif. Pendekatan berbasis kinerja ini mendorong inovasi dalam industri konstruksi jalan serta memastikan infrastruktur yang dihasilkan memiliki umur layanan yang optimal.

Dalam aspek pengendalian mutu, Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 menerapkan sistem yang lebih ketat dan terstruktur. Spesifikasi ini mengatur tentang prosedur sampling dan pengujian pada setiap tahapan konstruksi, mulai dari pengujian sumber material, produksi campuran di AMP, penghamparan, hingga evaluasi hasil akhir perkerasan. Sistem pengendalian mutu dalam spesifikasi ini juga mencakup pengaturan tentang frekuensi pengujian, metode interpretasi hasil, dan tindakan korektif yang diperlukan jika terjadi penyimpangan. Sebagai contoh, untuk campuran beraspal, spesifikasi mengatur tentang pengambilan sampel pada unit produksi (AMP) dan di lapangan setelah penghamparan, dengan frekuensi tertentu berdasarkan volume produksi. Hasil pengujian kemudian dievaluasi terhadap *Job Mix Formula* (JMF) yang telah disetujui dan spesifikasi yang berlaku. Jika terjadi penyimpangan yang signifikan, spesifikasi memberikan pedoman tentang tindakan korektif yang harus dilakukan, mulai dari penyesuaian proporsi campuran hingga pembongkaran dan penggantian perkerasan jika diperlukan. Sistem pengendalian mutu yang komprehensif ini menjamin konsistensi kualitas perkerasan jalan di seluruh jaringan jalan nasional.

Implementasi Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 juga memperhatikan aspek keberlanjutan lingkungan dan efisiensi sumber daya.

Dalam konteks ini, spesifikasi mendorong penggunaan material daur ulang seperti *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) dan teknologi campuran aspal dingin (*cold mix asphalt*) yang lebih hemat energi. Spesifikasi ini juga mengatur tentang penggunaan aditif dan modifier yang dapat meningkatkan kinerja perkerasan tanpa dampak negatif terhadap lingkungan. Sebagai contoh, penggunaan aspal modifikasi dengan polimer atau karet dapat meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap deformasi permanen dan retak pada kondisi beban berat dan suhu ekstrim. Selain itu, spesifikasi juga mendorong praktik konstruksi yang meminimalkan gangguan terhadap lingkungan sekitar, seperti pengendalian debu, pengelolaan limbah konstruksi, dan rehabilitasi area yang terganggu selama proses konstruksi. Pendekatan berkelanjutan ini sejalan dengan komitmen global Indonesia terhadap pembangunan infrastruktur yang ramah lingkungan dan mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan.

Salah satu aspek yang sangat diperhatikan dalam Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 adalah adaptasi terhadap perubahan iklim dan kondisi beban lalu lintas yang semakin berat. Spesifikasi ini mengakomodasi penggunaan material dan teknologi yang dapat meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap kondisi cuaca ekstrim, seperti curah hujan tinggi dan fluktuasi suhu yang signifikan. Dalam konteks ini, spesifikasi memberikan pedoman tentang sistem drainase yang efektif untuk mencegah kerusakan perkerasan akibat genangan air dan infiltrasi air ke struktur perkerasan. Spesifikasi juga mengatur tentang penggunaan material yang memiliki ketahanan terhadap *stripping* (pelepasan ikatan antara aspal dan agregat akibat pengaruh air), seperti penggunaan *anti-*

stripping agent dan filler aktif. Untuk mengantisipasi beban lalu lintas yang semakin berat, spesifikasi juga mengatur tentang perencanaan struktur perkerasan yang memadai dan penggunaan material dengan kekuatan tinggi, seperti aspal modifikasi dan agregat dengan nilai abrasi rendah. Pendekatan adaptif ini memastikan bahwa infrastruktur jalan nasional dapat berfungsi optimal pada berbagai kondisi lingkungan dan beban lalu lintas yang ada di Indonesia.

Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 juga memberikan perhatian khusus pada aspek keselamatan konstruksi dan keselamatan pengguna jalan. Dalam aspek keselamatan konstruksi, spesifikasi mengatur tentang prosedur kerja yang aman, penggunaan alat pelindung diri, dan pengendalian risiko pada setiap tahapan konstruksi. Untuk keselamatan pengguna jalan, spesifikasi mengatur tentang karakteristik permukaan jalan yang dapat memberikan tingkat keselamatan optimal, seperti kekesatan permukaan (*skid resistance*), kerataan permukaan, dan sistem drainase yang efektif. Spesifikasi juga mengatur tentang penggunaan material yang dapat meningkatkan visibilitas pada kondisi hujan atau malam hari, seperti agregat dengan nilai reflektivitas tinggi dan aspal berwarna. Selain itu, spesifikasi juga memberikan pedoman tentang manajemen lalu lintas selama proses konstruksi untuk meminimalkan risiko kecelakaan bagi pekerja konstruksi dan pengguna jalan. Pendekatan komprehensif terhadap aspek keselamatan ini menjamin bahwa pembangunan infrastruktur jalan tidak hanya menghasilkan jalan dengan kualitas tinggi, tetapi juga jalan yang aman bagi semua pengguna.

Dalam implementasinya, Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 tidak hanya berfungsi sebagai dokumen teknis, tetapi juga sebagai instrumen untuk meningkatkan kapasitas industri konstruksi jalan di Indonesia. Spesifikasi yang komprehensif dan berbasis kinerja ini mendorong kontraktor, konsultan, dan produsen material untuk terus meningkatkan kompetensi dan kapasitas teknologinya. Dalam jangka panjang, hal ini akan meningkatkan daya saing industri konstruksi jalan Indonesia di tingkat regional dan global. Selain itu, implementasi spesifikasi yang konsisten juga akan menghasilkan infrastruktur jalan dengan kualitas yang seragam di seluruh wilayah Indonesia, yang pada gilirannya akan mendukung pembangunan ekonomi yang lebih merata. Dengan demikian, Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 tidak hanya menjadi standar teknis untuk konstruksi jalan, tetapi juga menjadi katalisator untuk transformasi industri konstruksi jalan di Indonesia menuju industri yang lebih modern, efisien, dan berdaya saing tinggi.

Dalam konteks pembangunan nasional, implementasi Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 memiliki implikasi ekonomi yang signifikan. Dengan standar kualitas yang lebih tinggi, infrastruktur jalan yang dihasilkan akan memiliki umur layanan yang lebih panjang dan biaya pemeliharaan yang lebih rendah. Hal ini akan mengoptimalkan penggunaan anggaran infrastruktur dan memungkinkan alokasi sumber daya yang lebih efisien untuk memenuhi kebutuhan pembangunan di sektor lain. Selain itu, jaringan jalan dengan kualitas tinggi juga akan mengurangi biaya transportasi dan logistik, yang pada gilirannya akan meningkatkan daya saing produk Indonesia di pasar domestik

dan global. Dampak ekonomi positif ini akan semakin signifikan dengan meningkatnya konektivitas antar wilayah di Indonesia, yang akan mendorong pertumbuhan ekonomi yang lebih inklusif dan berkelanjutan. Dengan demikian, implementasi Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 bukan hanya investasi dalam infrastruktur fisik, tetapi juga investasi strategis untuk mendukung pertumbuhan ekonomi jangka panjang Indonesia.

Mengingat kompleksitas dan cakupan yang luas dari Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2, implementasi yang efektif memerlukan koordinasi yang baik antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah pusat, pemerintah daerah, kontraktor, konsultan, produsen material, dan akademisi. Dalam konteks ini, Direktorat Jenderal Bina Marga telah mengembangkan program sosialisasi dan pelatihan yang komprehensif untuk memastikan pemahaman yang seragam tentang spesifikasi ini di kalangan praktisi konstruksi jalan. Selain itu, Direktorat Jenderal Bina Marga juga telah mengembangkan sistem monitoring dan evaluasi yang efektif untuk memastikan kepatuhan terhadap spesifikasi dalam pelaksanaan proyek jalan nasional. Dengan pendekatan yang terkoordinasi dan sistematis ini, implementasi Spesifikasi Binamarga 2018 Revisi 2 diharapkan dapat berjalan dengan efektif dan menghasilkan infrastruktur jalan dengan kualitas yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Dalam jangka panjang, hal ini akan berkontribusi pada terwujudnya visi Indonesia untuk memiliki jaringan infrastruktur jalan yang modern, efisien, dan berkelanjutan yang mendukung pertumbuhan ekonomi dan peningkatan kesejahteraan masyarakat.

E. Kajian Hasil Penelitian Terdahulu

Untuk membandingkan penelitian penulis dengan penelitian sebelumnya maka penulis mengambil beberapa contoh penelitian yang telah dilakukan oleh orang-orang sebelumnya. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan pemanfaatan slag nikel sebagai bahan tambah campuran aspal beton.

1. Ratno Wijaya, Sotya Astutiningsih (2021) Studi Literatur Potensi Pemanfaatan Terak Nikel (Slag Nikel) sebagai Agregat pada Mortar dan Beton : Dari studi review literatur yang didapatkan, terak nikel berpotensi untuk digunakan sebagai agregat halus maupun agregat kasar pada beton dan mortar. Meski terjadi fluktuasi terhadap sifat mekaniknya namun masih dapat diatasi dengan penggunaan terak nikel sebagai agregat kasar dan halus secara bersamaan. Hasil studi juga menunjukkan bahwa terak nikel dapat digunakan sebagai agregat halus maupun kasar pada beton hingga kadar 100% serta sebagai agregat halus pada mortar aplikasi aspal hingga kadar 50%.
2. Cyntia Sielviana Widya Lambe, Alpius,Rais Rachman (2019) Pengujian Slag Nikel Sebagai Pengganti Agregat Pada Campuran HRS-Base Utami Arruantasik Demmalino: Melalui uji Marshall diperoleh karakteristik campuran Lataston HRS-Base bergradasi senjang dan semi senjang dengan kadar aspal 5,0%, 5,93%, 6,35%, 6,78, dan 7,2% memenuhi persyaratan. Hasil pengujian Marshall Immertion campuran Lataston HRS-Base bergradasi senjang dan semi senjang pada kadar aspal optimum 6,35%

mendapatkan Indeks Perendaman (IP) / Indeks Kekuatan Sisa (IKS) / Durabilitas campuran sebesar 97,03% dan 98,00% Dimana dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan slag nikel sebagai pengganti agregat kasar dapat dimanfaatkan sebagai bahan perkerasan jalan karena memenuhi Standar Spesifikasi Bina Marga.

3. Rindu Twidi Bethary , Dwi Esti Intari Penggunaan Limbah Slag Nikel Untuk Material Jalan Ramah Lingkungan (2021):
4. Produksi nikel yang semakin meningkat berbanding lurus dengan produksi slag nikel sebagai produk limbah dari pengolahan nikel. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi dan pengendalian kinerja campuran beraspal dengan menggunakan slag nikel pada lapisan perkerasan Laston lapis antara (AC- BC). Pengujian yang dilakukan antara lain karakteristik sifat fisik dari material yang digunakan yaitu aspal, agregat dan slag nikel, kemudian untuk sifat kimiawi dan mineral dari slag nikel dilakukan pengujian pengujian X-ray fluorescence spectrometry (XRF), X-ray diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscope (SEM). Sedangkan metode empiris dengan pengujian Marshall mengacu pada ketentuan sifat-sifat campuran Laston lapis antara (AC-BC) Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan Bina Marga Tahun 2018 dan untuk metode mekanistiknya berdasarkan pengujian modulus resilien dengan alat UMATTA. Slag nikel dikategorikan sebagai limbah Bahan Beracun dan Berbahaya (B3) sehingga dibutuhkan pengujian untuk mengetahui kandungan zat berbahaya. Salah satu cara adalah dengan uji Toxicity Characteristic

Leaching Procedure (TCPL) dari pengujian yang dilakukan nilainya lebih kecil dan memenuhi persyaratan begitu pula hasil pengujian karakteristik fisik slag nikel memenuhi persyaratan yang digunakan dalam material konstruksi jalan. Sehingga slag nikel ini merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk material konstuksi jalan ramah lingkungan.

5. Andi Batari Angka, Kushari2 (2017) slag nikel sebagai bahan subtitusi pada karakteristik campuran ac-base
    1. Karakteristik pada campuran Aspal Beton AC-BASE yang menggunakan slag nikel sebagai bahan substitusi abu batu dengan variasi 25%, 50%, 75% dan 100% diperoleh sebagai berikut :
        a. Nilai maksimum stabilitas 1398.34 kg , diperoleh pada variasi substitusi slag nikel 25%.
        b. Nilai maksimum flow 3.16 mm, diperoleh pada variasi substitusi slag nikel 2%. ,
        c. Nilai maksimum VIM 6.611%, diperoleh pada variasi substitusi slag nikel 100%.
        d. Nilai maksimum VMA 18.691%, diperoleh pada variasi substitusi slag nikel 100%.
        e. Nilai maksimum VFB 79.982%, diperoleh pada variasi substitusi slag nikel 25%.
        f. Nilai maks. koefisien Marshall 442.51kg/mm, diperoleh pada variasi substitusi slag nikel 25%.
    2. Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) yang memenuhi digunakan

dalam campuran lapis perkerasan 5,6 %

6. Sriwahyuni Nensi, Mustakim, dan Kasmaida (2024) berjudul "Analisis Stabilitas Marshall Terhadap Penggunaan Marmer Sebagai Subtitusi Agregat Kasar Pada Campuran Ac-Wc". Tujuan penelitian untuk mengevaluasi kekuatan, stabilitas Marshall, dan kadar aspal optimum (KAO) campuran AC- WC dengan substitusi limbah marmer melalui metode eksperimental laboratorium. Hasil penelitian, pada variasi kadar aspal (4,5% hingga 6,5%), menunjukkan bahwa semua parameter Marshall—termasuk stabilitas (maksimum 1346,75 kg pada 6,5% aspal, minimum 1038,48 kg pada 4,5% aspal), VMA (maksimum 20,88% pada 6,5% aspal, minimum 15,50% pada 4,5% aspal), VIM (maksimum 4,58% pada 6,5% aspal, minimum 3,45% pada 4,5% aspal), VFB (maksimum 79,20% pada 6,5% aspal, minimum 68,59% pada 4,5% aspal), *flow* (maksimum 3,91 mm pada 6,5% aspal, minimum 2,75 mm pada 4,5% aspal), dan MQ (maksimum 341,10 kg/mm pada 6,5% aspal, minimum 262,44 kg/mm pada 4,5% aspal)—memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Berdasarkan analisis ini, Kadar Aspal Optimum (KAO) ditetapkan sebesar 5,50%, menyimpulkan bahwa penggunaan limbah marmer sebagai substitusi agregat kasar pada campuran AC-WC layak dan memenuhi standar yang berlaku.
7. Hermana Kaselle1a , Raynaldo Bunga Allo2b Pengaruh Penggunaan Slag Nikel Pada Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton Geopolimer (2021): Hasil penelitian diperoleh nilai kuat tekan beton geopolimer yang menggunakan

slag nikel pada umur 7 dan 28 hari sebesar 17,942 MPa dan 21, 738 Mpa, sedangkan beton kontrol diperoleh kuat tekan berturut-turut sebesar 9,960MPa dan 16,643 MPa. Peningkatan kuat tekan dengan penggunaan slag nikel sebesar 21,157%. Nilai kuat lentur rata-rata beton geopolimer yang menggunakan slag nikel 3,928 MPa, sedangkan balok kontrol sebesar 3,324 MPa. Peningkatan nilai kuat lentur beton dengan penggunaan slag nikel sebagai agregat halus sebesar 18,182% .

8. Komang Saka Suwindu, Herman Parung, Desi Sandy Karakteristik Beton MutuTinggi dengan Substitusi Slag Baja dan Slag Nikel Sebagai Agregat Kasar(2020): Hasil penelitian menunjukkan subtitusi slag baja dan slag nikel terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur adalah semakin besar presentase slag nikel maka semakin besar kenaikan kuat tekan, kuat tarik belah dan kuat lentur. Nilai kuat tekan dengan subtitusi slag nikel 20% meningkat 3,347%; dan untuk subtitusi slag nikel 30% meningkat sebanyak 4,603%. Nilai kuat tarik belah dengan subtitusi slag nikel 20% meningkat 30,137%; dan untuk subtitusi slag nikel 30% meningkat sebanyak 46,585%. Nilai kuat lentur dengan subtitusi slag nikel 20% meningkat 31,674%; dan untuk subtitusi slag nikel 30% meningkat sebanyak 66,179%. Hubungan kuat tekan dengan kuat tarik belah rata-rata yang diperoleh pada beton mutu tinggi dengan subtitusi slag nikel 0%, 20%, 30% pada umur 28 hari adalah 9,3%. Hubungan kuat tekan dengan kuat lentur ratarata diperoleh pada beton mutu tinggi dengan subtitusi slag nikel 0%, 20%, 30% pada umur 28 hari adalah 0,621 .

9. Mega Paembonan,Frans Phengkars,Suryanti Rapang Tonapa Penggunaan Blast Slag Nickel Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Beton Geopolimer(2023): Blast slag nickel adalah limbah dari pabrik industri yang menghasilkan nikel. Pada pengujian kuat tekan beton didapatkan nilai hasil pengujian tertinggi diperoleh pada umur 28 hari untuk variasi 17,5 % yaitu sebesar 33,498 Mpa, untuk variasi 15% sebesar 32,272 Mpa, dan untuk variasi 0% sebesar 31,045 Mpa. Pengujian kuat tarik belah beton didapatkan nilai hasil pengujian tertinggi diperoleh pada variasi 17,5% sebesar 2,972 Mpa, variasi 15% sebesar 2,760 Mpa, dan variasi 0% sebesar 2,619 Mpa. Pengujian modulus elastisitas beton didapatkan nilai modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada variasi 17,5% sebesar 37287,135 Mpa, variasi 15% sebesar 35900,552 Mpa, dan variasi 0% sebesar 32113,473 Mpa Penggunaan blast slag nickel sebagai pengganti agregat kasar serta penggunaan fly ash pada pasta beton geopolimer mempengaruhi nilai dari kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton. Dimana semakin banyak variasi fly ash yang digunakan maka nilai yang dihasilkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas beton semakin meningkat.

10. Utami Arruantasik Demmalino, Cyntia Sielviana Widya Lambe, Alpiu, Rais Rachman Pengujian Slag Nikel Sebagai Pengganti Agregat Pada Campuran HRS-Base(2023): Hasil penelitian yang dilakukan di laboratorium Jalan dan Aspal Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas

Kristen Indonesia Paulus Makassar, menunjukkan bahwa karakteristik bahan perkerasan berupa slag nikel dari Soroako Kab. Luwu Timur memenuhi spasifikasi sebagai bahan lapisan permukaan jalan. Melalui uji Marshall diperoleh karakteristik campuran Lataston HRS-Base bergradasi senjang dan semi senjang dengan kadar aspal 5,0%, 5,93%, 6,35%, 6,78, dan 7,2% memenuhi persyaratan. Hasil pengujian Marshall Immertion campuran Lataston HRS-Base bergradasi senjang dan semi senjang pada kadar aspal optimum 6,35% mendapatkan Indeks Perendaman (IP) / Indeks Kekuatan Sisa (IKS) / Durabilitas campuran sebesar 97,03% dan 98,00% Dimana dari hasil penelitian ini dapat ditarik kesimpulan bahwa penggunaan slag nikel sebagai pengganti agregat kasar dapat dimanfaatkan sebagai bahan perkerasan jalan karena memenuhi Standar Spesifikasi Bina Marga.

11. Ahmad Rifqi Asrib1 , Arjoansyah 2 Pembangunan Struktur Bangunan Air Menggunakan Limbah Slag Nikel sebagai Agregat Kasar(2019): Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemeriksaan karakteristik slag nikel masuk dalam kategori yang disyaratkan untuk digunakan sebagai agregat kasar pada beton. Pada berat campuran beton normal diperoleh berat isi 2270 kg/m2. Untuk penggunaan variasi 50% slag nikel. Nilai berat isi campuran meningkat sebesar 16 %. kemudian Meningkat 24% pada penggunaan agregat 100% slag nikel. Pada hasil pengujian kuat tekan. Beton alami pada umur 56 hari lama perendaman 55 hari memiliki kenaikan 12,27 %. Pada umur 90 hari, perendaman 89 hari memiliki

kenaikan sebesar 16,29%. Sedangkan Beton 50% slag pada umur 56 hari, perendaman 55 hari memiliki kenaikan 14,28%. Pada umur 90 hari, perendaman 89 hari memiliki kenaikan sebesar 20,29 %. Kemudian Beton 100% slag nikel pada umur 56 hari lama perendaman 55 hari memiliki kenaikan 17 %. Pada umur 90 hari lama perendaman 89 hari memiliki kenaikan sebesar 26,63%. Hasil penelitian menggambarkan penggunaan limbah slag nikel dapat dijadikan pengganti agregat kasar untuk struktur bangunan air.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah eskperimental Labolatorium, yaitu metode yang dilakukan dengan pengujian di Laboratorium untuk mendapatkan data. Kemudian melakukan pengolahan data untuk mengetahui pengaruh dari bahan slag nikel terhadap lapisan aspal AC-WC terhadap nilai marshall.

B. Lokasi dan waktu penelitian

1. Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan Di Laboratorium Jalan Dan Aspal Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Parepare dan waktu penelitian dilakukan pada bulan mei sampai dengan bulan juni. Adapun material yang digunakan yaitu slag nikel berasal dari PT. Huady Nickel-Alloy Indonesia Bantaeng.

2. Lokasi pengambilan slag nikel

Adapun material yang digunakan yaitu slag nikel berasal dari PT. Huady Nickel-Alloy Indonesia Bantaeng.

3. Waktu penelitian

Kegiatan penelitian ini akan dilaksanakan berdasarkan penjabaran kegiatan yang diuraikan pada tabel berikut:

Tabel 3. 1 Waktu Penelitian

No.	Kegiatan	Waktu Penelitian (Minggu)															
		Maret				April				Mei				Juni			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	14	16
1	Studi Literatur																
2	Pengumpulan Material																
3	Pengujian Agregat																
4	Mix Design																
5	Pembuatan Sampel Briket																
6	Pengujian Marshall																
7	Analisis Data																
8	Hasil dan Pembahasan																

C. Alat dan bahan

Untuk alat dan bahan yang digunakan tersedia dilaboratorium pengujian Jalan dan Aspal Universitas Muhammadiyah Parepare.

1. Alat

   a. Mesin Los Angeles

   b. Satu Set Saringan

   c. Oven

   d. Timbangan

   e. Piknometer

   f. Alat Tekan Marshall

g. Alat Cetak Benda Uji

h. Alat Penumbuk Manual

i. Water Bath.

2. Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini :

a. Agregat kasar yang digunakan berasal dari PT Huadi Nickel-Alloy Indonesia di Bantaeng

b. *Filler* atau material lolos saringan No. 200 yang digunakan dalampenelitian ini adalah semen (*Portland Cement*).

c. Aspal yang digunakan pada penelitian ini adalah aspal keraspenetrasi 60/70.

D. Prosedur Penelitian

Tahapan persiapan merupakan rangkaian kegiatan awal sebelum memulai pengumpulan dan pengolahan data. Pada tahan persiapan ini disususn hal-hal yang harus dilakukan agar tujuan penulisan tugas akhir ini menjadi teratur dan terstruktur, sehingga waktu penulisan tugas akhir ini berjalan efektif dan efisian. Pemanfaatan slag nikel sebagai bahan pengganti agregat kasar aspal AC-WC merupakan sebuah penelitian yang prosesnya dimulai dari pemeriksaan material aspal sesuai dengan spesifikasi. Penentuan kadar aspal optimum campuran slag nikel sebagai bahan tambah campuran aspal AC-WC.

E. Teknik pengumpulan data

Teknik pengumpulan data dilaksanakan dengan metode eskperimental terhadap beberapa benda uji dari berbagai kondisi perlakuan yang di uji di

labolatorium. Jenis data pada penelitian ini dikelompokan menjadi 2 yaitu data primer dan sekunder.

1. Data primer adalah data yang dikumpulkan secara langsung melalui serangkaian kegiatan percobaan yang dilakukan sendiri dengan mengacu pada petunjuk manual yang ada, misalnya dengan mengadakann penelitian atau pengujian secara langsung seperti pengujian propertis aspal dan pengujian agregat.
2. Data sekunder adalah data yang diperoleh secara tidak langsung, untuk pengujian aspal dan slag nikel diperoleh dari studi literatur dan dilingkungan sekitar.

F. Teknik analisis data

Teknik analisis data dilakukan di Laboratorium Jalan dan Aspal Universitas Muhammadiyah Parepare.

1. Pengujian Propertis Aspal

   Pengujian Aspal penetrasi 60/70 adalah Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat aspal meliputi pengujian penetrasi, titik lembek, titik nyala, daktilitas, berat jenis dan kelarutan dengan standar Bina Marga. Pengujian Titik Nyala Aspal dan Titik Bakar Aspal (SNI 2433:2011).

   a. Pengujian Penetrasi Aspal (SNI 06-2456-1991).

      Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk memeriksa tingkat kekerasan aspal. Pemeriksaan ini dilakukan dengan memasukkan jarum penetrasi berdiameter 1 mm dengan

menggunakan beban seberat 50 gram sehingga diperoleh beban gerak seberat (berat jarum + beban) selama 5 detik pada temperatur 25˚C. Besarnya nilai penetrasi diukur dan dinyatakan dalam angka yang merupakan kelipatan 0,1 mm. Nilai penetrasi sangat sensitive terhadap suhu sehingga pengukuran di atas suhu kamar akan menghasilkan nilai yang berbeda.

b. Pengujian Titik Lembek Aspal (SNI 2434:2011).

Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan nilai / suhu titik lembek aspal yang berkisar antara 30 ^{o}C - 200^{o}C. Titik lembek adalah suhu dimana suatu lapisan aspal dalam cincin yang diletakkan horizontal di atas larutan air atau gliserine yang dipanaskan secara teratur menjadi lembek karena beban bola baja dengan diameter 9,53 mm seberat ± 3,5 gram yang diletakkan di atasnya sehingga lapisan aspal tersebut jatuh melalui jarak 25,4 mm (1 inci).

c. Pengujian Daktilitas Aspal (SNI 2432:2011).

Pengujian daktilitas dibutuhkan untuk mengetahui sifat kohesi dan plastisitas aspal. Pemeriksaan dilakukan dengan mencetak aspal dalam cetakan dan meletakkan contoh aspal ke dalam tempat pengujian. Tempat pengujian berisi cairan dengan berat jenis yang mendekati berat jenis aspal. Nilai daktilitas aspal adalah panjang contoh aspal ketika putus pada saat

dilakukan penarikan dengan kecepatan 5 cm/menit. Pemeriksaan ini bertujuan untuk menguji kekuatan tarik aspal dengan cara mengukur jarak terpanjang yang dapat ditarik antara dua cetakan yang berisi aspal keras sebelum putus, pada suhu dan kecepatan tertentu.

d. Pengujian Berat Jenis Aspal (SNI 2441:2011).

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis aspal dengan piknometer. Berat jenis aspal diperlukan untuk perhitungan dalam analisa campuran. Berat jenis aspal adalah perbandingan antara berat aspal dengan berat air suling dengan isi yang sama pada suhu tertentu.

2. Pengujian agregat

a. Pengujian Analisa Saringan (SNI 03-1968-1990).

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan distribusi ukuran butiran agregat halus dan kasar, yang sangat penting untuk memastikan gradasi yang optimal demi kepadatan, kekuatan, dan kemudahan pengerjaan campuran beton atau aspal. Prosedurnya melibatkan pengeringan sampel agregat hingga berat konstan pada suhu 110±5∘C, penimbangan sampel, kemudian pengayakan melalui serangkaian ayakan standar yang disusun dari ukuran terbesar hingga terkecil menggunakan alat pengayak mekanis atau manual, dan terakhir menimbang material yang tertahan pada setiap ayakan serta pan untuk menghitung persentase lolos

kumulatif dan memplot kurva gradasi.

b. Pengujian Material Lolos Ayakan No. 200 (SNI 03-4142-1996).

Tujuan pengujian ini adalah untuk menentukan persentase material yang lebih halus dari ayakan No. 200 (0,075 mm) dalam agregat, karena kandungan material halus yang berlebihan dapat mengurangi kualitas ikatan dan meningkatkan kebutuhan air dalam campuran. Prosedurnya meliputi penimbangan sampel agregat kering awal, pencucian sampel dengan air sambil diaduk kuat untuk memisahkan partikel halus, penyaringan air cucian melalui ayakan No. 200 hingga air yang lolos jernih, dan penimbangan kembali agregat yang tertahan setelah dikeringkan oven pada suhu 110±5∘C untuk menghitung persentase material lolos ayakan tersebut.

c. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat (SNI 03-1969-1990 dan SNI 031970-1990).

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis agregat (kering oven, jenuh permukaan kering, dan semu) yang penting untuk perhitungan volume dan proporsi campuran, serta kapasitas penyerapan air agregat yang krusial untuk koreksi kadar air dalam desain campuran. Prosedur umumnya melibatkan perendaman sampel agregat selama 24±4 jam hingga jenuh, penimbangan dalam kondisi jenuh permukaan kering (SSD) yang ditentukan secara spesifik untuk agregat kasar (dikeringkan

permukaan) dan halus (menggunakan kerucut uji), penimbangan saat terendam air (untuk agregat kasar) atau dalam piknometer (untuk agregat halus), dan penimbangan setelah dikeringkan oven pada suhu 110±5∘C, kemudian perhitungan berat jenis dan penyerapan berdasarkan berat-berat yang diperoleh.

d. Pengujian Keausan Agregat dengan mesin Los Angeles (SNI 2417:2008).

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan agregat kasar terhadap abrasi, benturan, dan gilas, yang sangat penting untuk agregat yang digunakan dalam perkerasan jalan atau struktur yang mengalami beban dinamis dan gesekan. Prosedurnya meliputi penimbangan sampel agregat kering dengan gradasi tertentu, memasukkannya ke dalam silinder mesin Los Angeles bersama sejumlah bola baja abrasif, memutar mesin sejumlah putaran yang ditentukan (misalnya 500 putaran) dengan kecepatan konstan, kemudian mengeluarkan sampel, mencucinya untuk menghilangkan material halus, mengeringkan kembali, dan menyaring serta menimbang agregat yang tertahan ayakan No. 12 (1,70 mm) untuk menghitung persentase keausan.

e. Pengujian Kelekatan Agregat terhadap Aspal (SNI 2439:2011).

Tujuan pengujian ini adalah untuk menilai kemampuan aspal melekat pada permukaan agregat dan mempertahankan ikatan tersebut di hadapan air, yang sangat krusial untuk mencegah *stripping* pada perkerasan aspal. Prosedurnya meliputi

pemanasan dan pelapisan sampel agregat dengan aspal pada proporsi tertentu hingga merata, pendinginan sampel, perendaman dalam air suling pada suhu tertentu (misalnya 25∘C atau 60∘C) selama periode waktu yang ditentukan (misalnya 24 jam), dan terakhir pengamatan visual persentase luas permukaan agregat yang masih tertutup aspal.

G. Rancangan Campuran Mix Design

Urutan perencanaan campuran pada penelitan ini adalah sebagai berikut :

1. Menghitung komposisi campuran berdasarkan data analisa saringan masing- masing agregat.
2. Menentukan kadar aspal rencana untuk mencari kadar aspal optimum.
3. Membuat benda uji (briket) untuk masing-masing komposisi campuran sebanyak 3 sampel untuk tiap % kadar aspal rencana, sehingga total benda uji yang akan dibuat adalah sebanyak 15 briket.
4. Dari hasil perhitungan didapat kadar aspal optimum.

Tabel 3. 2 Rancangan campuran aspal AC-WC

KOMPONEN		KOMPOSISI	KADAR ASPAL RENCANA (%)				
		AGREGAT	4	4.5	5.00	5.5	6
a	Agregat 1-2 cm	20%	19.20	19.10	19.00	18.90	18.80
b	Agregat 0,5-1	35%	33.60	33.43	33.25	33.08	32.90
c	Abu Batu	40%	38.40	38.20	38.00	37.80	37.60
e	Filler	5%	4.80	4.78	4.75	4.73	4.70
TOTAL AGG. CAMPURAN (%)		100%	96.00	95.50	95.00	94.50	94.00
TOTAL CAMPURAN (%)			100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Variasi slag nikel direncanakan sebagai subtitusi dari agregat kasar 0,5 – 1 cm sebesar 100% dari volume campuran. Selanjutnya tabel rancangan campuran dengan subtitusi slag nikel adalah sebagai berikut :

Tabel 3. 3 Rancangan campuran aspal subtitusi slag nikel

KOMPONEN		KOMPOSISI	KADAR ASPAL RENCANA (%)				
		AGREGAT	4	4.5	5.00	5.5	6
a	Agregat 1-2 cm	20%	19.20	19.10	19.00	18.90	18.80
b	Agregat 0,5-1	0	0	0	0	0	0
c	Abu Batu	40%	38.40	38.20	38.00	37.80	37.60
e	Filler	5%	4.80	4.78	4.75	4.73	4.70
f	Slag Nikel	35%	33.60	33.43	33.25	33.08	32.90
TOTAL AGG. CAMPURAN (%)		100%	96.00	95.50	95.00	94.50	94.00
TOTAL CAMPURAN (%)			100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

H. Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dalam penelitian ini mengikuti prosedur yang ada dalam manual pemeriksaan bahan jalan PC-0201-76.

1. Dilakukan penimbangan agregat sesuai dengan presentase pada target gradasi yang diinginkan untuk masing-masing fraksi dengan berat campuran untuk diameter 4 inci, kemudian dilakukan pengeringan campuran agregat tersebut sampai beratnya tetap sampai suhu (105±)°
2. Timbang agregat kasar dan aspal sesuai berat yang dibutuhkan pada variasi campuran.
3. Dilakukan pemanasan aspal untuk pencampuran slag nikel pada temperature 110°c, kemudian lakukan pencampuran agregat dan

aspal diatas pemanas dan diaduk hingga rata.

4. Setelah temperature tercapai yaitu pada suhu 140-150°C, maka campuran tersebut dimasukan kedalam cetakan yang telah disiapkan, serta bagian bawah dan atas cetakan diberi sepotong kertas filter atau kertas lilin yang telah dipotong sesuai dengan diameter cetakan sambil ditusuk tusuk dengan spatula sebanyak 15 kali di bagian tepi dan 10 kali di bagian tengah.
5. Pemadatan standar dilakukan dengan pemadat manual dengan jumlah tumbukan 75 kali di bagian sisi atas kemudian dibalik dan di sisi bagian bawah juga di tumbuk sebanyak 75 kali secara bergantian pada 15 sampel benda uji.
6. Setelah proses pemadatan selesai benda uji didiamkan agar suhunya turun, setelah dingin benda uji dikeluarkan dengan ejector dan diberi kode.
7. Benda uji dibersihkan dari kotoran yang menempel dan diukur tinggi dengan jangka sorong, benda uji dengan ketelitian 0,1 mm dan ditimbang beratnya di udara.
8. Benda uji direndam dalam air selama 16-24 jam supaya jenuh.
9. Setelah jenuh benda uji ditimbang dalam air
10. Benda uji dikeluarkan dari bak dan dikeringkan dengan kain pada permukaan agar kondisi kering permukaan jenuh kemudian di timbang
11. Benda uji direndam dalam bak perendaman pada suhu 60°C selama 30 menit.

Pengujian benda uji dengan alat marshall.

I. Pengujian Marshall

Untuk pengujian uji Marshall dilakukan perkiraan awal Kadar Aspal Optimum yang dapat diperoleh dari rumus persamaan :

Pb= 0,035 (%CA) + 0,045 (%FA) + 0,18 (%*FF*) + Konstanta

Dimana:

Pb = Perkiraan kadar aspal rencana

CA = *Coarse Aggregate* (agregat kasar)

FA = *Fine Aggregate* (agregat halus)

FF = *Fine Filler* (bahan pengisi) Konstanta = 0,5 – 1,0 untuk Laston

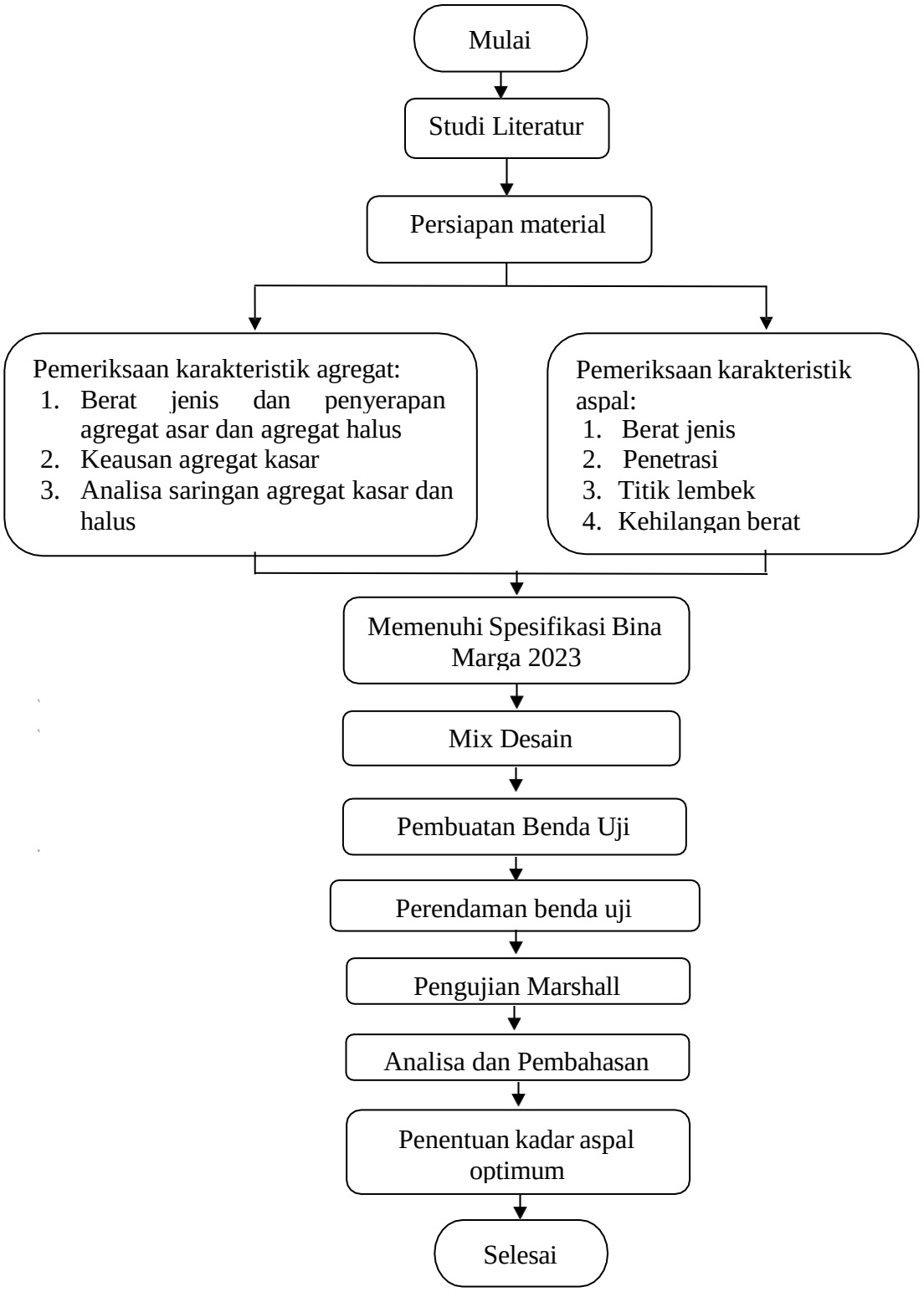
Selanjutnya dibuat benda uji dengan kadar aspal tersebut diatas, dengan pembulatan 0,5 % ditambah dengan tiga kadar aspal diatas optimum dan dua kadar aspal dibawah optimum selisih masing- masing 0,5 %. Benda uji yang dibuat masing masing tiga buah benda uji untuk masing-masing kadar aspal. Benda uji standar yang digunakan dalam pengujian adalah 63,5 mm (2,5 *inch*). Temperatur pencampuran dan pemadatan dilakukan pada saat viscositas aspal berkisar 170 ± 20 centistokes untuk pencampuran dan pada 280 ± 30 centistokes pada saat pemadatan.

Untuk pemadatan dilakukan sebanyak 2 x 75 tumbukan, dengan menggunakan penumbuk Marshall. Benda uji setelah dipadatkan, disimpan pada suhu ruang selama 24 jam, kemudian benda uji ditimbang di udara, di dalam air dan

dalam kondisi kering permukaan jenuh *Saturated Surface Dry*, Selanjutnya direndam pada temperatur 60ºC selama 30 menit dan siap untuk diuji.

Parameter – parameter yang diperoleh dalam pengujian adalah stabilitas, kelelehan (flow), *Marshall Question* (MQ), VIM, VMA dan VFB. Selanjutnya dibuat grafik yang menghubungkan kadar aspal dengan masing-masing parameter tersebut. Dari grafik yang dibuat dapat ditentukan kadar aspal optimum, yaitu kadar aspal didalam rentang yang memenuhi semua kriteria rancangan campuran aspal AC-WC. Dalam penelitian ini, kadar aspal optimum yang diperoleh (KAO Mr).

J. Diagram alir



Gambar 3. 1 Bagan Alir Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemeriksaan Berat Jenis Dan Penyerapan Agregat

Pemeriksaan berat jenis dan peneyerapan agregat pada penelitian ini terdiri atas pengujian berat jenis agregat kasar dan halus.

1. Berat jenis agregat kasar 1-2

Hasil pengujian terhadap agregat kasar 1-2 berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4. 1 Berat jenis dan penyerapan agregat kasar 1-2 *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

No,	Jenis Pengujian	Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Sat.	Ket.
1	Berat jenis bulk	2,400	-	-	Memenuhi
2	Berat jenis kering permukaan	2,460			Memenuhi
3	Berat jenis semu	2,552			Memenuhi
4	Penyerapan (Absorption)	2,509	Maks 3	%	Memenuhi

Dari pengujian berat jenis agregat kasar 1-2 diatas telah memenuhi spesifiksi min 2,5 gr, berat jenis jenuh kering permukaan 2.460 gr, berat jenis semu 2.552 gr, dan penyerapan 2.509 %. Jadi, dari hasil analisis berat jenis agregat kasar 1-2 telah memenuhi spesifikasi yaitu berat jenis minimum 2.5 gr dan hasil penelitiaan 2.509% telah memenuhi spesifikasi maksimal 3 %.

2. Berat jenis agregat kasar 0,5-1

Hasil pengujian terhadap agregat kasar 0,5-1 berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4. 2 Berat jenis dan penyerapan agregat kasar 0,5-1 *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

No,	Jenis Pengujian	Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Sat.	Ket.
1	Berat jenis bulk	2,378	-	-	Memenuhi
2	Berat jenis kering permukaan	2,427			Memenuhi
3	Berat jenis semu	2,501			Memenuhi
4	Penyerapan (Absorption)	2,068	Maks 3	%	Memenuhi

Dari pengujian berat jenis agregat kasar 0,5-1 diatas telah memenuhi spesifikasi min 2,5 gr, berat jenis jenuh kering permukaan 2.427 gr, berat jenis semu 2.501 gr, dan penyerapan 2.068 %. Jadi, dari hasil analisis berat jenis agregat kasar 1-2 telah memenuhi spesifikasi yaitu berat jenis minimum 2.5 gr dan hasil penelitian 2.068% telah memenuhi spesifikasi maksimal 3 %.

3. Berat jenis agregat halus (abu batu)

Hasil pengujian terhadap agregat halus (abu batu) berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4. 3 Berat jenis dan penyerapan agregat halus (abu batu) *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

No,	Jenis Pengujian	Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Sat.	Ket.
1	Berat jenis bulk	2,446	-	-	Memenuhi
2	Berat jenis kering permukaan	2,521			Memenuhi
3	Berat jenis semu	2,642			Memenuhi

4	Penyerapan (Absorption)	3,054	Maks 3	%	Memenuhi

Dari hasil pengujian berat jenis agregat halus (abu batu) diatas telah memenuhi spesifikasi min 2,5 gr, berat jenis jenuh kering permukaan 2.521 gr, berat jenis semu 2.642 gr, dan penyerapan 3.054 %. Jadi, dari hasil analisis berat jenis agregat halus (abu batu) telah memenuhi spesifikasi yaitu berat jenis minimum 2.5 gr dan hasil penelitiaan 3.054% memenuhi spesifikasi maksimal 3 %.

B. Pemeriksaan keausan agregat kasar (abrasi)

Pengujian abrasi merupakan pengujian terhadap daya tahan agregat terhadap kikisan dihubungkan langsung dengan kekuatan hancur dan secara umum cukup aman untuk menganggap agregat dengan kuat hancur yang besar juga mempunyai daya tahan terhadap kikisan besar.

Tabel 4. 4 Hasil pengujian agregat kasar (abrasi) 500 putaran *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

Saringan		**Berat**		**Spesifikasi**
Lolos	**Tertahan**	**Sebelum (gr)**	**Sesudah (gr)**	
19 mm (3/4")	12,5 mm (1/2")	2500		
12,5 mm (1/2")	9,5 mm (3/8")	2500		
Jumlah Berat (gram)		5000		
Berat TertahanBerat Tertahan Saringan No. 12 (gram)		5000	3,847	
Persen Keausan		23,1 %		Maks. 30%

Dari pengujian agregat kasar (abrasi) menggunakan mesin *Los Angeles* dan diputar sebanyak 500 putaran bersama dengan bola-bola baja sebanyak 11 bola, sehingga diperoleh hasil persen keausan sebesar 23,1 % dan telah memenuhi spesifikasi yaitu maksimal 30 %.

C. Pemeriksaan analisa saringan agregat

Pemeriksaan analisa saringan agregat pada penelitian ini terdiri atas pengujian analisa saringan agregat kasar dan halus.

1. Analisa saringan agregat kasar 1-2

Tabel 4. 5 Hasil analisa saringan agregat kasar normal 1-2 *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

No. Saringan	RATA-RATA			
	Berat Tertahan	(%) Tertahan	Komulatif Tertahan	(%) Lolos
1"	0.00	0.0%	0.00	100.00%
3/4"	0.00	0.0%	0.00	100.00%
1/2"	641.90	42.8%	641.90	57.21%
3/8"	335.90	22.4%	977.80	34.81%
4	218.00	14.5%	1195.80	20.28%
8	289.10	19.3%	1484.90	1.01%
16	12.50	0.8%	1497.40	0.17%
30	0.00	0.0%	1497.40	0.17%
50	0.25	0.0%	1497.65	0.16%
100	0.20	0.0%	1497.85	0.14%
200	1.40	0.1%	1499.25	0.05%
Pan	0.75	0.1%	1500.00	0.00%
Jumlah	1500	100.0%		

2. Analisa saringan agregat kasar 0,5-1

Tabel 4. 6 Hasil analisa saringan agregat kasar nikel 0,5-1
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

No. Saringan	RATA-RATA			
	Berat Tertahan	(%) Tertahan	Komulatif Tertahan	(%) Lolos
1"	0.00	0.0%	0.00	100.00%
3/4"	0.00	0.0%	0.00	100.00%
1/2"	89.50	6.0%	89.50	94.03%
3/8"	345.00	23.0%	434.50	71.03%
4	784.00	52.3%	1218.50	18.77%
8	278.00	18.5%	1496.50	0.23%
16	3.50	0.2%	1500.00	0.00%
30	0.00	0.0%	1500.00	0.00%
50	0.00	0.0%	1500.00	0.00%
100	0.00	0.0%	1500.00	0.00%
200	0.00	0.0%	1500.00	0.00%
Pan	0.00	0.0%	1500.00	0.00%
Jumlah	1500	100.0%		

3. Saringan agregat halus (abu batu)

Tabel 4. 7 Hasil analisa saringan agregat halus (abu batu) Sampel 1
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

NO Saringan	RATA-RATA			
	Berat Tertahan	(%) Tertahan	Komulatif Tertahan	(%) Lolos
1"	0.00	0.0%	0.00	100.00%
3/4"	0.00	0.0%	0.00	100.00%
1/2"	0.00	0.0%	0.00	100.00%
3/8"	0.00	0.0%	0.00	100.00%

4	140.05	9.3%	140.05	90.66%
8	232.25	15.5%	372.30	75.18%
16	339.45	22.6%	711.75	52.55%
30	299.15	19.9%	1010.90	32.61%
50	148.70	9.9%	1159.60	22.69%
100	125.50	8.4%	1285.10	14.33%
200	134.30	9.0%	1419.40	5.37%
Pan	80.60	5.4%	1500.00	0.00%
Jumlah	1500	100.0%		

D. Hasil Pemeriksaan Aspal

Dari hasil pengujian yang dilakukan terhadap aspal AC 60-70, diperoleh hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 dengan menggunakan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dan data selengkapnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4. 8 Hasil pengujian aspal *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

No.	Jenis Pengujian	Hasil Pemeriksaan	Spesifikasi	Satuan	Ket.
1	Berat jenis aspal	1.025	≥ 1,0	gr/cc	Memenuhi
2	Tititk lembek aspal	56,70	≥ 48	℃	Memenuhi
3	Penetrasi pada 25°C	68,80	60-70	0,1 mm	Memenuhi
4	Kehilangan berat aspal	0.56	≤ 0,8	%	Memenuhi

Dari hasil pengujian diatas diperoleh berat jenis sebesar 1.03 gr/cc, titik lembek sebesar 56,70 °C, Penetrasi pada 25°C sebesar 68,80 mm, Kehilangan berat aspal sebesar 0.56 %.

E. Hasil Rancangan Campuran

1. Hasil gradasi agregat gabungan

Dari hasil pemeriksaan analisa saringan maka gradasi agregat diperoleh seperti pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil gradasi agregat gabungan *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

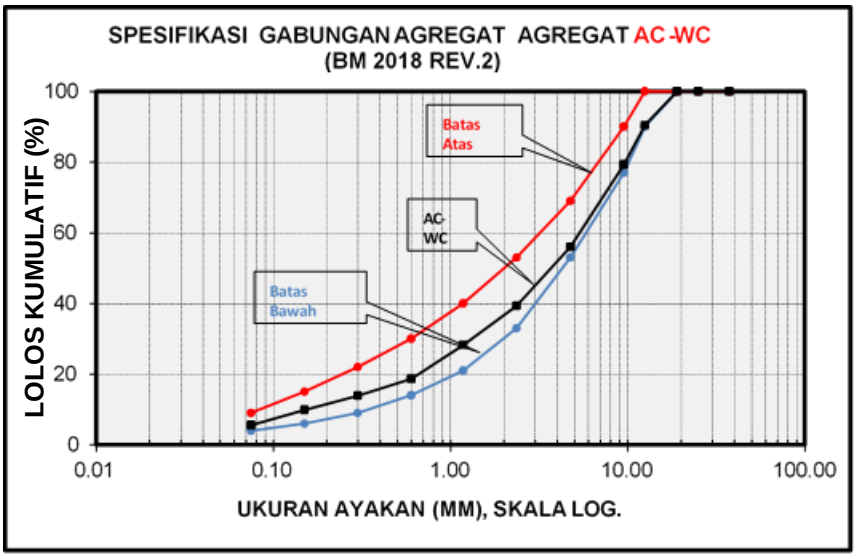
Saringan		**Gradasi Agregat**			
Inch	**(mm)**	**Agg,1/2**	**Agg, 0,5/1**	**Abu Batu**	**Filler**
1"	25	100,00	100.00%	100,00	100,00
3/4"	19	57,21	94.03%	100,00	100,00
1/2"	12,5	34,81	71.03%	100,00	100,00
3/8"	9,5	20,28	18.77%	90,66	100,00
No,4	4,75	1,01	0.23%	75,18	100,00
No,8	2,36	0,17	0.00%	52,55	100,00
No,16	1,18	0,17	0.00%	32,61	100,00
No,30	0,6	0,16	0.00%	22,69	100,00
No,50	0,3	0,14	0.00%	14.33	100,00
No,100	0,15	0,05	0.00%	5,37	100,00
200	0,075	0,00	0.00%	0,00	100,00
Pan					100,00

Tabel 4. 10 Persentase gradasi agregat gabungan *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

Saringan		**Persentase Campuran**				**Total**	**Spek**	Ket.
		18%	**31%**	**48%**	**3%**		**AC-WC**	
inch	**(mm)**	**Agg,1/2**	**Agg, 0,5/1**	**Abu Batu**	**Filler**			
1"	25	18,00	31,0	48,00	3,00	100,00	100	OK
3/4"	19	18,00	31,00	48,00	3,00	100,00	100	OK
1/2"	12,5	10,30	20,88	48,00	3,00	82,18	90-100	OK
3/8"	9,5	6,27	11,69	48,00	3,00	68,95	77-90	OK

No,4	4,75	3,65	1,69	43,52	3,00	51,85	53-69	OK
No,8	2,36	0,18	0,07	36,09	3,00	39,34	33-53	OK
No,16	1,18	0,03	0,00	25,22	3,00	28,26	21-40	OK
No,30	0,6	0,03	0,00	15,65	3,00	18,68	14-30	OK
No,50	0,3	0,03	0,00	10,89	3,00	13,92	9-22	OK
No,100	0,15	0,03	0,00	6,88	3,00	9,90	6-15	OK
200	0,075	0,01	0,00	2,58	3,00	5,59	4-9	OK
Pan	0							

Dari hasil pemeriksaan analisa saringan maka gradasi agregat diperoleh seperti pada table diatas. Gradasi agregat gabungan untuk campuran aspal, ditunjukkan dalam persen terhadap berat agregat, harus memenuhi batas-batas dan khusus untuk campuran AC-WC harus berada di antara batas atas dan batas bawah yang sesuai dengan spesifikasi. Dari hasil gradasi agregat gabungan diatas telah memenuhi batas-batas spesifikasi Umum Bina Marga 2018.



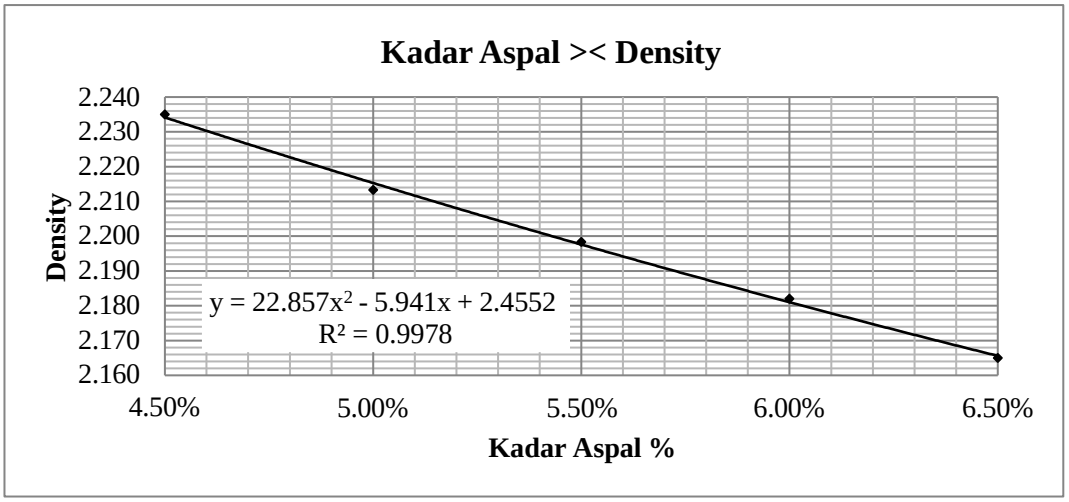
Gambar 4. 1 Grafik hasil gradasi agregat gabungan
(Sumber: Hasil Pengolahan Data 2024)

F. Hasil Pengujian Marshall

1. Kepadatan

Tabel 4. 11 Kepadatan

Kadar Aspal	Density
4.50%	2.235
5.00%	2.213
5.50%	2.198
6.00%	2.182
6.50%	2.165



Gambar 4. 2 Grafik kepadatan kadar aspal

Dari hasil pengujian nilai kepadatan paling tinggi pada kadar aspal 4,5% sebesar 2,235 dan paling rendah 6,5% sebesar 2,165.

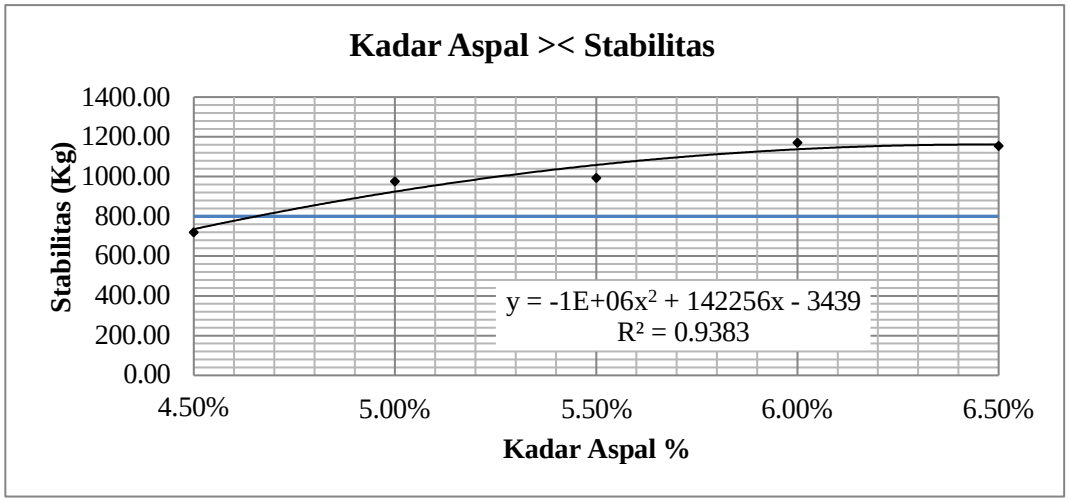
2. Stabilitas

Stabilitas adalah ketahanan lapis perkerasan untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya, tanpa mengalami perubahan bentuk seperti gelombang dan alur. Nilai stabilitas benda uji diperoleh dari pembacaan arloji stabilitas pada saat pengujian dengan alat *marshall*. Selanjutnya dicocokan dengan angka kalibrasi

proving ring dengan satuan lbs atau kilogram, dan masih harus dikoreksi dengan faktor koreksi tebal benda uji. Berikut ini adalah tabel dan gambar hubungan kadar aspal dan stabilitas:

Tabel 4. 12 Hasil pengujian stabilitas *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

Kadar Aspal	Stabilitas (Kg)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	720.57	800	-	Tidak memenuhi
5.00%	975.84	800		Memenuhi
5.50%	994.49	800		Memenuhi
6.00%	1171.28	800		Memenuhi
6.50%	1155.03	800		Memenuhi



Gambar 4. 3 Grafik hubungan kadar aspal dan stabilitas
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium2024)

Dari gambar 4.3 grafik menunjukan hubungan stabilitas dan kadar aspal, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % mengalami kenaikan dan penurunan. Dari grafik nilai stabilitas tertinggi yaitu pada kadar aspal 6,0 % sebesar 1171,28 kg dan nilai stabilitas terendah yaitu pada kadar

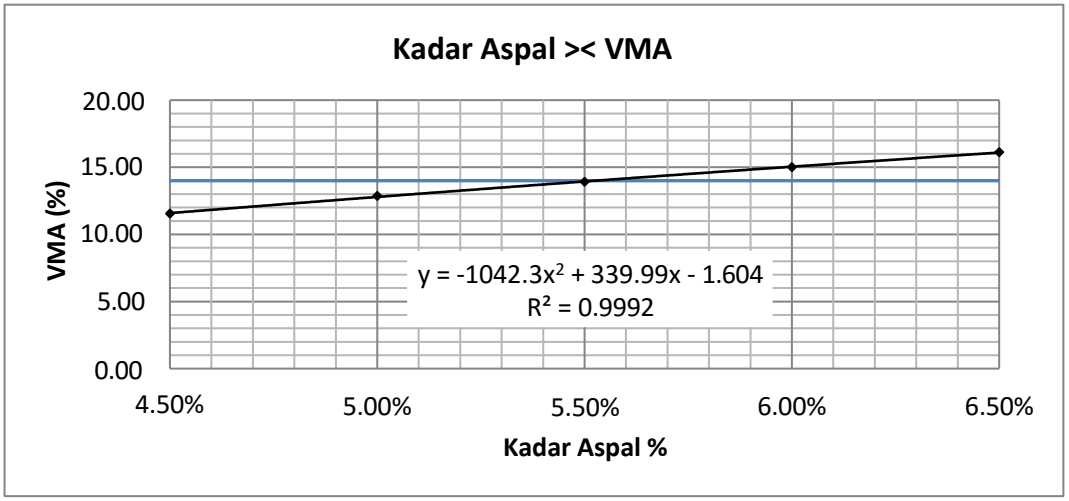
aspal 4,5 % sebesar 720,57 kg.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat- sifat nilai stabilitas minimum untuk lalu lintas berat yaitu 800 kg, sehingga kadar aspal 5 %, 5,5 %, 6%, dan 6,5 % yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan spesifikasi. Sedangkan untuk kadar aspal 4,5% tidak memenuhi persyaratan spesifikasi.

3. Rongga diantara agregat (VMA)

VMA *(Void In Mineral Agregate)* merupakan kadar persentase ruang rongga diantara partikel agregat pada benda uji, besarnya nilai VMA dipengaruhi oleh kadar aspal, gradasi bahan susun, jumlah tumbukan dan temperatur pemadatan. Hubungan antara VMA dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar ini. **Tabel 4. 13** Hasil pengujian VMA *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

Kadar Aspal	Nilai VMA (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	11.55	14	-	Tidak memenuhi
5.00%	12.87	14		Tidak memenuhi
5.50%	13.91	14		Tidak memenuhi
6.00%	15.00	14		Memenuhi
6.50%	16.12	14		Memenuhi



Gambar 4. 4 Grafik hubungan kadar aspal dan VMA
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Berdasarkan gambar 4.4 grafik menujukan nilai VMA (Void In Mineral Aggregate) pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 %, yaitu nilai VMA tertinggi 16,12 % pada kadar aspal 6,5 % dan terendah 11,55 % pada kadar aspal 4,5 %. Ditinjau dari Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VMA (Void In Mineral Aggregate) minimal 14 %, jadi kadar aspal 6% dan 6,5% yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan yang tertera pada tabel 4.13.

4. Rongga Terhadap Campuran (VIM)

VIM *(Void In The Mix)* merupakan persentase rongga yang terdapat dalam total campuran. Jika nilai VIM (Void In Mix) yang terlampau tinggi berkurangnya keawetan dari lapis keras karena rongga

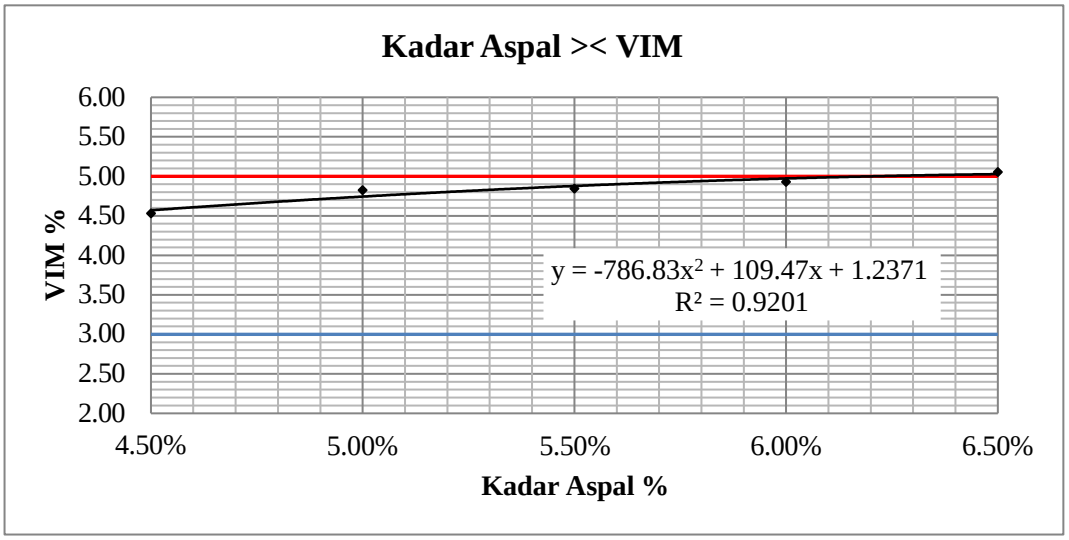
yang terlalu besar akan memudahkan masuknya air dan udara kedalam lapis perkerasan. Udara akan mengoksidasi aspal sehingga selimut aspal menjadi tipis dan kohesi aspal menjadi berkurang. Jika hal ini terjadi maka akan menyebabkan terjadi lepasnya butiran (raveling), sedangkan air akan melarutkan bagian aspal yang tidak teroksidasi sehingga pengurangan jumlah aspal akan lebih cepat.

Nilai VIM yang terlampau rendah akan menyebabkan mudah terjadinya bleading pada lapis keras. Selain bleading, dengan VIM yang rendah kekakuan lapis keras akan mengalami retak dan pecah (cracking) apabila menerima beban lalulintas karena tidak cukup lentur untuk menerima deformasi yang terjadi.

`Hubungan antara VIM dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 14 Hasil pengujian VIM *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

Kadar Aspal	Nilai VIM (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	4.53	3	5	Memenuhi
5.00%	4.83	3	5	Memenuhi
5.50%	4.85	3	5	Memenuhi
6.00%	4.93	3	5	Memenuhi
6.50%	5.05	3	5	Tidak Memenuhi



Gambar 4. 5 Grafik hubungan kadar aspal dan VIM
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

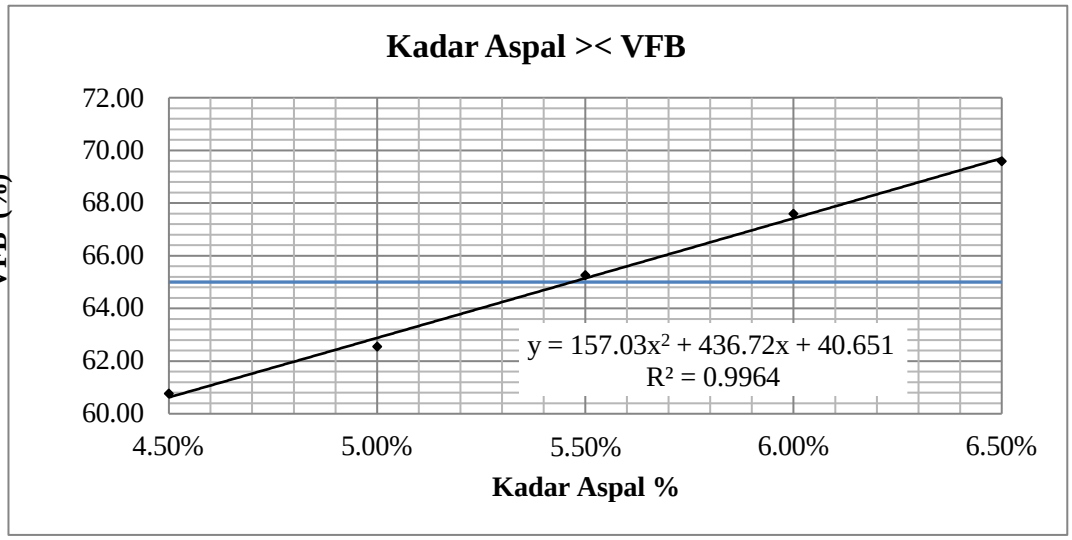
Dari gambar 4.5 grafik menunjukan hubungan nilai VIM dan kadar aspal, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % mengalami peningkatan dengan nilai VIM sebesar 4,53 %, 4,83 %, 4,85 %, 4,93 %, dan 5,05 %. Berdasarkan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VIM (Void In Mix) yang memenuhi persyaratan yaitu sebesar 4,5% - 6,0 %. Nilai VIM (Void In Mix) yang tidak memenuhi persyaratan yaitu pada kadar aspal 6.5%.

5. Rongga terisi aspal (VFB)

VFB (Void Filled Bitumen), menyatakan prosestase rongga udara yang terisi aspal pada campuran yang telah mengalami pemadatan. Hubungan antara VIM dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 15 Hasil pengujian VFB *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)*

Kadar Aspal	Nilai VFB (%)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	60.77	65	-	Tidak memenuhi
5.00%	62.55	65		Tidak memenuhi
5.50%	65.26	65		Memenuhi
6.00%	67.59	65		Memenuhi
6.50%	69.59	65		Memenuhi



Gambar 4. 6 Grafik hubungan kadar aspal dan VFB
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.6 grafik menunjukan hubungan VFB dan kadar aspal, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % mengalami kenaikan, dengan nilai VFB paling tinggi yaitu pada kadar aspal 6,5% dengan nilai 65,59 % dan terendah pada

kadar aspal 4,5% dengan nilai 60,77%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar kadar aspal yang digunakan semakin meningkat nilai VFB.

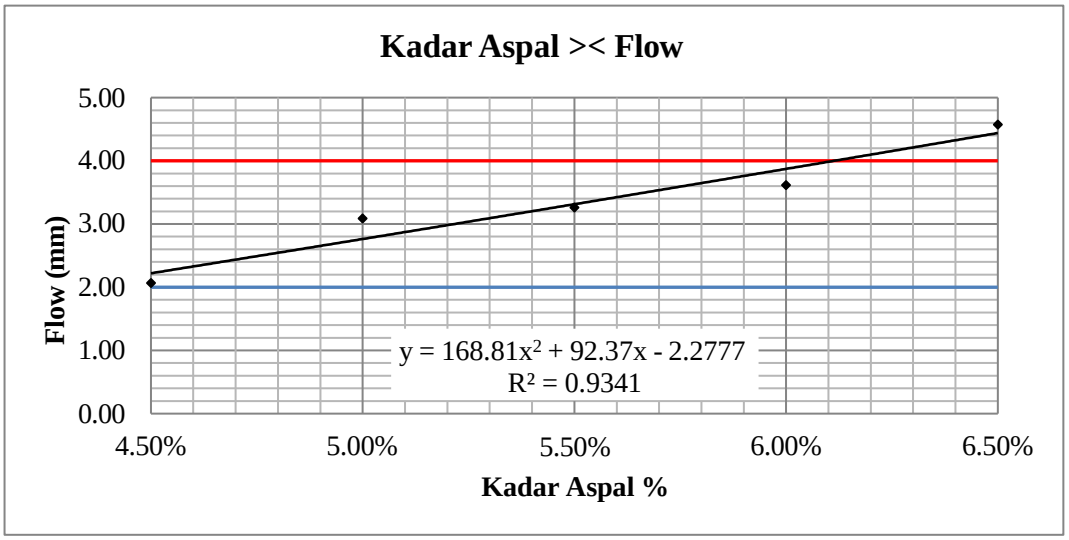
Berdasarkan persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat-sifat campuran Laston nilai VFB minimal 65 %. Nilai VFB yang memenuhi persyaratan yaitu pada kadar aspal 5,5 % sampai dengan 6.5%.

6. Flow

Hubungan antara flow dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 16 Hasil pengujian Flow *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2023)*

Kadar Aspal	Nilai Flow (mm)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	2.07	2	4	Memenuhi
5.00%	3.09	2	4	Memenuhi
5.50%	3.26	2	4	Memenuhi
6.00%	3.61	2	4	Memenuhi
6.50%	4.58	2	4	Tidak Memenuhi



Gambar 4. 7 Grafik hubungan kadar aspal dan Flow
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.7 grafik menunjukan hubungan flow dan kadar aspal, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % mengalami kenaikan dan penurunan. Dari grafik nilai flow tertinggi yaitu pada kadar aspal 6,5 % sebesar 4,58 mm dan nilai flow terendah yaitu pada kadar aspal 4,5 % sebesar 2,07 mm.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat- sifat campuran laston nilai flow yang memenuhi persyaratan yaitu 2 mm – 4 mm, sehingga semua kadar aspal yang memenuhi yaitu pada kadar aspal 4,5% – 6,0% telah memenuhi persyaratan yang tertera pada tabel 4.16.

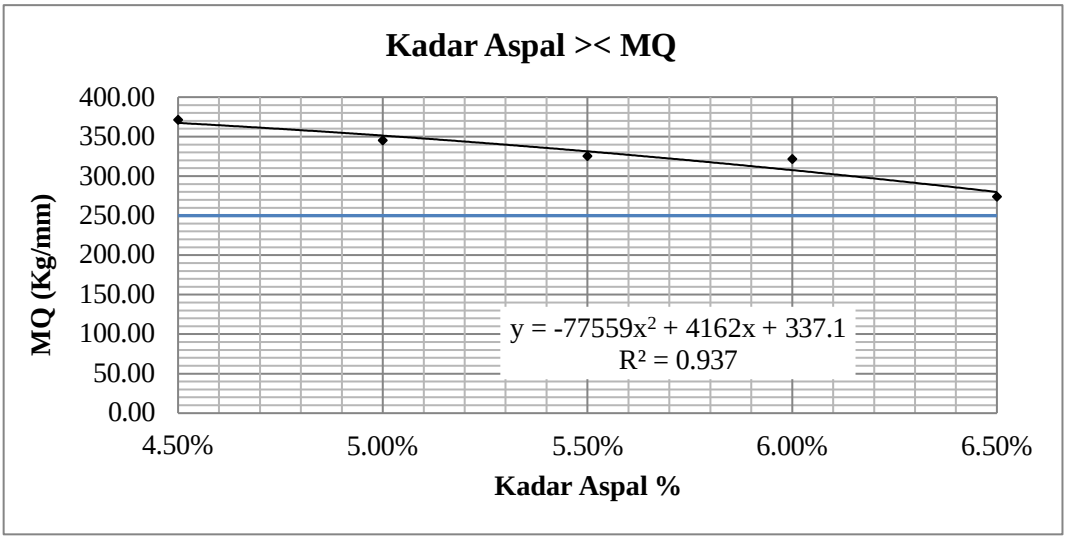
7. Marshall quotient (MQ)

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) yaitu dari hasil bagi antara

stabilitas dengan kelelahan (flow) merupakan pendekatan terhadap tingkat kekakuan dan fleksibilitas komposisi campuran. Semakin besar nilai *Marshall Quotient* (QM) bertanda komposisi campuran semakin kaku dan sebaliknya semakin kecil *Marshall Quotient* (QM) maka perkerasanya semakin lentur. Hubungan antara MQ dengan kadar aspal dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 4. 17 Hasil pengujian *Marshall Quotient* (MQ) *(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2023)*

Kadar Aspal	Nilai MQ (Kg/mm)	Spesifikasi		Keterangan
		Min	Maks	
4.50%	371.40	250	-	Memenuhi
5.00%	345.15	250		Memenuhi
5.50%	325.46	250		Memenuhi
6.00%	321.68	250		Memenuhi
6.50%	273.90	250		Memenuhi



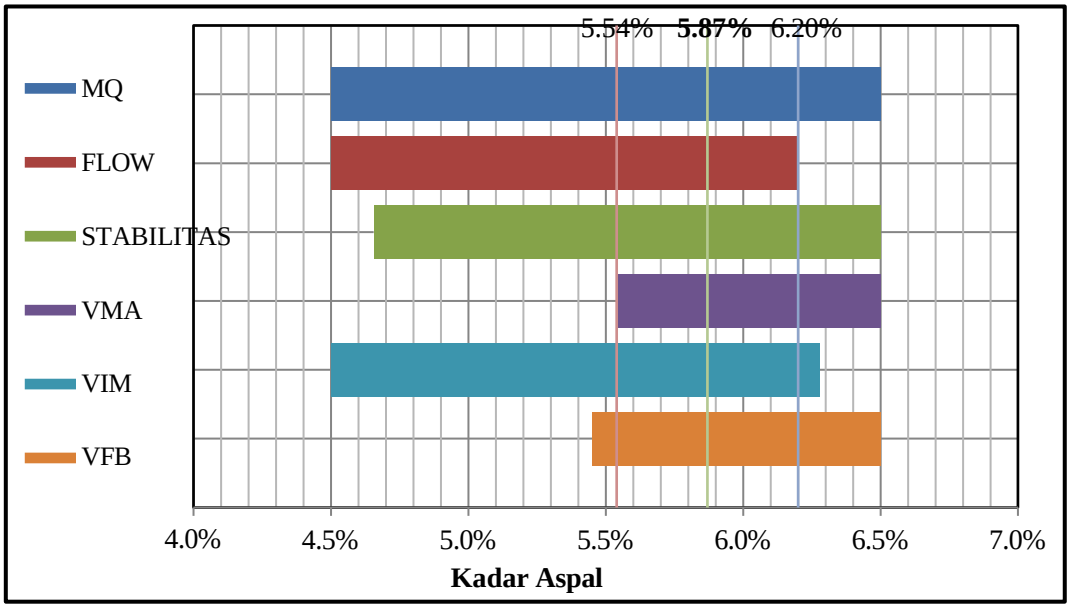
Gambar 4. 8 Grafik hubungan kadar aspal dan MQ
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

Dari gambar 4.8 grafik menunjukan hubungan MQ dan kadar aspal, pada kadar aspal 4.5 % sampai dengan 6.5 % mengalami penurunan. Dari grafik nilai MQ tertinggi yaitu pada kadar aspal 4,5 % sebesar 371,40 mm/kg dan nilai MQ terendah yaitu pada kadar aspal 6,5 % sebesar 273,90 mm/kg.

Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang ketentuan sifat- sifat campuran laston nilai MQ yang memenuhi persyaratan yaitu minimal 250 mm/kg, sehingga kadar aspal yang memenuhi yaitu 4,5% - 6,5% telah memenuhi persyaratan yang tertera pada tabel 4.17.

8. Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar aspal optimum adalah jumlah aspal yang digunakan dalam campuran agar dapat tercapai mencapai persyaratan Stabilitas, Flow, VMA, VIM, density dan Marshall Quotient. Dalam penentuan kadar aspal optimum untuk menetepkan berapa besarnya kadar aspal efektif dalam campuran yang diperlukan untuk pembuatan benda uji baru dengan komposisi agregat sama namun dengan kadar aspal optimum yang telah ditentukan. Berikut nilai kadar aspal optimum yang diperoleh dari pengujian marshall terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 9 Diagram penentu kadar aspal optimum
(Sumber: Hasil Pengujian Laboratorium 2024)

$$\text{Kadar Aspal Optimum} = \frac{\text{KA Min} + \text{KA maks}}{2} = \frac{5{,}54\% + 6{,}20\ \%}{2} = 5{,}87\%$$

Berdasarkan gambar 4.9 diagram menujukan nilai stabilitas, VMA, VIM, VFB, Flow, dan Marshall Quotient yang memenuhi spesifikasi untuk semua karakteristik dalam campuran 4.5%, 5%, 5.5%, 6%, dan 6.5%. Sehingga nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) yang diperoleh adalah 5,87%.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari hasil penelitian slag nikel sebagai subtitusi agregat kasar pada campuran AC-WC yang telah dilakukan di Laboratorium Jalan dan Aspal Universitas Muhammadiya Parepare, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Karakteristik penggunaan slag nikel pada campuran aspal AC-WC menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan dengan agregat tradisional. Slag nikel memperlihatkan karakteristik Marshall yang lebih unggul. Stabilitas Marshall menjadi indikator utama, di mana campuran slag nikel mencapai nilai maksimum 1171,28 kg pada kadar aspal 6,0%, secara konsisten dibawah nilai stabilitas agregat tradisional yang umumnya berkisar antara 1.500-1.800 kg. Parameter Void in Mineral Aggregate (VMA) pada campuran slag nikel berada pada rentang 14-16,12%, yang lebih optimal dibandingkan agregat tradisional yang umumnya memiliki VMA antara 12- 14%. Demikian pula dengan Void in Mix (VIM), campuran slag nikel mencapai 3-5%, yang jauh lebih stabil dan mendekati kondisi ideal dibandingkan agregat konvensional yang kerap memiliki variasi VIM yang lebih besar. Marshall Quotient, yang menggambarkan tingkat kekakuan campuran, pada slag nikel mencapai rentang 273,9 – 371,4 mm/kg, secara signifikan lebih rendah dan konsisten dibandingkan agregat tradisional.

2. Hasil pengujian parameter campuran aspal AC-WC memperlihatkan bahwa penggunaan slag nikel memberikan hasil yang sangat baik pada berbagai parameter uji Marshall. Analisis menunjukkan bahwa campuran dengan slag nikel mampu memenuhi kriteria spesifikasi, termasuk Void in Mineral Aggregate (VMA), Void in Mix (VIM), Void Filled Bitumen (VFB), dan parameter lainnya pada rentang kadar aspal 4,5% hingga 6,5%. Penelitian berhasil mengidentifikasi kadar aspal optimum sebesar 5,87%, di mana pada titik ini campuran memiliki kepadatan, stabilitas, dan fleksibilitas yang optimal. Secara khusus, parameter VMA pada kadar aspal 6,0% - 6,5% berada pada kisaran 14% - 16,12%, VIM pada kadar aspal 4,5% - 6,5% berada diantara 3%- 5%, dan VFB pada kadar aspal 5,5% - 6,5% mencapai 65,26% - 69,59%, yang berada dalam batas spesifikasi yang dipersyaratkan, menunjukkan bahwa slag nikel dapat secara efektif diintegrasikan dalam campuran aspal beton tanpa mengurangi kualitas struktural.
3. Dari hasil pengujian stabilitas menunjukkan bahwa kadar aspal 5 %, 5,5 %, 6%, dan 6,5 % yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan spesifikasi dengan stabilitas minimum 800 kg sedangkan untuk kadar aspal 4,5% tidak memenuhi persyaratan spesifikasi dengan nilai tertinggi mencapai 1171,28 kg pada kadar aspal 6,0%. Hal ini mengindikasikan bahwa slag nikel memberikan kontribusi positif terhadap ketahanan campuran dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas. Selain stabilitas, pengujian juga menunjukkan bahwa campuran memiliki

flow (kelelehan) yang baik, dengan nilai antara 2-4 mm, dan Marshall Quotient (MQ) yang memenuhi persyaratan minimal 250 mm/kg. Variasi kadar aspal dari 5% hingga 6,5% menunjukkan bahwa slag nikel memberikan fleksibilitas dalam desain campuran, dengan kemampuan menyerap dan mendistribusikan beban yang konsisten, yang sangat penting untuk ketahanan jangka panjang perkerasan jalan.

B. Saran

1. Diharapkan melakukan penelitian lebih lanjut terhadap karakteristik campuran aspal AC-WC menggunakan material dengan komposisi campuran yang berbeda.
2. Untuk kontraktor atau instansi terkait sebaiknya agar mempertimbangkan penggunaan agregat kasar dengan substitusi penggunaan slag nikel pada campuran AC-WC dalam konstruksi perkerasan jalan dengan alasan efisiensi waktu pada proses pengolahan slag nikel menjadi butiran agregat kasar.
3. Perlunya fasilitas laboratorium yang memadai terutama pada alat yang digunakan pada saat melakukan penelitian sehingga data yang diperoleh dalam penelitiaan lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Aspal Beton untuk Jalan Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-1737-1989. *Tata Cara Pelaksanaan Lapis Raya.*

Ashad, H. (2022). Penggunaan Terak Nikel Sebagai Bahan Alternatif Pengganti Agregat Kasar Beton Mutu Tinggi. *Jurnal Teknik Sipil (Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil)*, *29*(3), 257-262.

Ardhymanto Am Tanjung, Rahul Gonzales,Azizah Seprianti1, dan Rahma Izati (2022). *Analisis Pemanfaatan Limbah Terak Nikel (Slag) sebagai Bahan Baku Pembuatan Shotcrete dan Penanganan Limbah Lumpur Nikel (Slurry) untuk Mengurangi Dampak Pencemaran Lingkungan.* Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Negeri Padang

Andi Batari Angka1, Kushari2,(2017). *Slag Nikel Sebagai Bahan Subtitusi Pada Karakteristik Campuran AC-BASE.* Makassar.

Angka, A. B., & Kushari, K. (2018, August). *Slag nikel sebagai bahan subtitusi pada karakteristik campuran AC-Base*. In Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M) (Vol. 2, No. 1).

Asrib, A. R. (2019). *Pembangunan Struktur Bangunan Air Menggunakan* .

PROSIDING SEMINAR NASIONAL LP2M UNM - 2019, 643-647.

Asrib1, A. R. (2019). *Pembangunan Struktur Bangunan Air Menggunakan Limbah Slag Nikel sebagai Agregat Kasar . PROSIDING SEMINAR NASIONAL LP2M UNM - 2019*, 643-647.

Azis M.I.W, Hamsyah. Kasmaida. (2022). *Uji Experimental Variasi Agregat Halus Pada Campuran Asphalt Ac-Bc*. Jurnal Karajata Engineering Vol. 2 No. 1, Juni 2022, 64-73.PAREPARE

Bina Marga (2018). Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan. Jakarta : *Direktorat Jendral Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum*

Bina Marga (1995), *Syarat Gradasi Bahan pengisi Campuran Aspa*l, Jakarta. Bina Marga, (1999), *Pedoman Campuran Beraspal dengan Pendekatan Kepadatan*

Mutlak. Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum

Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-1969-1990, *Metode Pengujian Berat Jenis*

dan Penyerapan Air Agregar agregat kasar.

Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-2417 19991, *Metode Pengujian Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles.*

Badan Standarisasi Nasional, SNI 06-2432-1991, *Metode Pengujian Daktilitas Bahan-bahan aspal.*

Bethary, R. T., & Intari, D. E. (2022). *Penggunaan Limbah Slag Nikel Untuk Material Jalan Ramah Lingkungan.* Fondasi: Jurnal Teknik Sipil, *11*(1), 34-43.

Demmalino, U. A., Lambe, C. S. W., & Rachman, R. (2019). *Pengujian Slag Nikel Sebagai Pengganti Agregat Pada Campuran HRS-Base.* Paulus Civil Engineering Journal, *1*(2), 101-106.

Irfansyah, A. F. (2021). *Karakteristik Beton Berongga Dengan Menggunakan Terak Nikel Sebagai Agregat Kasar* (Doctoral Dissertation, Universitas Hasanuddin).

Nensi, S., Mustakim, & Kasmaida. (2024). *Analisis Stabilitas Marshall Terhadap Penggunaan Marmer Sebagai Subtitusi Agregat Kasar Pada Campuran Ac-Wc.* Jurnal Konstruksi, *1*(1), 1-7.

Priono, T. (2022). *Perilaku Mekanik Dan Ketahanan Beton Berbahan Pasir Slag Nikel Dan Fly Ash= Mechanical Properties And Durability Of Concrete With Sand Nickel Slag And Fly Ash* (Doctoral Dissertation, Universitas Hasanuddin).

Patriawan, O., & Hafid, F. (2003). *Pengaruh Slag nikel (Slag) sebagai Bahan Pengganti Agregat Kasar terhadap Mutu Beton.*

Ratno Wijaya, Sotya Astutiningsih, (2021*). Studi Literatur Potensi Pemanfaatan Terak Nikel (Slag Nikel) sebagai Agregat pada Mortar dan Beton*. Depok.

Syaharuddin, St. Maryam Hafram , Andi Alifuddin (2021). *Pengaruh Variasi Slag Nikel Sebagai Bahan Tambah Agregat Halus pada Campuran Lapisan Aspal Beton*. Makassar, Sulawesi Selatan.

Suwindu, K. S., Parung, H., & Sandy, D. (2020). *Karakteristik Beton Mutu Tinggi dengan Substitusi Slag Baja dan Slag Nikel Sebagai Agregat Kasar. Paulus Civil Engineering Journal*, *2*(1).