

[Draf_Skripsi]_Bintang_Miraj_Ali _3334200030_Final HC.pdf

by 1 1

Submission date: 17-Mar-2025 07:05PM (UTC+0700)

Submission ID: 2617153037

File name: _Draf_Skripsi__Bintang_Miraj_Ali_3334200030_Final_HC.pdf (1.73M)

Word count: 20653

Character count: 114509

**PEMANFAATAN ⁷STEEL SLAG SEBAGAI BAHAN
PENGANTI AGREGAT DALAM CAMPURAN
BERASPAL LAPIS AUS (AC-BC)**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

Bintang Miraj Ali
3334200030

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

**PEMANFAATAN ⁷STEEL SLAG SEBAGAI BAHAN
PENGANTI AGREGAT DALAM CAMPURAN
BERASPAL LAPIS AUS (AC-BC)**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

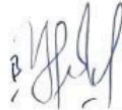
Disetujui Untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.
NIP. 196705302002121001

Pembimbing II



Bening Nurul H. K. S.T., M.T.
NIP. 199008292020122013

LEMBAR PERSETUJUAN

PEMANFAATAN ⁷STEEL SLAG SEBAGAI BAHAN
PENGANTI AGREGAT DALAM CAMPURAN
BERASPAL LAPIS AUS (AC-BC)

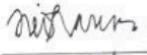
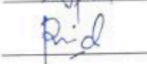
SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh

Bintang Miraj Ali

3334200030

Telah disidangkan di depan Dewan Penguji pada tanggal 06 Januari 2025

	Susunan Dewan Penguji	Tanda Tangan
Penguji I	: Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.	
Penguji II	: Bening Nurul H. K. S.T., M.T.	
Penguji III	: Dr. Rindu Twidi Bethary, S.T., M.T.	

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Abdul Aziz, S.T., M.T. Ph.D.
NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis Skripsi berikut:

Judul : Pemanfaatan *Steel Slag* Sebagai Bahan Pengganti Agregat

Dalam Campuran Beraspal Lapis Aus (AC-BC)

Nama : Bintang Miraj Ali

NIM : 3334200030

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Skripsi ini ialah benar hasil karya asli saya dan tidak memuat pernyataan pada skripsi hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan atau literatur yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 06 Februari 2025



Bintang Miraj Ali
NIM. 3334200030

ABSTRAK

Pemerintah menargetkan total 2.700 km jalan tol baru hingga akhir 2024. Saat ini, sudah tercapai 2.200 km jalan tol baru. Selain pembangunan jalan tol, pemerintah juga meningkatkan kondisi jalan nasional. Pembangunan jalan dalam kondisi baik telah bertambah hingga 6.000 km. Dari kondisi tersebut kebutuhan aspal untuk perkerasan jalan sebesar 1,2 juta ton/tahun dan kebutuhan agregat alam mencapai 20 juta ton/tahun. Penggunaan agregat alam yang cukup banyak menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan karena adanya penambangan agregat alam besar besaran yang menyebabkan longsor, banjir, dan masih banyak bencana alam lainnya. Maka dari itu perlu dilakukan penelitian untuk mencari pengganti agregat alam salah satunya adalah *steel slag*. Kandungan yang terdapat dalam komposisi *steel slag* seperti Fe_2O_3 , CaO , dan SiO_2 mampu memengaruhi kualitas perkerasan jalan. Fe_2O_3 meningkatkan ketahanan aus, CaO menambah stabilitas, dan SiO_2 meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi dan air. Penelitian dilakukan dengan variasi jumlah *steel slag* 40%, 60%, 80%, 100% dan kadar aspal 5%, 5,5%, 6%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *void in mineral aggregate* (VMA) berada dalam rentang 16,21% hingga 18,62% lebih dari spesifikasi minimum 14%. Nilai *void in mixture* (VIM) berkisar antara 4,30% hingga 5,19%. Nilai *void filled with asphalt* (VFA) tertinggi tercapai pada kadar *steel slag* 100% dan kadar aspal 5,5%, dengan nilai 76,22%, melebihi spesifikasi minimum 65%. Stabilitas maksimum diperoleh pada kadar *steel slag* 80% dan kadar aspal 5,5%, dengan nilai 1333,01 kg, jauh melampaui spesifikasi minimum 800 kg. *Flow* berkisar antara 2,62 mm hingga 3,97 mm, memenuhi spesifikasi 2 mm hingga 4 mm untuk semua variasi. Nilai *marshall quotient* (MQ) tertinggi ditemukan pada kadar *steel slag* 80% dan kadar aspal 5,5%, dengan nilai 424,69 kg/mm, yang melampaui spesifikasi minimum 250 kg/mm. Berdasarkan hasil tersebut, kombinasi optimal untuk digunakan pada perkerasan jalan lapis aus adalah kadar *steel slag* 80% dengan kadar aspal 5,5%, karena memberikan stabilitas tinggi, *flow* yang sesuai, serta nilai MQ yang menunjukkan kinerja mekanik yang sangat baik. Berdasarkan hasil penelitian ini, *steel slag* terbukti dapat digunakan sebagai bahan pengganti agregat alam yang sangat baik dalam perkerasan jalan lapis aus (AC-BC).

Kata Kunci: Agregat, Aspal, Perkerasan Jalan, *Steel Slag*, *Marshall Quotient*

KATA PENGANTAR

Puja dan puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat yang melimpah dan kesehatan, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul “Pemanfaatan *Steel slag* Sebagai Bahan Pengganti Agregat Dalam Campuran Beraspal Lapis Aus (AC-BC)”. Penyusunan tugas akhir ini dilaksanakan untuk memenuhi persyaratan kelulusan sebagai sarjana Teknik Metalurgi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi FT. UNTIRTA.
2. Ibu Andinnie Juniarsih, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi FT. UNTIRTA
3. Bapak Dr. Didied Haryono, S.T., M.T. selaku pembimbing pertama yang membimbing penulis dalam penelitian hingga penyelesaian Skripsi ini
4. Ibu Bening Nurul Hidayah Kambuna, ST., MT. selaku pembimbing kedua yang membimbing penulis dalam penelitian hingga penyelesaian Skripsi ini
5. Ibu Dr. Ir. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si. sebagai dosen pembimbing akademik yang selalu memberikan motivasi bimbingan kepada penulis selama menjalani perkuliahan.
6. Segala perjuangan saya hingga titik ini saya persembahkan pada dua orang paling berharga dalam hidup saya. Orangtua tercinta dan keluarga yang telah mendoakan, memberikan dukungan dan memotivasi dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Rekan seperjuangan penulis dengan npm 3334200079 terima kasih telah menjadi salah satu penyemangat, pendengar keluh kesah dalam penulisan skripsi dan penasehat yang baik. Semoga selalu diberikan keberkahan dimanapun berada.

8. Keluarga Besar Teknik Metalurgi angkatan 2020 yang telah kebersamai penulis selama masa pendidikan.dan semua pihak yang turut membantu penulis dalam proses penyusunan Skripsi ini, meskipun tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih terdapat kekurangan, sehingga kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak diharapkan. Penulis berharap agar proposal tugas akhir ini bermanfaat, khususnya bagi penulis dan bagi pembaca pada umumnya. Atas perhatiannya, Penulis mengucapkan Terima Kasih.

Cilegon, Januari 2025



Bintang Miraj Ali

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Ruang Lingkup	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Perkerasan Jalan	8
2.2 Lapis Aspal Beton (Laston)	9
2.2.1 Lapis Aus AC-WC	10
2.2.2 Lapis Aus AC-BC	11
2.2.3 Lapis Aus AC-Base	11

2.3	Karakteristik Beton Aspal	12
2.4	Bahan Pembentuk Perkerasan Jalan	14
2.5	<i>Steel slag</i>	16
2.6	Aspal	19
2.7	Karakteristik Campuran Aspal Beton	20
2.7.1	<i>Voids in Mineral Aggregate (VMA)</i>	20
2.7.2	<i>Voids in Mineral (VIM)</i>	20
2.7.3	<i>Voids Filled with Asphalt (VFA)</i>	21
2.8	Uji <i>Marshall</i>	21
2.9.1	Stabilitas	22
2.9.2	Kelelehan (<i>Flow</i>)	22
2.9.3	<i>Marshall quotient</i>	23

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian	24
3.2	Alat dan Bahan	25
3.2.1	Alat-alat yang Digunakan	25
3.2.2	Bahan-bahan yang Digunakan	26
3.3	Prosedur Penelitian.....	26
3.3.1	Pemeriksaan Aspal	26
3.3.2	Pemeriksaan Agregat	27
3.3.3	Perencanaan Gradasi	30
3.3.4	Metode Pembuatan Benda Uji	31

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1	Hasil Karakterisasi Material	34
4.1.1	Berat Jenis Agregat	35
4.1.2	Keausan Agregat	39
4.1.3	Hasil Analisa XRF	41
4.1.4	Berat Jenis Aspal	42
4.1.5	Penetrasi Aspal	43
4.2	Hasil Karakteristik <i>Marshall</i>	45
4.2.1	Hasil Analisa VMA (<i>Void In Mineral Aggregate</i>)	47
4.2.2	Hasil Analisa VIM (<i>Void In Mixture</i>)	50
4.2.3	Hasil Analisa VFA (<i>Void Filled with Asphalt</i>)	53
4.2.4	Hasil Analisa Stabilitas	56
4.2.5	Hasil Analisa <i>Flow</i>	59
4.2.6	Hasil Analisa <i>Marshall quotient</i> (MQ)	63

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	68
5.2	Saran	69

DAFTAR PUSTAKA	71
-----------------------------	----

LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN	74
--	----

LAMPIRAN B BLANKO PENGUJIAN	77
--	----

LAMPIRAN C GAMBAR ALAT DAN BAHAN	96
---	----

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Komposisi <i>Steel slag</i>	18
Tabel 3.1 Standar Pengujian Karakteristik Aspal	27
Tabel 3.2 Standar Pengujian Karakteristik Agregat Kasar	27
Tabel 3.3 Standar Pengujian Karakteristik Agregat Halus	29
Tabel 3.4 Standar Pengujian Karakteristik <i>Steel slag</i>	29
Tabel 3.5 Perencanaan Gradasi	30
Tabel 4.1 Berat Jenis Agregat Kasar dan Penyerapan Air	36
Tabel 4.2 Berat Jenis Agregat Halus dan Penyerapan Air	37
Tabel 4.3 Berat Jenis Agregat Halus dan Penyerapan Air <i>Steel slag</i>	38
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Keausan Agregat Alam	40
Tabel 4.5 Hasil Pengujian XRF Pada <i>Steel Slag</i>	41
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Berat Jenis Aspal	44
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal	44
Tabel 4.8 Rekapitulasi Hasil Karakteristik <i>Marshall</i>	46
Tabel B.1 Berat Jenis Agregat Kasar	78
Tabel B.2 Berat Jenis Agregat Halus	79
Tabel B.3 Berat Jenis Agregat Halus <i>Steel slag</i>	80
Tabel B.4 <i>Los Angeles Abrasion</i>	81
Tabel B.5 Penetrasi Aspal	82

Tabel B.6 Berat Jenis Aspal	83
Tabel B.7 Campuran 40% Aspal 5%	84
Tabel B.8 Campuran 40% Aspal 5,5%	85
Tabel B.9 Campuran 40% Aspal 6%	86
Tabel B.10 Campuran 60% Aspal 5%	87
Tabel B.11 Campuran 60% Aspal 5,5%	88
Tabel B.12 Campuran 60% Aspal 6%	89
Tabel B.13 Campuran 80% Aspal 5%	90
Tabel B.14 Campuran 80% Aspal 5,5%	91
Tabel B.15 Campuran 80% Aspal 6%	92
Tabel B.16 Pengujian <i>Marshall</i> Campuran Aspal <i>Steel slag</i> 40%	93
Tabel B.17 Pengujian <i>Marshall</i> Campuran Aspal <i>Steel slag</i> 60%	94
Tabel B.18 Pengujian <i>Marshall</i> Campuran Aspal <i>Steel slag</i> 80%	95

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur Lapisan Perkerasan Jalan Lentur	10
Gambar 2.2 Proses Produksi <i>Slag Basic Oxygen Furnace</i>	17
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 4.1 Pengujian Keausan Agregat Alam dengan Mesin LAA	39
Gambar 4.2 Pengujian Penetrasi Aspal	43
Gambar 4.3 Pengaruh Kadar Aspal terhadap VMA	48
Gambar 4.4 Pengaruh Kadar <i>Steel slag</i> terhadap VMA	49
Gambar 4.5 Pengaruh Kadar Aspal terhadap VIM	50
Gambar 4.6 Pengaruh Kadar <i>Steel slag</i> terhadap VIM	51
Gambar 4.7 Pengaruh Kadar Aspal terhadap VFA	53
Gambar 4.8 Pengaruh Kadar <i>Steel slag</i> terhadap VFA	54
Gambar 4.9 Pengaruh Kadar Aspal terhadap Stabilitas	56
Gambar 4.10 Pengaruh Kadar <i>Steel slag</i> terhadap Stabilitas	57
Gambar 4.11 Alat Uji <i>Marshall</i>	59
Gambar 4.12 Pengaruh Kadar Aspal terhadap <i>Flow</i>	60
Gambar 4.13 Pengaruh Kadar <i>Steel slag</i> terhadap <i>Flow</i>	61
Gambar 4.14 Pengaruh Kadar Aspal terhadap <i>Marshall Quotient</i>	63
Gambar 4.15 Pengaruh Kadar <i>Steel slag</i> terhadap <i>Marshall Quotient</i>	65
Gambar C.1 Agregat Halus	97

Gambar C.2 Agregat Kasar	97
Gambar C.3 Alat Masak Campuran	97
Gambar C.4 Alat Penumbuk	97
Gambar C.5 Alat Uji Aspal	97
Gambar C.6 Alat Uji Marshall	97
10 Gambar C.7 Aspal	97
Gambar C.8 <i>Picknometer</i>	97
Gambar C.9 <i>Quarry</i>	98
Gambar C.10 Sampel Benda Uji	98
Gambar C.11 <i>Sieve Shaker</i>	98
Gambar C.12 <i>Siever</i>	98
Gambar C.13 Termometer	98
Gambar C.14 Timbangan	98
Gambar C.15 <i>Waterbath</i>	98

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam dekade terakhir, pemerintah Indonesia telah melakukan pembangunan infrastruktur yang masif, terutama dalam hal pembangunan jalan tol. Hingga akhir 2024, pemerintah menargetkan total 2.700 km jalan tol baru yang fungsional, dengan saat ini telah mencapai 2.200 km. Selain itu, pembangunan jalan nasional dalam kondisi baik juga telah bertambah hingga 6.000 km, mencakup wilayah-wilayah perbatasan seperti Papua, Kalimantan, dan NTT [1]. Pembangunan infrastruktur jalan yang begitu masif tentunya membutuhkan dukungan dari berbagai aspek, termasuk sumber daya manusia dan kebutuhan material. Salah satu material yang sangat penting adalah aspal dan agregat alam, yang digunakan sebagai penyusun utama perkerasan jalan. Kebutuhan aspal minyak untuk perkerasan jalan di Indonesia sendiri mencapai sekitar 1,2 juta ton per tahun, sementara kebutuhan agregat alam mencapai 20 juta ton per tahun [2]. Investasi yang besar dalam pembangunan infrastruktur jalan ini diharapkan dapat meningkatkan konektivitas dan aksesibilitas di seluruh wilayah Indonesia, sehingga dapat mendorong pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat.

Di sisi lain, pembuatan perkerasan jalan yang semakin meningkat juga akan memberikan dampak buruk pada lingkungan. Kebutuhan agregat alam yang sangat banyak dalam campuran aspal akan menyebabkan penambangan besar-besaran

yang dapat mengakibatkan degradasi ekosistem, erosi tanah, dan kerusakan lingkungan secara keseluruhan. Akibat dari aktivitas penambangan pasir yang dilakukan juga oleh sebagian masyarakat lokal tersebut menyebabkan tanah di sepanjang pinggiran sungai menjadi longsor, terjadinya erosi di sepanjang sungai, dan adanya galian dapat memicu terjadinya pelebaran sungai. Jalan-jalan menjadi rusak akibat truk-truk yang bermuatan berat mengangkut pasir. Selain itu dampak sosial dan dampak lain yang secara tidak langsung ditimbulkan akibat dari aktivitas penambangan pasir tersebut. Dengan semakin memprihatinkannya masalah lingkungan tersebut, mencari alternatif pengganti agregat alam yang ramah lingkungan adalah sebuah kewajiban untuk menghindari kerusakan alam yang terus berlangsung.

Agregat atau batu adalah material berbutir yang keras. Agregat mencakup antara lain batu bulat, batu pecah, abu batu, dan pasir [3]. Agregat mempunyai berbagai peranan yang sangat penting dalam perkerasan jalan, karena agregat merupakan komponen utama dari lapis perkerasan jalan. Agregat alam adalah agregat yang digunakan dalam bentuk alamiahnya dengan sedikit atau tanpa pemrosesan sama sekali. Dua jenis utama dari agregat alam yang digunakan untuk perkerasan jalan adalah pasir dan kerikil. Pada campuran beraspal, agregat memberikan kontribusi sampai 90-95% terhadap berat campuran, sehingga sifat-sifat agregat merupakan salah satu faktor penentu dari kinerja campuran tersebut. Terdapat dua sifat utama yang penting untuk dimiliki oleh agregat yaitu kekerasan dan daya serap. Agregat alam memiliki nilai kekerasan yang tinggi dan daya serap yang rendah, oleh karena itu substitusi agregat alam dengan *steel slag* dapat dilakukan.

Untuk mengatasi masalah lingkungan global dan sebagai upaya mencari alternatif yang ramah lingkungan dalam perkerasan jalan, penggunaan *steel slag* menjadi salah satu solusi yang dapat digunakan. *Steel slag*, atau sering disebut dengan *slag*, adalah hasil samping dari industri baja yang dihasilkan dari peleburan bijih besi. Keberadaannya sebagai produk sampingan dari industri baja membuat *steel slag* menjadi pilihan yang berpotensi untuk menggantikan agregat alam dalam pembuatan perkerasan jalan, khususnya dalam campuran beraspal lapis aus (AC-BC). Pemanfaatan *steel slag* umumnya masih sedikit digunakan, karena sebelumnya *steel slag* merupakan limbah B3 hingga pada akhirnya dalam lampiran XIV Peraturan Pemerintah (PP) No 22 tahun 2021, pemerintah menetapkan beberapa jenis limbah industri besi dan baja yang semula masuk dalam kategori Limbah B3 menjadi Limbah Non-B3 Terdaftar yaitu slag besi/baja (N101).

Steel slag sudah banyak digunakan pada negara eropa sebagai bahan untuk pembangunan jalan, capuran semen dan beton, dan kebutuhan metalurgi lainnya [4]. Pemilihan *steel slag* dibandingkan dengan *iron slag* pada bahan perkerasan jalan adalah sifat mekanik dari *steel slag* yang lebih unggul dibandingkan dengan *iron slag*. *Steel slag* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *iron slag*. Hal ini dikarenakan *steel slag* memiliki kandungan silika dan alumina yang lebih tinggi, sehingga memiliki daya lekat yang lebih kuat. *Steel slag* juga memiliki ketahanan aus yang lebih baik dibandingkan dengan *iron slag*. Hal ini dikarenakan *steel slag* memiliki bentuk yang lebih tidak beraturan dan tekstur yang lebih kasar, sehingga lebih sulit untuk tergerus oleh roda kendaraan. *Steel slag* yang digunakan pada penelitian ini adalah *steel slag* hasil *basic oxygen furnace*. *Steel slag* BOF lebih kuat daripada *steel slag* EAF. Hal ini disebabkan oleh komposisi kimia dan

struktur slag yang berbeda. *Steel slag* BOF mengandung lebih banyak besi (Fe) dan silikon (Si) daripada *steel slag* EAF. Besi dan silikon adalah logam yang kuat dan keras, sehingga meningkatkan kekuatan slag. Selain itu, *steel slag* BOF juga memiliki struktur yang lebih homogen daripada slag baja EAF. Homogenitas struktur slag meningkatkan kekuatan slag karena mengurangi kemungkinan terjadinya retakan.

Konsumsi baja nasional pada tahun 2024 diperkirakan akan mencapai 18,3 juta ton. Maka *steel slag* yang dihasilkan diperkirakan mencapai 1,8 - 2,7 juta ton/tahun [5]. Dari sekian banyaknya jumlah *steel slag* yang ada hal tersebut berbanding terbalik dengan jumlah pemanfaatannya yang masih belum digunakan secara maksimal. Dari kedua kondisi tersebut, material agregat alam yang semakin menipis dan semakin banyaknya jumlah *steel slag*, maka dapat dilakukan pemanfaatan *steel slag* sebagai pengganti agregat alam dalam campuran aspal pada perkerasan jalan. Pemanfaatan *steel slag* memiliki potensi untuk mengurangi ketergantungan pada agregat alam.. Terdapat penelitian juga yang menjelaskan *steel slag* mempunyai kekerasan yang tinggi dan apabila dikombinasikan dengan permukaan yang kasar menyebabkan batuan ini memberikan keuntungan jika digunakan sebagai pecahan yang difungsikan sebagai pengganti sebagian agregat alam [6].

Penelitian terbaru penggunaan *steel slag* sebagai bahan campuran aspal sudah mulai beragam dan berkembang seperti penambahan komposit dan bahan *filler* lainnya. Namun, penelitian yang memfokuskan pada komposisi aspal dan jumlah kadar aspal yang digunakan masih minim. Terdapat penelitian sebelumnya yang menjelaskan bahwa kadar aspal optimum sebesar 6% [7] namun penelitian tersebut

terbatas hanya pada penggunaan jumlah *steel slag* sebanyak 50% pada campuran aspal. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh karakteristik dari *steel slag* yang digunakan sebagai pengganti agregat alam, serta mengetahui pengaruh variasi jumlah *steel slag* sebanyak 40%, 60%, 80%, dan 100% dan variasi kadar aspal yang digunakan sebanyak 5%, 5,5% dan 6% terhadap karakteristik *marshall* yang. Jika penggunaan agregat alam terus berlanjut tanpa adanya solusi yang berkelanjutan, maka degradasi lingkungan akan semakin tak terkendali. Penambangan yang besar-besaran akan mengancam ekosistem, mempercepat erosi, dan merusak tanah serta habitat alami. Jalan yang dibangun dengan mengorbankan alam pada akhirnya hanya akan meninggalkan jejak kerusakan yang lebih besar. Oleh karena itu, penelitian ini sangat penting dilakukan untuk beralih ke alternatif pembuatan perkerasan jalan yang lebih ramah lingkungan dengan menggunakan *steel slag*.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, identifikasi masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh komposisi slag terhadap perkerasan jalan sebagai pengganti agregat dalam campuran aspal. Selain itu, penelitian ini juga akan menganalisis pengaruh variasi kadar *steel slag* sebesar 40%, 60%, 80%, dan 100% terhadap karakteristik Marshall pada campuran aspal lapis aus (AC-BC). Selanjutnya, akan diteliti bagaimana variasi kadar aspal sebesar 5%, 5,5%, dan 6% memengaruhi karakteristik Marshall pada campuran aspal lapis aus (AC-BC). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemanfaatan slag sebagai material alternatif yang dapat meningkatkan kualitas perkerasan jalan.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan di atas, maka didapatkan tujuan dari penelitian ini ialah sebagai berikut.

1. Untuk mengetahui pengaruh komposisi *slag* yang terhadap perkerasan jalan sebagai pengganti agregat dalam campuran aspal
2. Untuk mengetahui pengaruh variasi kadar *steel slag* 40%, 60%, 80%, 100 % terhadap karakteristik *marshall* pada campuran aspal lapis aus (AC-BC)
3. Untuk mengetahui pengaruh variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6% terhadap karakteristik *marshall* pada campuran aspal lapis aus (AC-BC)

1.4 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Standar pengujian karakteristik material agregat dan aspal yang digunakan adalah Spesifikasi Umum Campuran Beraspal Panas (Kementerian Pekerjaan Umum Tahun 2018 revisi 2) dan Standar Nasional Indonesia.
2. Jenis campuran beraspal yang digunakan adalah campuran beton beraspal lapis aus (AC-BC).
3. Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70.
4. Bahan pengganti agregat yang digunakan dalam penelitian ini adalah *steel slag* dari salah satu Perusahaan baja di cilegon.
5. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Metalurgi dan Laboratorium Teknik Sipil Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

6. Pengujian yang dilakukan adalah *Marshall Test*.
7. Campuran aspal yang digunakan yaitu campuran aspal panas *Asphalt Concrete – Binder Coarse (AC-BC)*. Mengacu pada Spesifikasi Umum yang dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum Tahun 2018.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan adalah lapisan atau struktur yang dibangun di atas permukaan tanah atau *subgrade* untuk memberikan kekuatan, daya tahan, dan kemulusan pada jalan. Tujuan utama perkerasan jalan adalah untuk mendukung lalu lintas kendaraan dan melindungi *subgrade* dari kerusakan yang disebabkan oleh beban kendaraan dan faktor cuaca. Perkerasan jalan bisa disebut sebagai sebuah bangunan yang terletak diatas lapisan tanah dasar (*subgrade*) berfungsi sebagai penopang beban lalu lintas. Agar didapat hasil yang sesuai dengan mutu yang diharapkan maka pengetahuan tentang sifat, pengadaan dan pengolahan dari bahan penyusun perkerasan jalan sangat diperlukan [8]. Perkerasan jalan adalah campuran antara agregat dan bahan ikat yang digunakan untuk melayani beban lalu lintas. Agregat yang biasanya dipakai dalam perkerasan jalan adalah batu pecah (*split*) atau batu kali yang sudah memenuhi standar agregat yang ditetapkan dalam perencanaan perkerasan jalan [9].

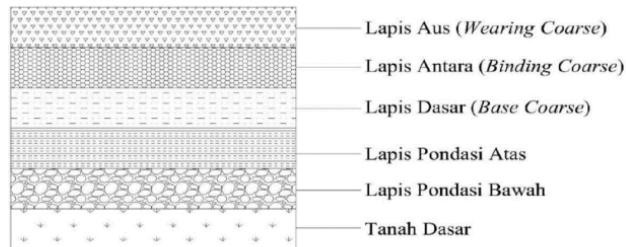
Perkerasan memiliki beberapa jenis sesuai dengan kebutuhan kondisi yang dibutuhkan. Penggunaan jenis perkerasan jalan sangat penting dipilih sesuai dengan kondisi yang ada agar memiliki masa pakai yang lebih panjang. Konstruksi perkerasan tersusun atas beberapa jenis lapisan berdasarkan bahan penyusunnya dan kondisi yang meliputi [8]:

1. Konstruksi perkerasan lentur (*flexibel pavement*), merupakan sebuah jenis perkerasan dimana bahan pengikatnya menggunakan aspal, lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan bahan lalu lintas ke tanah dasar.
2. Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*), merupakan sebuah lapis perkerasan yang menggunakan semen sebagai bahan pengikat. Plat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan diatas tanah dasar dengan atau tanpa lapis pondasi bawah.
3. Konstruksi perkerasan komposit (*composite pavement*), merupakan sebuah lapis perkerasan kaku yang merupakan hasil kombinasi dengan perkerasan lentur.

2.2 Lapis Aspal Beton (Laston)

Lapis Aspal Beton¹² adalah jenis perkerasan jalan yang terdiri dari campuran agregat, dengan atau tanpa bahan tambahan. Material-material pembentuk beton aspal dicampur di instalasi pencampur pada suhu tertentu, kemudian diangkut ke lokasi, dihamparkan, dan dipadatkan. Suhu pencampuran ditentukan berdasarkan jenis aspal apa yang akan digunakan. Dalam pencampuran aspal harus dipanaskan untuk memperoleh tingkat kecairan (viskositas) yang tinggi agar dapat mendapatkan mutu campuran yang baik dan kemudahan dalam pelaksanaan. Pemilihan jenis aspal yang akan digunakan ditentukan atas dasar iklim, kepadatan lalu lintas dan jenis konstruksi yang akan digunakan. Salah satu jenis campuran beraspal panas yang sering digunakan adalah lapis Beton Aspal (Laston) atau AC (*Asphalt Concrete*). Salah satu jenis perkerasan aspal pada spesifikasi ini adalah

lapis beton aspal (Laston) atau lebih dikenal dengan AC (*Asphalt Concrete*). Laston lebih tahan terhadap pelelehan plastis akan tetapi cukup peka terhadap retak [10]. Salah satu produk campuran beton aspal yang kini banyak digunakan oleh Departemen Permukiman Dan Prasarana Wilayah adalah *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC)/ Lapis Aus Aspal Beton. AC-WC adalah salah satu dari tiga macam campuran lapis aspal beton yaitu AC-Base, AC-BC dan AC-WC. Ketiga jenis *Asphalt Concrete* tersebut merupakan konsep spesifikasi campuran beraspal yang telah disempurnakan oleh Bina Marga bersama-sama dengan Pusat Litbang Jalan. Dalam perencanaan spesifikasi baru tersebut menggunakan pendekatan kepadatan mutlak [11].



Gambar 2.1 Struktur Lapisan Perkerasan Jalan Lentur [12].

2.2.1 Lapis Aus AC-WC

Lapis struktur perkerasan yang terletak paling atas adalah lapis permukaan. Salah satu jenis lapis permukaan yang telah dikenal luas di Indonesia adalah lapis permukaan beton aspal (AC). Sukirman [12] menjelaskan bahwa lapis permukaan beton aspal dapat berupa beton aspal lapis pengikat (*Asphalt Concrete Binder Course*, AC-BC) dan beton aspal lapis aus (*Asphalt Concrete Wearing Course*, AC-WC). Sesuai dengan

namanya, lapis perkerasan AC-WC berfungsi sebagai lapis aus dengan tebal minimal 4.0 cm Perkerasan beton aspal lapis aus (ACWC) merupakan lapisan yang terletak paling atas yang membuat lapisan ini bersentuhan langsung dengan roda-roda kendaraan, panas matahari, dan air hujan. Oleh karena itu perlu ketahanan yang baik. Dilihat dari letak dan fungsinya, membuat perkerasan AC-WC sangat rentan dengan kerusakan seperti pengelupasan (*stripping*) dan perubahan bentuk (deformasi) [12].

2.2.2 Lapis Aus AC-BC

Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) adalah lapisan perkerasan yang terletak dibawah lapisan aus (AC-WC) dan diatas lapisan fondasi (AC-Base), lapisan ini tidak langsung bersentuhan dengan cuaca tetapi harus memiliki kekakuan serta ketebalan yang cukup untuk mengurangi tegangan / regangan akibat beban lalu lintas yang diteruskan sampai lapisan yang ada dibawahnya yaitu AC-BASE dan *Subgrade*. Lapisan ini juga sering disebut sebagai Lapis Aspal Beton Antara karena diantara AC-WC dan AC-base. Untuk ukuran tebal lapisan AC-BC ini adalah 6 cm [13].

2.2.3 Lapis Aus AC-Base

Asphalt Concrete- base (AC-Base) adalah lapis pondasi perkerasan yang terdiri dari campuran agregat dan aspal dengan perbandingan tertentu dicampur dan dipadatkan dalam keadaan panas. Lapis ini terletak dibawah AC-BC dan sebagai lapis yang paling dasar / fondasi dasar perkerasan pada lapis aspal beton (lasion). Lapisan ini berfungsi untuk mengurangi tegangan / regangan, menyebarkan dan meneruskan beban lalu lintas ke bawah (tanah dasar / *Subgrade*). Lapisan ini juga sering disebut sebagai Lapis Aspal Beton

Pondasi karena terletak paling bawah dan perannya sebagai pondasi dari struktur perkerasan tersebut. Untuk ukuran tebal pada lapisan AC-Base ini adalah 7,5 cm [13].

2.3 Karakteristik Beton Aspal

Terdapat tujuh karakteristik yang harus dimiliki oleh campuran beton aspal. Karakteristik ini merupakan penunjang untuk keawetan dari beton aspal yang digunakan. Karakteristik ini dapat diketahui dengan melakukan pengujian salah satunya adalah pengujian marshall. Tujuh karakteristik tersebut adalah stabilitas, keawetan, kelenturan, ketahanan terhadap kelelahan, kekesatan permukaan, kedap air dan mudah dilaksanakan.

9

1. Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk seperti gelombang, alur dan *bleeding*. Kebutuhan akan stabilitas sebanding dengan fungsi jalan dan beban lalu lintas yang akan dilayani [12].
2. Keawetan atau durabilitas adalah kemampuan beton aspal menerima repetisi beban lalu lintas seperti berat kendaraan, gesekan antara roda kendaraan dan permukaan jalan serta menahan keausan akibat pengaruh cuaca dan iklim seperti udara, air atau perubahan temperatur. Durabilitas juga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti tebalnya film aspal, banyaknya rongga dalam campuran, kepadatan dan kedap airnya campuran [12].
3. Kelenturan atau fleksibilitas adalah kemampuan beton aspal untuk menyesuaikan diri akibat penurunan fondasi atau tanah dasar tanpa

terjadi retakan. Penurunan terjadi akibat repetisi beban lalu lintas ataupun akibat berat sendiri tanah timbunan yang dibuat di atas tanah asli [12].

4. Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) adalah kemampuan beton aspal menerima lendutan berulang akibat repetisi beban lalu lintas tanpa terjadinya kelelahan berupa alur atau retak. Hal ini bisa dicapai dengan menggunakan kadar aspal yang tinggi [12].
5. Kekesatan atau ketahanan geser (*skid resistance*) adalah kemampuan permukaan beton aspal memberikan gaya gesek pada roda kendaraan sehingga kendaraan tidak tergelincir ataupun slip terutama pada kondisi basah. Faktor-faktor untuk mendapatkan kekesatan jalan sama dengan untuk mendapatkan stabilitas tinggi, yaitu kekasaran permukaan butir agregat, luas bidang kontak antar butir, bentuk butir, gradasi agregat, kepadatan campuran dan tebal film aspal [12].
6. Kedap air (impermeabilitas) adalah kemampuan beton aspal untuk tidak dapat dimasuki air ataupun udara ke dalam lapisan beton aspal. Air dan udara dapat mengakibatkan percepatan proses penuaan aspal dan pengelupasan film atau selimut aspal dari permukaan agregat. Jumlah rongga yang tersisa setelah beton aspal dipadatkan dapat menjadi indikator kekedapan campuran. Tingkat impermeabilitas beton aspal berbanding terbalik dengan tingkat durabilitasnya [12].
7. Mudah dilaksanakan (*workability*) adalah kemampuan campuran beton aspal untuk mudah dihamparkan dan dipadatkan. Tingkat kemudahan dalam pelaksanaan, menentukan tingkat efisiensi pekerjaan. Faktor

yang dapat mempengaruhi tingkat kemudahan dalam proses penghamparan dan pemadatan antara lain adalah viskositas aspal, kepekaan aspal terhadap perubahan temperatur, gradasi serta kondisi agregat [12].

2.4 Bahan Pembentuk Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan komponen vital dalam infrastruktur transportasi yang mendukung mobilitas dan konektivitas di seluruh dunia. Dalam pembentukan perkerasan jalan, berbagai bahan digunakan untuk menciptakan struktur yang kokoh, tahan lama, dan dapat menahan beban lalu lintas serta cuaca yang beragam. Agregat, aspal, beton, dan bahan stabilisasi tanah adalah beberapa bahan utama yang sering digunakan dalam proses ini. Berikut ini merupakan bahan-bahan yang digunakan di dalam pembangunan perkerasan jalan.

1. Material / Agregat

Agregat adalah partikel mineral yang berbentuk butiran-butiran yang merupakan salah satu penggunaan dalam kombinasi dengan berbagai macam tipe mulai dari sebagai bahan material di semen untuk membentuk beton, lapis pondasi jalan, material pengisi. Agregat didefinisikan secara umum sebagai formasi kulit bumi yang keras dan padat. ASTM mendefinisikan agregat sebagai suatu bahan yang terdiri dari mineral padat, berupa massa berukuran besar ataupun berupa fragmen-fragmen. Agregat yang digunakan dapat berupa agregat alam atau bautan. Salah satu penggunaan agregat yang sering dilakukan adalah sebagai bahan pengisi perkerasan jalan yang akan dicampurkan dengan aspal dan mengeras [14].

2. Agregat Halus / Pasir

Agregat halus adalah agregat yang mempunyai sifat lolos saringan No.8 (2,36 mm) tertahan saringan No.200 (0,075 mm). Fungsi utama agregat halus adalah untuk menyediakan stabilitas dan mengurangi deformasi permanen dari perkerasan melalui keadaan saling mengunci (*interlocking*) dan gesekan antar butiran. Untuk hal ini maka sifat eksternal yang diperlukan adalah *angularity* (bentuk menyudut) dan *particle surface roughness* (kekasaran permukaan butiran). Agregat halus biasanya berbentuk pasir atau biasa disebut abu batu [14]

3. Agregat Kasar / Batu Pecah

Fraksi agregat kasar untuk agregat ini adalah agregat yang tertahan di atas saringan 2,36 mm (No.8), menurut saringan ASTM. Fraksi agregat kasar untuk keperluan pengujian harus terdiri atas batu pecah atau kerikil pecah dan harus disediakan dalam ukuran-ukuran normal. Agregat kasar ini menjadikan perkerasan lebih stabil dan mempunyai ketahanan terhadap selip yang tinggi sehingga lebih menjamin keamanan berkendara. Agregat kasar yang mempunyai bentuk butiran yang bulat memudahkan proses pemadatan, tetapi rendah stabilitasnya, sedangkan yang berbentuk menyudut (*angular*) sulit dipadatkan tetapi mempunyai stabilitas yang tinggi. Agregat kasar harus mempunyai ketahanan terhadap abrasi bila digunakan sebagai campuran *wearing course*, untuk itu nilai *Los Angeles Abrasion Test* harus dipenuhi.

4. Aspal

Aspal didefinisikan sebagai material berwarna hitam atau coklat tua, pada temperatur ruang berbentuk padat sampai agak padat. Jika dipanaskan

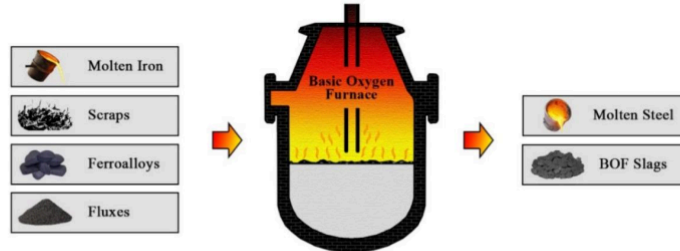
sampai suatu temperatur tertentu aspal dapat menjadi lunak atau cair sehingga dapat membungkus partikel agregat pada waktu pembuatan aspal beton atau dapat masuk kedalam pori-pori yang ada pada penyemprotan perkerasan macadam. Jika temperatur mulai turun, aspal akan mengeras dan mengikat agregat pada tempatnya [13]. Aspal sebagai salah satu material konstruksi perkerasan lentur merupakan salah satu komponen kecil, umumnya hanya 4-10% berdasarkan berat atau 10-15% berdasarkan volume campuran perkerasan jalan. Aspal terdiri dari unsur carbon (C) sebagai komponen utama $\pm 80\%$, hidrogen (H) $\pm 10\%$ dan sisanya berupa sulfur (S) yang membentuk berbagai persenyawaan hidrokarbon. Aspal dibedakan dari jenis penetrasi yang dihasilkan. Semakin kecil nilai penetrasi aspal semakin tinggi titik leleh aspal [15].

2.5 *Steel slag*

Slag adalah produk sampingan padat bukan logam yang dihasilkan dari proses peleburan logam pada tanur (*furnace*) dan merupakan kumpulan oksida dalam keadaan lebur dan terpisah dari fasa logam cair selama proses peleburan. Produk sampingan ini berasal dari hasil residu pembakaran *basic oxygen furnace* yang dihasilkan oleh industri peleburan baja, yang secara fisik menyerupai agregat. Slag termasuk limbah B3 (Bahan Berbahaya Beracun) namun setelah adanya lampiran XIV Peraturan Pemerintah (PP) No 22 tahun 2021, pemerintah menetapkan beberapa jenis limbah industri besi dan baja yang semula masuk dalam kategori Limbah B3 menjadi Limbah Non-B3 Terdaftar yaitu slag besi/baja (N101), *mill scale* (N103), debu *Electric Arc Furnace*/debu EAF (N104), dan *precious ball* atau

PS ball (N105). Penggunaan *steel slag* sebagai agregat bahan pembangunan jalan setidaknya bisa menggantikan material seperti batu alam yang semakin lama habis karena ditambang [16].

Steel slag basic oxygen furnace adalah produk sampingan yang berasal dari proses pembuatan baja dalam *basic oxygen furnace*, besi cair yang dihasilkan dalam *furnace* bergabung dengan serpihan baja, dan batu kapur (sebagai bahan fluks). Keberadaan serpihan baja memainkan peran kunci dalam mendinginkan *furnace* dan menjaga suhu sekitar 1600 °C (suhu yang diperlukan untuk reaksi kimia antara kokas dan bijih besi). Secara konvensional, komposisi yang tepat untuk muatan *basic oxygen furnace* terdiri dari 80-90% besi cair dan 10-20% serpihan baja, dengan tambahan fluks. Melalui pengecoran besi cair (dari atas *furnace*) dan penyemprotan oksigen murni, kotoran dalam muatan dihilangkan melalui fenomena oksidasi, dan pembentukan karbon monoksida dapat berkembang; bahan fluks bertindak sebagai penyaring, mengurangi semua unsur kimia yang tidak diinginkan dari lelehan (batu kapur dapat bereaksi membentuk oksida silikon, fosfor, sulfur, dan mangan).



Gambar 2.2 Proses Produksi *Slag Basic Oxygen Furnace* [4].

Siklus penyemprotan dihentikan ketika komposisi kimia yang diinginkan tercapai. *steel slag* yang berasal dari proses pembuatan baja ini mengapung di atas besi cair, dan dapat dipisahkan berkat perbedaan dalam kerapatan material. Jika prosedur pemurnian sekunder lebih lanjut tidak direncanakan, *basic oxygen furnace* dapat menghasilkan produk padat yang diperoleh melalui proses pendinginan. Produk ini memiliki berbagai bentuk (bongkah, billet, atau lempengan) dan karakteristik. Umumnya, jenis *steel slag* ini dicirikan oleh sudut prisma dan kekerasan tinggi. Komposisi kimia akhir dari *basic oxygen furnace steel slag* sangat dipengaruhi oleh reaksi kimia yang terjadi selama penghilangan kotoran yang diberikan oleh fluks [4]. Penggunaan *steel slag* (terak baja) telah berkembang pesat di luar negeri, seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan dan pengelolaan limbah industri. Berikut ini merupakan komposisi pada *steel slag*.

Tabel 2.1 Komposisi *Steel Slag* Berdasarkan Hasil Uji XRF [4]

Komposisi	<i>Steel slag</i>
CaO	35-45%
SiO ₂	11-17%
Al ₂ O ₃	1-6%
MgO	2-9%
FeO	16-26%
MnO	2-6%
P ₂ O ₅	1-2%
S	≤0.2%
Cr ₂ O ₃	0,5-2%

2.6 Aspal

⁵ Aspal merupakan material perekat (cementitious) berwarna hitam atau cokelat tua, dengan unsur utama bitumen. Aspal dapat diperoleh dari alam yang merupakan residu dari pengilangan minyak bumi. Aspal adalah material yang pada temperatur ruang berbentuk padat sampai agak padat dan bersifat termoplastis. Jadi aspal akan mencair ketika dipanaskan sampai temperatur tertentu dan akan membeku jika temperatur turun. Aspal adalah bahan yang sangat penting dalam industri konstruksi, terutama untuk pembuatan jalan raya dan lapisan permukaan.

⁵ Bina Marga mengatakan bahwa ada beberapa jenis aspal yang umum digunakan di Indonesia meliputi aspal minyak, aspal emulsi, aspal modifikasi dan aspal buton (asbuton). Aspal minyak merupakan bahan tersisa yang dianggap sudah tidak lagi diproses secara ekonomi dan proses destilasi minyak bumi di pabrik kilang minyak. Bahan tersebut kita kenal dalam tiga kelas penetrasi yaitu pen 40/50, pen 60/70 dan pen 80/100. Semakin rendah angka penetrasi maka akan semakin keras wujud aspal, semakin susah cara penanganannya karena diperlukan suhu lebih tinggi agar aspal menjadi lunak atau cair. Sebaliknya semakin tinggi angka penetrasi maka aspal akan semakin mudah mencair dan mudah dalam pengerjaannya, namun juga menjadi semakin sulit untuk menstabilkan campuran aspal, khususnya pada iklim panas seperti di Indonesia, karena aspal akan cenderung melunak pada suhu udara tinggi [17]. Aspal dengan penetrasi rendah digunakan untuk cuaca panas, volume lalu lintas yang tinggi. Aspal dengan nilai penetrasi tinggi digunakan untuk daerah dengan cuaca dingin dan lalu lintas rendah. Di Indonesia umumnya aspal yang digunakan adalah aspal dengan penetrasi 60-70 dan 80-100) [18].

2.7 Karakteristik Campuran Aspal Beton

VMA (*Voids in Mineral Aggregate*), VIM (*Voids in Mineral*), dan VFA (*Voids Filled with Asphalt*) adalah parameter yang digunakan dalam analisis campuran aspal beton (CAB) untuk mengevaluasi karakteristik kekosongan atau rongga di dalam campuran. Ketiga parameter ini membantu mengidentifikasi jumlah dan distribusi ruang pori dalam campuran aspal beton, yang memiliki pengaruh penting terhadap kinerja perkerasan.

2.7.1 *Voids in Mineral Aggregate (VMA)*

VMA adalah ruang di antara partikel agregat pada suatu perkerasan beraspal, termasuk rongga udara dan volume aspal efektif (tidak termasuk volume aspal yang diserap agregat) [19]. VMA memberikan indikasi sejauh mana aspal dapat mengisi ruang pori di antara agregat. VMA diukur sebagai persentase volume total campuran. VMA memiliki persamaan sebagai berikut.

$$VMA = 100 - \frac{(100 - \% \text{ aspal}) \times \text{berat volume benda uji}}{B.J. \text{ Agregat}} \dots\dots\dots (2.1)$$

2.7.2 *Voids in Mineral (VIM)*

Nilai VIM menunjukkan presentase volume rongga terhadap volume total campuran setelah dipadatkan [19]. VIM digunakan untuk mengetahui besarnya rongga campuran, sedemikian sehingga rongga tidak terlalu kecil (menimbulkan bleeding) atau terlalu besar (menimbulkan oksidasi / penuaan aspal dengan masuknya udara). VIM juga dapat memberikan sebuah gambaran tentang sejauh mana agregat mineral dapat mengisi ruang yang tersedia pada campuran. Persamaan VIM sebagai berikut.

$$VIM = 100 - \frac{100 \times \text{berat volume benda uji}}{\text{B.J. maksimum teoritis}} \dots\dots\dots(2.2)$$

Berat jenis maksimum teoritis:

$$BJ = \frac{100}{\frac{\% \text{ agr}}{BJ \text{ agr}} + \frac{\% \text{ aspal}}{BJ \text{ aspal}}} \dots\dots\dots(2.3)$$

2.7.3 Voids Filled with Asphalt (VFA)

VFA mengacu pada volume ruang pori yang diisi dengan aspal di antara partikel agregat mineral. VFA adalah persentase dari VMA yang terisi oleh aspal, tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat [19]. VFA adalah persentase rongga yang terdapat diantara partikel agregat (VMA) yang terisi oleh aspal, tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. VFA memiliki persamaan sebagai berikut.

$$VFA = 100 - \frac{VMA - VIM}{VMA} \dots\dots\dots(2.4)$$

2.8 Uji Marshall

Pengujian kinerja aspal padat dilakukan melalui pengujian Marshall, yang dikembangkan pertama kali oleh Bruce Marshall dan dilanjutkan oleh U.S. Corps *Engineer*. Pengujian *Marshall* bertujuan untuk menentukan ketahanan dan kekuatan (stabilitas) terhadap kelelahan plastis (*flow*). Kedua data tersebut digunakan untuk menentukan *Marshall quotient* (MQ). Oleh karena itu penting sekali untuk mengetahui kinerja yang dihasilkan. Kinerja aspal padat ditentukan melalui pengujian benda uji yang meliputi [20]:

1. Penentuan berat volume benda uji

2. Pengujian nilai stabilitas, adalah kemampuan maksimum beton aspal menerima beban sampai terjadi kelelahan plastis.
3. Pengujian kelelahan (*flow*), adalah besarnya perubahan bentuk plastis dari beton aspal padat, akibat adanya beban sampai batas keruntuhan.
4. Perhitungan koefisien marshall, adalah perbandingan antara nilai stabilitas dan *flow*.
5. Perhitungan berbagai jenis volume pori dalam beton aspal padat (VIM, VMA dan VFA).

2.8.1 Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan lapis keras dalam menahan beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk yang permanen. Stabilitas dinyatakan dalam kilogram (kg). Pengukuran stabilitas dengan uji *Marshall* diperlukan untuk mengetahui kekuatan geser dari sampel yang ditahan dua sisi kepala penekan. Untuk mengetahui karakteristik campuran yang memenuhi kriteria perlu dilakukan evaluasi hasil pengujian Marshall, salah satunya nilai Stabilitas. Stabilitas merupakan kemampuan perkerasan untuk menerima suatu beban sampai terjadi kelelahan [21]. Nilai stabilitas harus mencapai nilai standar agar tidak mudah terjadi kerusakan.

2.8.2 Kelelahan (*Flow*)

Nilai kelelahan yang diperoleh dari uji *Marshall* adalah nilai batas kekuatan Stabilitas dari benda uji yang telah mengalami kehancuran antara komponen bahan pada benda uji. Setelah diketahui nilai Stabilitas dan kelelahan (*flow*) perlu diketahui nilai *Marshall quotient* yang merupakan hasil bagi keduanya [21].

2.8.3 Marshall quotient

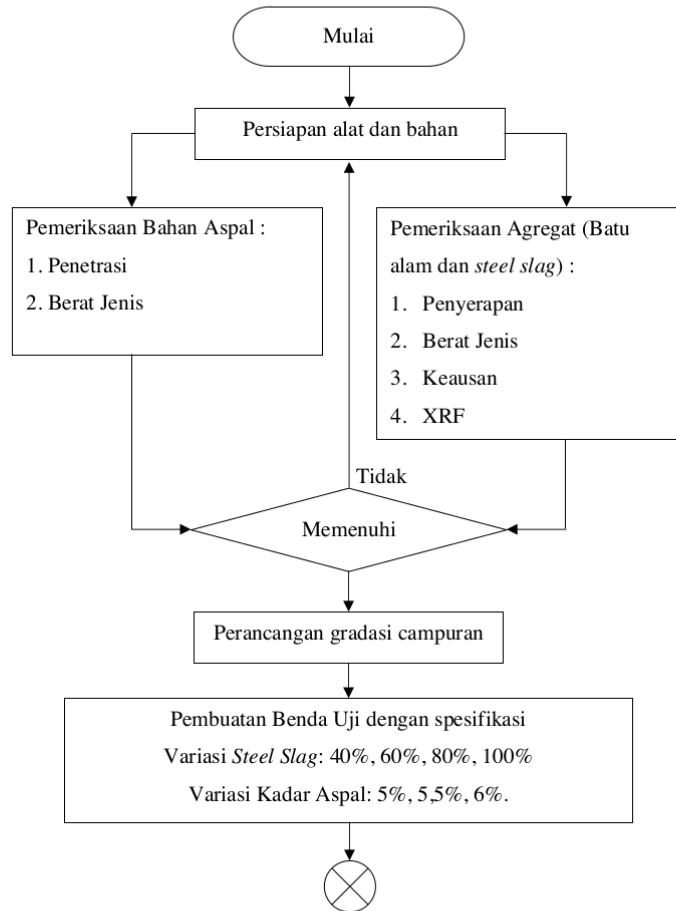
Marshall quotient adalah salah satu parameter yang digunakan dalam uji Marshall, suatu metode pengujian untuk campuran aspal beton (CAB). Uji ini membantu mengevaluasi kekuatan dan stabilitas campuran aspal beton yang akan digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan. *Marshall quotient* dinyatakan sebagai rasio antara kekuatan stabilitas terhadap deformasi.

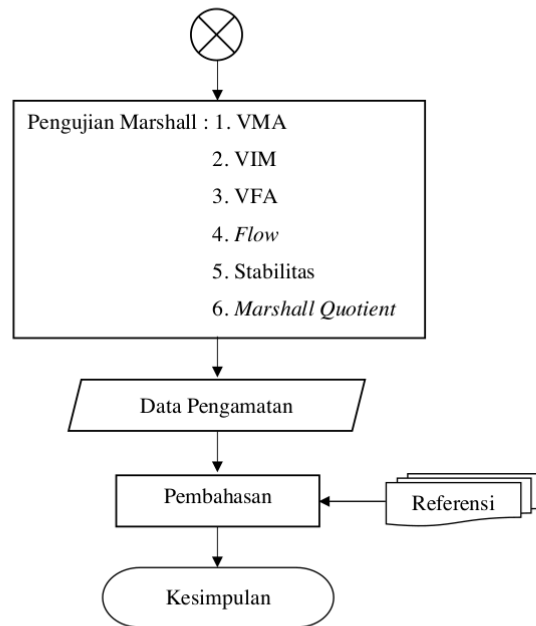
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir prosedur penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat-alat yang Digunakan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1. Alat Berat Jenis
2. Alat Cetak
3. Alat Penetrasi Aspal
4. Alat Uji *Marshall*
5. Dongkrak
6. Mesin *Los Angeles Abrasion*

7. *Oven*
8. Penumbuk
9. *Picknometer*
10. *Sieve Shaker*
11. *Siever*
12. Timbangan
13. *Water Bath*

3.2.2 Bahan-bahan yang Digunakan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya sebagai berikut.

1. Aspal penetrasi 60/70
2. Agregat kasar tertahan saringan 1" sampai 4#
3. Agregat halus tertahan saringan 8# sampai 200#
4. *Steel slag BOF*

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang akan dilakukan pada penelitian kali ini diantaranya sebagai berikut.

3.3.1 Pemeriksaan Aspal

1. Pemeriksaan Penetrasi Aspal, Pemeriksaan ini bertujuan untuk memeriksa tingkat kekerasan aspal. Pemeriksaan dilakukan dengan cara memasukan jarum standar dengan berat standar.
2. Pemeriksaan Berat Jenis Aspal, Pemeriksaan ini dilakukan untuk menentukan berat jenis aspal keras dalam *picknometer*. Berat

jenis aspal merupakan perbandingan antara berat aspal dan berat air suling pada isi yang sama pada suhu 25°C.

Tabel 3.1 Standar Pengujian Karakteristik Aspal

No	Jenis Pengujian	Standar Uji	Spesifikasi
1	Penetrasi Aspal	SNI 06-2456-2011	60-70
2	Berat Jenis	SNI 06-2441-2011	$\geq 1,0$

(Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Divisi 6)

3.3.2 Pemeriksaan Agregat

Pemeriksaan agregat yang akan digunakan dalam campuran aspal (*asphalt concrete*) sangat penting untuk memastikan kualitas dan kinerja yang optimal dari campuran aspal beton. Pemeriksaan ³ agregat dimaksudkan untuk mengetahui apakah agregat tersebut telah memenuhi standar dan dapat digunakan atau tidak, sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

Tabel 3.2 Standar Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Standar Uji	Spesifikasi
1	Berat Jenis Agregat	SNI 1969-2008	
	- Bulk		2,53
	- SSD		2,54
	- Semu		2,62
2	Keausan Agregat	SNI 2417-2008	Maks. 40%
3	Penyerapan Air	SNI 1969-2016	1,37%

Pada pengujian berat jenis dan penyerapan air menggunakan timbangan *O-Hauss* sebagai alat penimbang agregat dalam air. Untuk berat jenis yang digunakan pada penelitian ini adalah berat jenis curah kering. Berat jenis curah kering (*bulk*) dapat dihitung dengan cara :

$$\text{Berat Jenis Bulk} = \frac{BK}{SSD-Ba} \dots\dots\dots(3.1)$$

$$\text{Berat Jenis Kering Permukaan Jenuh} = \frac{SSD}{SSD-Ba} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\text{Berat Jenis Semu} = \frac{BK}{BK-Ba} \dots\dots\dots(3.3)$$

Untuk perhitungan penyerapan air menggunakan cara :

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{SSD-BK}{BK} \times 100\% \dots\dots\dots(3.4)$$

Keterangan :

SSD : Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (g)

BK : Berat Benda Uji Setelah dioven (g)

Ba : Berat Benda Uji dalam Air (g)

Pengujian keausan agregat menggunakan alat *Los Angeles Abrasion* Test memberikan informasi tentang ketahanan agregat terhadap abrasi atau keausan yang disebabkan oleh tumbukan dan gesekan di lapangan. Keausan agregat dihitung dengan cara mengukur jumlah kehilangan berat agregat setelah menjalani serangkaian putaran di dalam tabung silinder *Los Angeles Abrasion testing machine*. Berikut adalah cara menghitung keausan agregat:

$$\text{Keausan} = \frac{a-b}{a} \times 100\% \dots\dots\dots(3.3)$$

Keterangan :

a : berat benda uji semula (g)

b : berat benda uji tertahan saringan 12# (g)

Tabel 3.3 Standar Pengujian Karakteristik Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Standar Uji	Spesifikasi
1	Berat Jenis	SNI 1969-2008	Min. 2,55
2	Penyerapan Air	SNI 1970-2016	Maks. 4,1%
3	Keausan Agregat	SNI 2417-2008	Maks. 40%

(Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Divisi 6)

Pengujian *steel slag* dilakukan untuk mengetahui apakah *steel slag* yang digunakan dapat memenuhi spesifikasi. Material *steel slag* yang digunakan merupakan substitusi dari agregat halus hasil dari alam. Berikut ini merupakan pengujian yang dilakukan serta standar dan spesifikasi yang diperlukan.

Tabel 3.4 Standar Pengujian Karakteristik *Steel slag*

No	Jenis Pengujian	Standar Uji	Spesifikasi
1	Berat Jenis	SNI 03-1969-1990	Min 3,3
2	Penyerapan Air	SNI 03-1969-1990	Maks 3
3	Keausan Agregat	SNI 03-2417-2008	Maks. 40%

(Sumber : Pd T-04-2005)

3.3.3 Perencanaan Gradasi

Dalam penelitian ini, gradasi agregat untuk lapis aus (AC-BC) digunakan. Gradasi ini dinyatakan dalam bentuk persentase agregat yang berhasil melewati saringan terhadap total berat setelah menjalani pengujian analisis saringan. Gradasi tersebut diharapkan memenuhi batasan yang telah ditetapkan sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Tabel 3.4. Gradasi ini selanjutnya akan dilakukan substitusi dengan material *steel slag* dengan mempertimbangkan variabel yang digunakan yaitu 40%, 60%, dan 80%.

Gradasi dapat dilihat pada kolom laston (AC) pada bagian BC

Tabel 3.5 Perencanaan Gradasi

Berat Yang Lolos Terhadap Total Agregat									
Ukuran Ayakan		Stone Matrix Asphalt (SMA)			Lataston (HRS)		Laston (AC)		
ASTM	(mm)	Tipis	Halus	Kasar	WC	Base	WC	BC	Base
1 ½	37,5								100
1	25			100				100	90-100
¾	19		100	90-100	100	100	100	90-100	76-90
½	12,5	100	90-100	50-88	90-100	90-100	90-100	75-90	60-78
3/8	9,5	70-95	50-80	25-60	75-85	65-90	77-90	66-82	52-71
No.4	4,75	30-50	20-35	20-28			53-69	46-64	35-54
No.8	2,36	20-30	16-24	16-24	50-72	35-55	33-53	30-49	23-41
No.16	1,18	14-21					21-40	18-38	13-30
No.30	0,6	12-18			35-60	15-35	14-30	12-28	10-22
No.50	0,3	10-15					9-22	7-20	6-15
No.100	0,15						5-15	5-13	4-10
No.200	0,075	8-12	8-11	8-11	6-10	2,9	4-9	4-8	3,7

(Sumber : Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga Spesifikasi Umum 2018)

3.3.4 Metode Pembuatan Benda Uji

Metode pencampuran yang digunakan adalah metode pada umumnya yaitu metode kering dengan cara mencampurkan aspal panas dan bahan-bahan lain seperti agregat kasar, *split*, dan *steel slag* sebagai bahan substitusi agregat halus.

a. Pembuatan Benda Uji Campuran Beraspal

- 1) Berat jenis maksimum ditentukan dengan cara mengambil data dari percobaan berat jenis agregat halus dan agregat kasar.
- 2) Berat sampel, berat aspal, dan berat agregat dihitung berdasarkan persentase tertahan.
- 3) Agregat dicampurkan dengan aspal pada suhu di bawah 150°C.
- 4) Pemadatan terhadap sampel dilakukan sebanyak 75 kali.
- 5) Benda uji didiamkan terlebih dahulu agar mengeras sebelum dikeluarkan dari cetakan, kemudian didiamkan selama kurang lebih 24 jam.
- 6) Ketebalan diukur, benda uji ditimbang, kemudian direndam dalam air biasa pada suhu normal selama 24 jam.
- 7) Benda uji ditimbang kembali untuk mendapatkan berat jenuh (SSD).
- 8) Sebelum diuji dengan alat Marshall, benda uji harus direndam terlebih dahulu dalam *waterbath* selama 30 menit.

b. Proses Pencampuran **Benda Uji**

- 1) Bahan untuk setiap benda uji yang diperlukan, yaitu campuran beraspal sebanyak ± 1200 gram, disiapkan.
- 2) Panci pencampur beserta agregat kasar, split, dan slag steel dipanaskan dan diaduk hingga mencapai suhu 140°C . Sementara itu, aspal juga dipanaskan secara terpisah pada suhu 138°C .
- 3) Hal yang perlu diperhatikan ketika aspal dipanaskan adalah pengadukan yang konsisten agar penggumpalan dapat dihindari dan campuran tetap homogen.
- 4) Setelah suhu campuran mencapai 165°C , campuran diletakkan pada timbangan dalam keadaan panas, kemudian aspal yang telah dipanaskan pada suhu 150°C dituangkan sesuai kadar yang dibutuhkan.
- 5) Campuran tersebut kemudian diaduk dengan cepat hingga seluruh permukaan agregat terselimuti aspal secara merata. Suhu selama pengadukan dipertahankan pada 155°C dengan pengawasan menggunakan termometer.
- 6) ³ **Pemadatan terhadap sampel** dilakukan sebanyak 75 kali tumbukan pada tiap sisi (atas dan bawah) menggunakan alat penumbuk.
- 7) Benda uji didiamkan terlebih dahulu agar mengeras sebelum dikeluarkan dari cetakan, kemudian didiamkan selama kurang lebih 24 jam.

- 8) Ketebalan diukur, benda uji ditimbang, kemudian direndam dalam air biasa pada suhu normal selama 24 jam.
- 9) Benda uji ditimbang kembali untuk mendapatkan berat jenuh (SSD).
- 10) Sebelum diuji dengan alat *Marshall*, benda uji direndam terlebih dahulu dalam *waterbath* selama 30 menit.

c. Uji *Marshall*

Pengujian ini dilakukan dengan alat *marshall* sesuai dengan prosedur SNI 06-2489-1991 atau AASHTO T245-90 yaitu dengan meletakkan benda uji ke dalam segmen bawah, waktu yang diperlukan dari saat diangkat benda uji dari bak perendaman maksimum tidak boleh lebih dari 30 detik. Kemudian benda uji dibebani dengan kecepatan sekitar 50 mm per menit sampai pembebanan maksimum tercapai atau pembebanan menurun seperti yang ditunjukkan oleh alat pencatat. Kemudian mencatat nilai stabilitas dan *flow* yang tertera pada alat pencatat.

d. Analisa Data

Dari hasil penelitian di Laboratorium akan diperoleh nilai parameter *marshall* (stabilitas, *flow*, VMA, VIM, VFA, dan *marshall quotient*). Dari hasil yang telah diperoleh maka dapat ditentukan suatu variabel dapat menghasilkan kualitas perkerasan jalan yang lebih baik.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Karakterisasi Material

Untuk memahami dan mengevaluasi kinerja material yang digunakan dalam konstruksi khususnya pada perkerasan jalan, sangat penting melakukan karakterisasi material. Proses karakterisasi ini mencakup berbagai pengujian yang bertujuan mengidentifikasi sifat fisik dan mekanik dari bahan-bahan yang akan digunakan. Melalui pengujian ini, dapat dipastikan bahwa material yang dipilih memenuhi standar kualitas yang diperlukan untuk mencapai kinerja optimal. Pengujian utama dalam karakterisasi material ini adalah pengujian berat jenis agregat, keausan agregat, serta berat jenis dan penetrasi aspal. Pengujian-pengujian ini digunakan untuk memastikan setiap material memiliki karakteristik yang sesuai dengan standar dan dapat berfungsi dengan baik dalam aplikasi konstruksi. Material yang dilakukan pengujian merupakan agregat alam, agregat *steel slag*, dan aspal. Agregat alam meliputi agregat kasar dan halus, dengan ukuran agregat kasar berkisar antara 19,05 mm hingga 4,75 mm, serta agregat halus berkisar antara 2,36 mm hingga 0,075 mm. Sedangkan agregat *steel slag* meliputi agregat halus dengan ukuran 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, dan 0,075 mm. Hasil pengujian akan dibandingkan dengan standar yang digunakan oleh Bina Marga. Penggunaan standar ini digunakan sebagai acuan nilai minimal agar material yang digunakan dapat mencapai kualitas yang dibutuhkan.

4.1.1 Berat Jenis Agregat

Karakterisasi berat jenis agregat merupakan hal yang perlu dilakukan untuk memastikan kualitas dan kinerja material yang digunakan dalam perkerasan jalan. Berat jenis agregat menunjukkan kepadatan material dan memengaruhi berbagai sifat fisik dan mekanik dari campuran agregat dengan aspal. Berat jenis agregat yang akurat sangat penting untuk perancangan campuran yang tepat, karena mempengaruhi proporsi bahan dalam campuran dan memberikan kinerja struktural dari perkerasan jalan yang berkualitas. Berikut ini merupakan hasil analisa ¹ pengujian berat jenis pada berbagai jenis agregat yang digunakan pada penelitian:

a. Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar alam

Berat jenis agregat adalah rasio antara berat agregat dengan berat air atau volume agregat tersebut. Pengujian ini penting untuk menentukan komposisi agregat yang diperlukan dalam campuran beraspal. Berat jenis agregat membantu dalam menghitung proporsi material yang tepat, dan memberikan pengaruh kinerja dan stabilitas campuran aspal. Penyerapan air menunjukkan sejauh mana agregat dapat menyerap air, yang dapat memengaruhi kekuatan dan daya tahan material dalam berbagai kondisi lingkungan. Berikut ini merupakan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat alam.

$$\text{Berat Jenis Bulk} = \frac{BK}{SSD-Ba} \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\text{Berat Jenis Kering Permukaan Jenuh} = \frac{SSD}{SSD-Ba} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\text{Berat Jenis Semu} = \frac{BK}{BK - Ba} \dots\dots\dots(4.3)$$

Untuk perhitungan penyerapan air menggunakan cara :

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{SSD - BK}{BK} \times 100\% \dots\dots\dots(4.4)$$

Keterangan :

SSD : Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (g)

BK : Berat Benda Uji Setelah dioven (g)

Ba : Berat Benda Uji dalam Air (g)

Tabel 4.1 Berat Jenis Agregat Kasar dan Penyerapan Air

Keterangan	Berat Jenis Agregat Kasar				
	I	II	III	Rata-rata	Standar Ketentuan
BJ <i>bulk</i>	2,61	2,5	2,58	2,57	2,53
BJ SSD	2,66	2,55	2,64	2,62	2,54
BJ <i>Apparent</i>	2,77	2,63	2,73	2,71	2,62
Penyerapan (%)	2,21	1,89	2,06	2,06	1,37

Berat jenis bulk adalah rasio antara berat agregat kering dengan volume total, termasuk volume pori yang dapat diisi air. Berat jenis SSD adalah perbandingan antara berat agregat yang penuh air dengan total volumenya, termasuk pori-pori berisi air. Dalam kondisi SSD, agregat jenuh air tetapi permukaannya kering. Berat jenis *apparent* adalah rasio antara berat agregat kering dengan volume yang benar-

benar ditempati oleh partikel agregat, tidak termasuk pori yang dapat menyerap air. Dari ketiga jenis berat jenis ini berat jenis yang digunakan adalah berat jenis *bulk*. Berat jenis *bulk* dan penyerapan air yang dihasilkan sesuai dengan standar.

b. Berat jenis dan penyerapan air agregat halus alam

Penentuan berat jenis agregat halus merupakan langkah penting dalam menghitung kebutuhan komposisi campuran beraspal. Agregat halus adalah material yang lolos dari saringan 4,75 mm tetapi tertahan pada saringan 0,075 mm, dengan ukuran partikel berkisar antara 0,075 mm hingga 4,75 mm. Ukuran ini menjadikannya komponen penting dalam campuran beraspal, karena mempengaruhi tekstur dan kepadatan akhir dari campuran tersebut. Selain berat jenis, penyerapan air agregat halus juga diuji. Penyerapan air mengukur kemampuan agregat untuk menyerap air, yang dapat mempengaruhi durabilitas dan performa campuran beraspal. Agregat dengan tingkat penyerapan air yang terlalu tinggi dapat menyebabkan potensi kerusakan pada struktur perkerasan.

Tabel 4.2 Berat Jenis Agregat Halus dan Penyerapan Air

Keterangan	Berat Jenis Agregat Halus				Spesifikasi
	I	II	III	Rata-rata	
BJ <i>bulk</i>	2,61	2,58	2,54	2,58	Min. 2,55
BJ SSD	2,68	2,67	2,64	2,66	
BJ <i>Apparent</i>	2,81	2,83	2,82	2,82	
Penyerapan (%)	2,77	3,52	3,38	3,38	Maks 4,1

Rata-rata berat jenis yang didapatkan sebesar 2,58 untuk berat jenis bulk, 2,66 untuk berat jenis SSD dan 2,82 untuk berat jenis apperent sedangkan penyerapan air yang didapatkan sebesar 3,38%. Hasil dari pengujian sudah sesuai dengan standar yang digunakan.

c. Berat jenis dan penyerapan air *steel slag*

Slag adalah produk sampingan yang dihasilkan selama proses pemurnian besi dan baja dari bijih besi. *Steel slag* terbentuk saat mineral-logam teroksidasi dari bijih besi dilebur di dalam *basic oxygen furnace*. Agregat halus adalah material yang lolos dari saringan 4# tetapi tertahan pada saringan 200#, dengan ukuran partikel berkisar antara 0,075 hingga 4,75 mm. Berikut ini merupakan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada material *steel slag*.

Tabel 4.3 Berat Jenis dan Penyerapan Air *Steel slag*

Berat Jenis Agregat Halus <i>Steel slag</i>					
Keterangan	I	II	III	Rata-rata	Spesifikasi
BJ <i>bulk</i>	3,42	3,38	3,37	3,39	
BJ SSD	3,51	3,45	3,45	3,47	Min. 3,3
BJ <i>Apparent</i>	3,75	3,62	3,67	3,68	
Penyerapan (%)	2,56	1,94	2,46	2,32	Maks 3

Dalam pembuatan benda uji, berat jenis yang digunakan adalah berat jenis *bulk* atau berat jenis curah kering. Rata-rata berat jenis *bulk* yang diperoleh adalah 3,39.

4.1.2 Keausan Agregat

Keausan agregat merupakan proses di mana agregat kasar mengalami penghancuran atau pecah akibat berbagai faktor mekanis. Faktor-faktor ini meliputi gaya-gaya yang terjadi selama proses pembuatan jalan, seperti penimbunan, penghamparan, dan pemadatan. Selain itu, keausan agregat juga terjadi karena beban lalu lintas yang melintasi permukaan jalan, yang memberikan tekanan berulang pada agregat. Tidak hanya faktor mekanis, keausan agregat juga dipengaruhi oleh proses kimiawi. Misalnya, kelembaban yang berfluktuasi dapat menyebabkan agregat mengembang dan menyusut. Nilai abrasi, yang diukur menggunakan mesin *Los Angeles Abrasion* (LAA), merupakan parameter penting dalam menilai daya tahan agregat kasar terhadap penghancuran. Nilai ini menunjukkan sejauh mana agregat mampu bertahan dari tekanan dan gesekan yang disebabkan oleh beban mekanis selama penggunaan. Salah satu indikator untuk menentukan kualitas dari material seperti agregat kasar yang digunakan untuk pekerjaan sipil adalah pengujian keausan agregat dengan mesin *Los Angeles Abrasion*.



Gambar 4.1 Pengujian Keausan Agregat Alam dengan Mesin LAA

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Keausan Agregat Alam

LAA Agregat Alam				
Gradasi Pemeriksaan		Batu Pecah		
Saringan		Hasil Pengujian		
Lolos	Tertahan	Berat Sebelum, a (g)		
3/4'	1/2'	2500	2500	2500
1/2'	3/8'	2500	2500	2500
Jumlah Berat		5000	5000	5000
Berat Sesudah, b (g)		3977,5	3568	3867
a-b		1022,5	1432	1133
LAA Agregat Alam				
Keausan (%)		20,45	28,64	22,66
Keausan rata-rata (%)		23,92		

Dari tiga kali pengujian yang dilakukan, diperoleh hasil rata-rata keausan agregat sebesar 23,92%, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. Nilai keausan agregat ini telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh SNI 2417 2008, yang mensyaratkan nilai keausan harus kurang dari 40%. Pengukuran nilai abrasi ini sangat penting dalam industri konstruksi jalan. Agregat dengan nilai abrasi rendah dianggap lebih tahan lama dan lebih cocok digunakan dalam lapisan perkerasan jalan yang harus menahan beban lalu lintas berat. Sebaliknya, agregat dengan nilai abrasi tinggi cenderung cepat rusak dan tidak cocok untuk aplikasi yang memerlukan daya tahan tinggi. Oleh karena itu, pengujian abrasi menjadi langkah krusial dalam memastikan kualitas dan ketahanan material yang digunakan dalam pembangunan infrastruktur jalan.

4.1.3 Hasil Analisa XRF

Analisis XRF (*X-Ray Fluorescence*) telah dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia yang terkandung dalam steel *slag*. Hasil analisis menunjukkan bahwa komponen utama yang terdapat dalam steel *slag* didominasi oleh oksida besi (Fe_2O_3) sebesar 28,4%, kalsium oksida (CaO) sebesar 27,3%, dan silika (SiO_2) sebesar 23,9%. Selain itu, ditemukan juga kandungan alumina (Al_2O_3) sebesar 8,04% dan fosfor pentoksida (P_2O_5) sebesar 6,66%. Komponen minor lainnya termasuk oksida mangan, titanium, sulfur, vanadium, kromium, dan nikel dengan persentase yang lebih kecil. Senyawa-senyawa tersebut akan memberikan pengaruh pada kualitas jalan.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian XRF Pada *Steel Slag* [27]

Senyawa	Kandungan (%)
Fe_2O_3	28,4
CaO	27,3
SiO_2	23,9
Al_2O_3	8,04
P_2O_5	6,66
MnO	2,53
TiO_2	0,566
SO_3	0,399
V_2O_5	0,175
Cr_2O_3	0,114
NiO	0,106
f- CaO	0,36
Lain-lain	1,92

4.1.4 Berat Jenis Aspal

Pengujian berat jenis bertujuan untuk menentukan nilai berat jenis yang akan digunakan dalam perencanaan gradasi campuran aspal. Berat jenis aspal menjadi indikator penting dalam mengevaluasi kualitas dan kelayakan material aspal yang akan digunakan dalam perkerasan jalan. Aspal dengan berat jenis yang sesuai dengan standar yang ditetapkan menunjukkan bahwa material tersebut memiliki kepadatan dan kekuatan yang cukup untuk menahan beban lalu lintas. Dalam industri konstruksi jalan, penggunaan aspal dengan berat jenis yang tepat sangat penting untuk memastikan daya tahan dan performa perkerasan jalan dalam jangka panjang.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Berat Jenis Aspal

Keterangan	Nilai
Berat piknometer (g)	34,5
Berat piknometer + air (g)	135,5
Berat piknometer + benda uji (g)	126
Berat piknometer + benda uji + air (g)	142,5
Berat jenis aspal	1,083

Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis aspal adalah 1,083. Angka ini memenuhi syarat yang ditetapkan oleh SNI 2441-2011, yang mengharuskan berat jenis aspal minimal 1. Pengujian berat jenis aspal dilakukan untuk menentukan jumlah aspal yang diperlukan dalam campuran. Semakin tinggi nilai berat jenis aspal, semakin besar pula massa aspal dalam

campuran tersebut. Nilai berat jenis 1,083 menunjukkan bahwa aspal memiliki kepadatan yang cukup untuk memberikan performa optimal dalam aplikasi perkerasan jalan.

4.1.5 Penetrasi Aspal

Penetrasi aspal adalah pengujian yang bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan atau konsistensi aspal. Pengujian ini dilakukan dengan cara menekan jarum standar ke dalam aspal pada kondisi tertentu, yaitu pada suhu 25°C selama 5 detik, dengan beban sebesar 100 gram. Hasil pengujian dinyatakan dalam satuan penetrasi, yaitu seperseratus milimeter (dmm). Aspal yang digunakan dalam pengujian ini adalah aspal dengan penetrasi 60/70, yang berarti jarum dapat menembus aspal sedalam 60 hingga 70 dmm dalam kondisi standar tersebut. Aspal penetrasi 60/70 merupakan aspal yang sering digunakan karena jumlahnya yang berlimpah di Indonesia. Aspal penetrasi 60/70 juga memiliki ketahanan yang kuat pada temperatur yang tinggi dan mampu menahan deformasi yang tinggi cocok digunakan di iklim tropis. Berikut ini adalah hasil pengujian penetrasi aspal.



Gambar 4.2 Pengujian Penetrasi Aspal

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal

Penetrasi pada suhu 25 °C, beban 100 g selama 5 detik	I	II	III
Pengamatan I	65	70	66
Pengamatan II	70	67	63
Pengamatan III	67	68	64
Pengamatan IV	66	64	68
Pengamatan V	62	63	63
Pengamatan VI	66	63	62
Rata-rata	66	65,8	64,3

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai penetrasi aspal adalah 66 pada pengujian I, 65,8 pada pengujian II, dan 64,3 pada pengujian III. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa penetrasi aspal tetap berada dalam rentang 60-70, yang merupakan standar untuk aspal dengan kode 60/70. Penetrasi aspal diukur sebagai penurunan jarum penetrasi dengan beban 100 gram selama 5 detik. Nilai penetrasi ini sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan dalam SNI 2456-2011 untuk aspal 60/70. Pengujian penetrasi aspal dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan atau konsistensi aspal yang akan digunakan dalam konstruksi. Semakin tinggi nilai penetrasi, maka semakin lembek atau kurang konsisten aspal tersebut, yang berpotensi membuatnya lebih rentan terhadap deformasi di bawah beban lalu lintas. Konsistensi yang tepat dari aspal sangat penting untuk memastikan bahwa campuran aspal dapat menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi berlebihan yang mengakibatkan kerusakan. Aspal dengan penetrasi 60/70 termasuk dalam kategori aspal dengan tingkat kekerasan menengah, yang cocok digunakan dalam berbagai lalu lintas [22].

4.2 Hasil Karakteristik *Marshall*

Karakteristik *Marshall* yang menjadi fokus dalam penelitian ini mencakup enam parameter utama, yaitu VIM (*Void in Mix*), VMA (*Void in Mineral Aggregate*), VFA (*Void Filled with Asphalt*), stabilitas, *flow*, dan *Marshall quotient*. Setiap parameter ini memiliki peran penting dalam mengevaluasi kualitas campuran aspal dan performa perkerasan jalan. ² *Void in mix* (VIM) volume total udara yang berada di antara partikel agregat yang terselimuti aspal dalam suatu campuran yang telah dipadatkan, dan dinyatakan dalam persen volume *bulk*. *Void in mineral aggregate* (VMA) adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat suatu campuran yang telah dipadatkan, yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total benda uji. *Void filled with asphalt* (VFA) adalah bagian dari rongga yang berada di antara mineral agregat (VMA) yang terisi aspal efektif dinyatakan dalam persen. Stabilitas adalah kemampuan lapisan perkerasan menerima beban yang bekerja tanpa perubahan bentuk. Nilai stabilitas juga menunjukkan besarnya kemampuan perkerasan untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja. *Flow* (kelelahan plastis) adalah besarnya deformasi vertikal sampel yang terjadi mulai saat awal pembebanan sampai kondisi kestabilan maksimum sehingga sampel sampai batas runtuh. *Flow* merupakan indikator terhadap lentur. *Marshall quotient* merupakan perbandingan antara stabilitas dengan kelelahan plastis (*flow*) dan dinyatakan dalam kg/mm. Besarnya *Quotient* merupakan indikator dari kelenturan yang potensial terhadap kerekatan [23]. Berikut ini merupakan hasil rekapitulasi dari pengujian *marshall* untuk mengetahui kualitas dari sampel perkerasan jalan.

Tabel 4.8 Rekapitulasi Hasil Karakteristik Marshall

Karakteristik Marshall	Kadar Aspal (%)	Kadar <i>Steel slag</i>				Spesifikasi
		40%	60%	80%	100%	
VMA (%)	5	16,21	16,49	16,86	17,04	Minimum 14%
	5,5	17,09	17,32	17,70	17,34	
	6	17,84	18,12	18,62	18,02	
VIM (%)	5	4,87	4,98	5,19	5,21	3% - 5%
	5,5	4,68	4,71	4,93	4,30	
	6	4,36	4,42	4,77	3,84	
VFA (%)	5	69,97	69,83	69,20	69,45	Minimum 65%
	5,5	72,59	72,81	72,16	76,22	
	6	75,64	75,62	74,40	79,01	
Stabilitas (kg)	5	1109,60	1101,51	1210,37	1182,72	Minimum 800kg
	5,5	1258,33	1294,75	1333,01	1310,21	
	6	1145,63	1202,13	1269,29	1225,68	
<i>Flow</i> (mm)	5	3,07	2,93	2,85	3,23	2mm - 4mm
	5,5	3,48	3,33	3,17	3,35	
	6	3,97	3,83	3,65	3,57	
MQ (kg/mm)	5	361,82	375,51	424,69	366,17	Minimum 250 kg/mm
	5,5	379,47	388,42	420,95	391,11	
	6	288,82	313,60	347,75	343,33	

Tabel di atas menunjukkan hasil pengujian karakteristik *Marshall* untuk campuran aspal dengan variasi kadar *steel slag* 40%, 60%, dan 80%. Parameter

yang diuji meliputi VMA (*Void in Mineral Aggregate*), VIM (*Void in Mix*), VFA (*Void Filled with Asphalt*), Stabilitas, *Flow*, dan MQ (*Marshall quotient*) dengan berbagai kadar aspal (5%, 5,5%, dan 6. Semua nilai VMA untuk setiap kadar aspal dan *steel slag* memenuhi standar minimum 14%. Sebagian besar nilai VIM berada dalam rentang 3% - 5%, kecuali beberapa nilai pada kadar *steel slag* 80% yang sedikit melebihi batas atas standar. Semua nilai VFA memenuhi standar minimum 65%. Semua nilai Stabilitas memenuhi standar minimum 800 kg, menunjukkan bahwa campuran memiliki kekuatan yang memadai. Sebagian besar nilai *flow* berada dalam rentang standar 2 mm - 4 mm, meskipun ada beberapa nilai yang sedikit di luar rentang nilai standar. Semua nilai MQ memenuhi standar minimum 250 kg/mm.

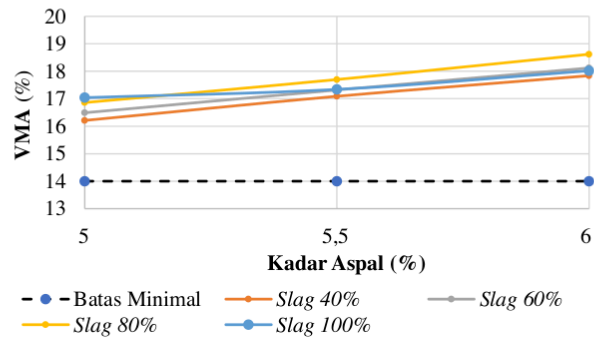
4.2.1 Hasil Analisa VMA (*Void In Mineral Aggregate*)

Rongga di antara mineral agregat (VMA) adalah ruang di antara partikel agregat pada suatu perkerasan beraspal, termasuk rongga udara dan volume aspal efektif (tidak termasuk volume aspal yang diserap agregat).

Rumus untuk mencari nilai VMA adalah:

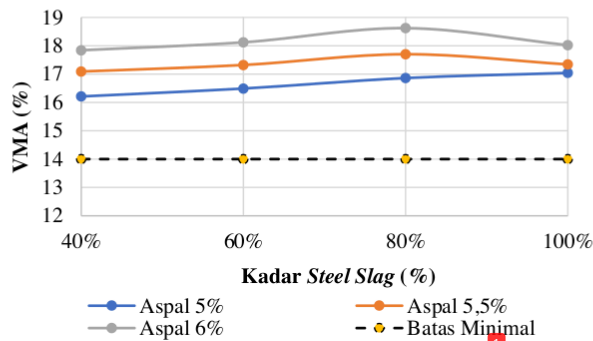
$$Void\ In\ Mineral\ Aggregate = 100 - \frac{Berat\ isi\ x\ (100 - kadar\ aspal)}{Berat\ jenis\ agregat\ alam} \dots\dots(4.5)$$

Nilai VMA yang terlalu kecil menimbulkan masalah durabilitas, karena akan membatasi besarnya rongga terisi aspal, sehingga aspal menjadi kurang kedap terhadap air dan udara. VMA yang terlalu besar menimbulkan masalah stabilitas serta tidak ekonomis, karena dengan rongga antar agregat yang terlalu besar maka kondisi gesekan internal (*internal friction*), penguncian (*interlocking*), dan kemampuan saling mengisi menjadi menurun.



Gambar 4.3 Pengaruh Kadar Aspal terhadap VMA

Gambar 4.3 menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap nilai VMA (*Voids in Mineral Aggregate*) dalam perkerasan jalan. Terlihat bahwa semakin bertambah kadar aspal, nilai VMA cenderung meningkat untuk semua variasi persentase *slag*. Peningkatan VMA ini disebabkan oleh aspal yang mengisi rongga antar agregat, mengurangi kontak langsung antar partikel agregat. Saat kadar aspal bertambah, lapisan aspal yang menyelimuti agregat menjadi lebih tebal, menciptakan jarak lebih besar antar agregat dan meningkatkan volume rongga dalam campuran. Nilai VMA yang baik harus berada di atas batas minimal (14%) untuk memastikan cukup ruang bagi aspal dan udara, namun tidak terlalu tinggi agar campuran tetap stabil. Nilai VMA yang optimal sangat penting untuk performa perkerasan jalan. VMA yang terlalu rendah dapat mengakibatkan campuran yang kaku dan rentan terhadap retak, sementara VMA yang terlalu tinggi dapat menyebabkan stabilitas campuran menurun.



Gambar 4.4 Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap VMA

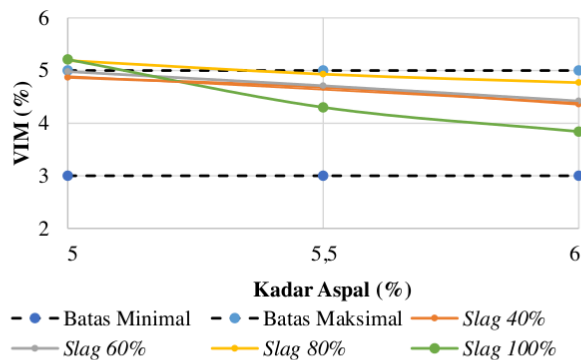
Berdasarkan Gambar 4.4 di atas ditunjukkan bahwa semua variasi kadar *steel slag* campuran memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan persentase minimum 14%. Terdapat pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai VMA yang terlihat semakin naik dengan adanya penambahan kadar *steel slag*. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa kenaikan nilai VMA berkaitan dengan sifat fisis *steel slag* yang *porous*, sehingga dengan penambahan kadar *steel slag* akan menambah volume rongga dalam campuran agregat itu sendiri. Nilai VMA yang mendekati nilai minimum menunjukkan bahwa campuran lebih memiliki keawetan, sedangkan nilai VMA yang tinggi akan mengakibatkan campuran memiliki deformasi yang terlalu besar [24]. Penurunan juga terjadi pada penggunaan kadar *steel slag* 100%, hal ini disebabkan oleh *steel slag* memiliki densitas yang lebih tinggi dibandingkan agregat biasa. Hal tersebut membuat *steel slag* cenderung mengisi lebih banyak ruang, menyebabkan penurunan nilai VMA.

4.2.2 Hasil Analisa VIM (*Void In Mixture*)

7 Nilai VIM menunjukkan nilai persentase rongga dalam suatu campuran aspal. Nilai VIM berpengaruh terhadap nilai dari durabilitas, semakin besar nilai VIM menunjukkan campuran bersifat keropos (*porous*). Proses ini mengakibatkan udara dan air mudah masuk ke dalam lapis perkerasan sehingga berakibat meningkatkan proses oksidasi yang dapat mempercepat penuaan aspal [6]. Spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga adalah 4%-6%. Penggunaan kadar aspal dan penggunaan kadar *steel slag* harus sesuai agar sesuai dengan standar Bina Marga. Semakin tinggi nilai VIM, semakin besar porositas campuran aspal. Campuran yang terlalu *porous* cenderung kurang stabil dan lebih rentan terhadap deformasi akibat beban lalu lintas. Hasil grafik nilai VIM pengaruh kadar aspal dan *steel slag* ditunjukkan pada Gambar 4.5 dibawah

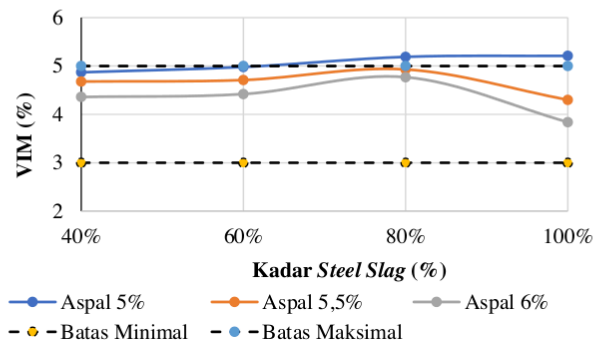
Rumus perhitungan VIM :

$$VIM = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \dots\dots\dots(4.6)$$



Gambar 4.5 Pengaruh Kadar Aspal terhadap VIM

¹ Berdasarkan Gambar 4.5 diatas ditunjukkan bahwa variasi kadar aspal pada campuran memenuhi dan tidak memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan persentase minimum 3% dan maksimum 5%. Pada kadar aspal 5% nilai vim tidak sesuai dengan batas maksimal standar Bina Marga. Dari grafik dapat disimpulkan bahwa semakin bertambah kadar aspal maka nilai VIM akan semakin turun. Terdapat literatur yang menjelaskan seiring dengan bertambahnya kadar aspal, maka nilai VIM menjadi semakin menurun [24]. Hal ini disebabkan karena semakin banyak penggunaan kadar aspal maka aspal akan mengisi rongga pada campuran perkerasan jalan dan menurunkan nilai VIM.



Gambar 4.6 Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap VIM

Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai VIM (*Voids in Mixture*) dalam perkerasan jalan. Terlihat bahwa penambahan *steel slag* hingga 80% cenderung meningkatkan nilai VIM untuk semua kadar aspal yang diuji. Peningkatan ini disebabkan oleh karakteristik fisik *steel slag*

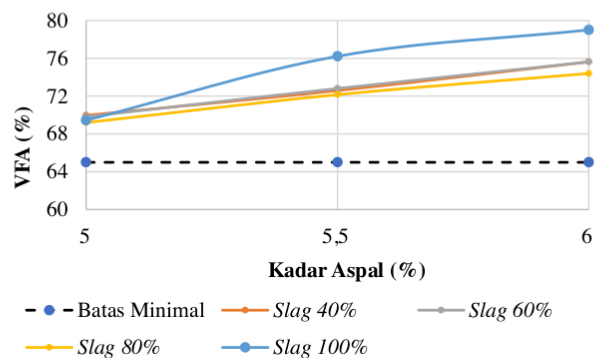
yang memiliki bentuk lebih *angular* dan tekstur permukaan yang lebih kasar dibandingkan dengan agregat alam, sehingga menciptakan lebih banyak rongga dalam campuran. Namun, fenomena menarik terjadi pada penggunaan kadar *steel slag* 100%, di mana terjadi penurunan nilai VIM untuk semua kadar aspal. Penurunan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, pada konsentrasi 100%, *steel slag* mungkin menjadi lebih rapat dalam campuran karena distribusi ukuran partikel yang lebih seragam. Kedua, sifat fisik *steel slag* yang unik memungkinkan pemadatan yang lebih efektif pada jumlah yang banyak sehingga mengurangi rongga antar partikel. Nilai optimal terlihat pada penggunaan *steel slag* 80%, di mana nilai VIM untuk semua kadar aspal berada dalam rentang spesifikasi Bina Marga (3-5%). Pada titik ini, campuran mencapai keseimbangan optimal antara penggunaan *steel slag* dan memenuhi persyaratan nilai untuk rongga dalam campuran. Kadar *steel slag* 80% dapat memberikan kombinasi terbaik antara stabilitas struktur dan durabilitas campuran, membuat cukup ruang untuk ekspansi aspal tanpa membuat campuran terlalu *porous* atau terlalu padat. Hasil penelitian yang ditunjukkan dalam Gambar 4.6 menunjukkan tren yang menarik bila dibandingkan dengan literatur yang dikemukakan oleh Rahmawati [6]. Menurut Rahmawati, peningkatan jumlah *steel slag* dalam campuran aspal cenderung meningkatkan jumlah rongga (VIM). Penelitian ini sesuai dengan hasil yang terlihat pada grafik untuk kadar *steel slag* hingga 80%. Namun, hasil penelitian ini menunjukkan penyimpangan dari tren tersebut pada kadar *steel slag* 100%.

4.2.3 Hasil Analisa VFA (*Void Filled with Asphalt*)

VFA (*Void Filled Asphalt*), menyatakan persen rongga yang terdapat diantara partikel agregat (VFA) yang terisi oleh aspal, tetapi tidak termasuk aspal yang diserap oleh agregat. Rongga ini dalam kondisi kering akan diisi oleh udara dan dalam kondisi basah akan diisi oleh air. *Steel slag* memiliki pengaruh yang signifikan pada VFA karena sifat *steel slag* sendiri yang berpori dapat memungkinkan untuk menyerap aspal yang seharusnya aspal mengisi rongga diantara campuran, namun terserap oleh *steel slag*.

Rumus perhitungan VFA :

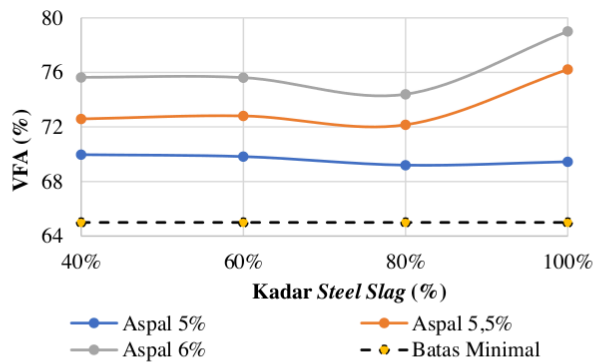
$$VFA = 100 \times \frac{VMA - VIM}{VMA} \dots\dots\dots(4.6)$$



Gambar 4.7 Pengaruh Kadar Aspal terhadap VFA

Gambar 4.7 menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap nilai VFA (*Voids Filled with Asphalt*) dalam perkerasan jalan. Grafik menunjukkan tren peningkatan nilai VFA seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Berdasarkan Gambar 4.7 diatas ditunjukkan bahwa semua variasi campuran

memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan persentase minimum 65%. Peningkatan nilai VFA ini dapat dijelaskan melalui mekanisme pengisian rongga antar agregat oleh aspal. Saat kadar aspal bertambah, lebih banyak aspal tersedia untuk mengisi rongga-rongga dalam campuran, yang mengakibatkan peningkatan persentase rongga yang terisi aspal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua campuran memenuhi batas minimal VFA yang ditetapkan (65%). Hal tersebut menunjukkan bahwa campuran memiliki cukup aspal untuk mengikat agregat dan memberikan durabilitas yang memadai. Namun, perlu diperhatikan bahwa nilai VFA yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan campuran yang terlalu "basah" dan berpotensi mengalami *bleeding* atau deformasi plastis. Campuran dengan persentase *steel slag* yang lebih tinggi cenderung memerlukan lebih banyak aspal untuk mencapai nilai VFA yang sama dengan campuran yang menggunakan lebih sedikit *steel slag*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dalam karakteristik *steel slag*.



Gambar 4.8 Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap VFA

Gambar 4.8 menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai *Voids Filled with Asphalt* (VFA) pada tiga variasi kadar aspal, yaitu 5%, 5,5%, dan 6%. Secara umum, VFA meningkat seiring bertambahnya kadar *steel slag* dalam campuran, meskipun pada kadar tertentu perubahan cenderung stabil. Pada kadar *steel slag* 40% hingga 80%, nilai VFA meningkat secara bertahap namun tidak signifikan. Namun, terjadi lonjakan signifikan pada kadar 100%, terutama pada kadar aspal 5,5% dan 6%. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa nilai VFA umumnya menurun seiring bertambahnya kadar *steel slag* dalam campuran agregat. Hal ini dikarenakan semakin banyak agregat *slag* yang digunakan, semakin banyak pula aspal yang terserap oleh *slag*, karena sifat *slag* yang lebih porous [24]. Dalam situasi seperti ini, jumlah aspal yang mengisi *voids* dalam campuran cenderung menurun, sehingga nilai VFA menjadi lebih rendah. Namun, fenomena lonjakan nilai VFA pada kadar 100% *steel slag* pada grafik ini mengindikasikan adanya faktor lain yang mempengaruhi hasil. Lonjakan VFA pada 100% *steel slag* dapat dijelaskan oleh peran karakteristik fisik *slag* itu sendiri. *Steel slag* adalah agregat yang sangat keras dan memiliki stabilitas yang tinggi. Pada kadar 100%, jumlah *voids* yang terbentuk dalam campuran bisa lebih terkontrol karena *steel slag* yang lebih besar dan padat mampu memperbaiki struktur dan *interlock* antar agregat, sehingga ruang kosong antar agregat berkurang. Meskipun ada lebih banyak aspal yang terserap oleh *slag*, pada kadar yang sangat tinggi (100%), *steel slag* juga dapat membantu mengurangi *voids*, sehingga VFA meningkat karena lebih banyak volume *void* yang diisi aspal. Hal ini mungkin

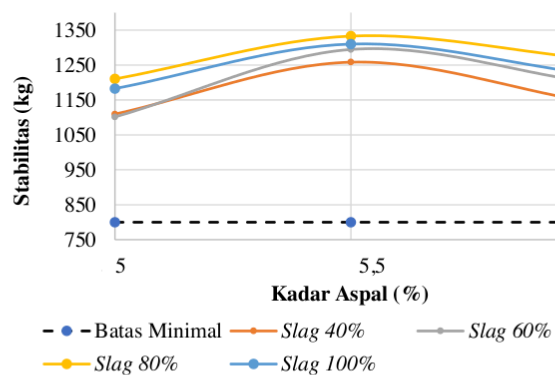
menjelaskan mengapa pada kadar 100%, terjadi lonjakan yang tidak sesuai dengan literatur.

4.2.4 Hasil Analisa Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur, ataupun *bleeding*. Semakin tinggi volume lalu lintas yang membebani sebuah jalan, maka stabilitas yang dibutuhkan oleh perkerasan jalan tersebut akan semakin tinggi agar perkerasan jalan tidak mudah berubah bentuk dan dapan menahan beban lalu lintas. Stabilitas campuran pada pengujian *Marshall* ditunjukkan dengan pembacaan nilai stabilitas yang dikoreksi dengan angka koreksi tebal benda uji [25].

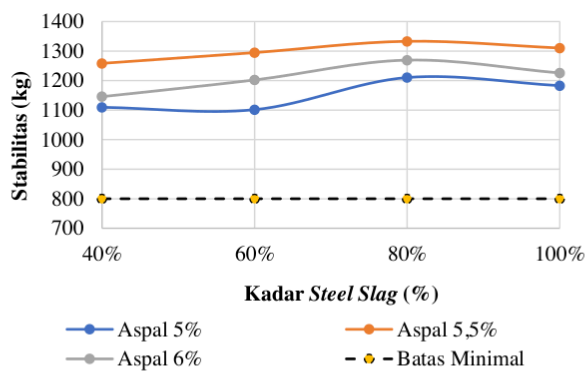
Rumus perhitungan stabilitas :

$$\text{Stabilitas} = \text{Bacaan dial} \times \text{angka kalibrasi} \times \text{angka koreksi berat} \dots (4.7)$$



Gambar 4.9 Pengaruh Kadar Aspal terhadap Stabilitas

¹ Berdasarkan Gambar 4.9 ditunjukkan bahwa semua variasi campuran memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan nilai stabilitas minimum 800 kg. Pada grafik diatas dapat terlihat bahwa terjadi penurunan nilai stabilitas pada kadar aspal 6%. Ketika kadar aspal ditingkatkan dalam campuran perkerasan jalan, nilai stabilitas umumnya meningkat hingga mencapai titik optimal karena aspal berfungsi sebagai pengikat yang menyatukan agregat dan mengisi rongga dalam campuran. Namun, jika kadar aspal terlalu tinggi, kelebihan aspal akan menyebabkan lapisan aspal yang terlalu tebal di sekitar agregat. Hal tersebut dapat mengurangi gesekan antar partikel agregat dan menyebabkan campuran menjadi terlalu lunak atau "tergeser" di bawah beban. Akibatnya, stabilitas campuran menurun karena campuran tidak lagi mampu menahan beban secara efektif dan dapat mengalami deformasi atau kerusakan lebih cepat. Oleh karena itu diperlukan jumlah kadar aspal yang optimal untuk digunakan.



Gambar 4.10 Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap Stabilitas

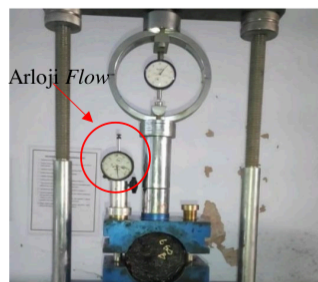
¹ Berdasarkan Gambar 4.10 diatas ditunjukkan bahwa semua variasi campuran memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan nilai stabilitas minimum 800 kg. Dari grafik tersebut dapat terlihat bahwa seiring dengan bertambahnya nilai kadar *steel slag* maka nilai stabilitas semakin naik. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa ⁷kenaikan nilai stabilitas ini dikarenakan sifat fisik *steel slag* yang berongga dan berbentuk tidak beraturan sehingga memungkinkan terjadinya ikatan (*interlock*) yang lebih kuat diantara agregat. ⁷Kenaikan nilai tersebut akan mengakibatkan campuran yang memiliki kadar *slag* yang lebih tinggi akan lebih mampu menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja diatasnya [26]. Hasil penelitian ini sesuai dengan literatur yang digunakan ¹semakin banyak kadar *steel slag* yang digunakan maka nilai stabilitas akan semakin besar. Namun, terjadi penurunan pada kadar *steel slag* 100% sehingga didapat nilai stabilitas yang optimum pada kadar *steel slag* 80%.

Terdapat pula pengaruh komposisi *steel slag* terhadap nilai stabilitas. Kandungan utama *steel slag* yang terdiri dari Fe_2O_3 , CaO , dan SiO_2 memberikan pengaruh positif terhadap stabilitas campuran perkerasan. Fe_2O_3 dengan struktur kristal keras dan stabilnya membentuk fasa hematit yang tahan terhadap deformasi dan abrasi [28]. CaO berkontribusi melalui sifat penyemenannya yang membentuk $\text{Ca}(\text{OH})_2$, meningkatkan kohesi dan interlocking antar agregat [29]. Sementara SiO_2 dengan titik leleh tinggi meningkatkan stabilitas pada suhu tinggi dan memperkuat daya rekat antara aspal dan agregat [30]. Kombinasi ketiga komposisi ini menghasilkan

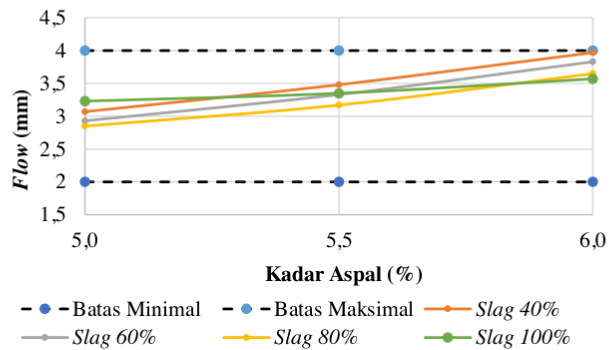
campuran yang lebih tahan terhadap deformasi, sehingga meningkatkan nilai stabilitas dan membuat perkerasan jalan lebih kuat menahan beban lalu lintas.

4.2.5 Hasil Analisa *Flow*

Kelelahan atau *flow* menunjukkan besarnya penurunan atau deformasi yang terjadi terhadap perkerasan jalan akibat menahan beban yang diterimanya. Kelelahan merupakan parameter empiris yang menjadi indikator terhadap kelenturan atau perubahan bentuk plastis campuran beraspal yang diakibatkan oleh beban. Campuran yang memiliki nilai *flow* yang rendah dan stabilitas yang tinggi, cenderung menjadi kaku, getas (*brittle*), dan rentan terhadap retak, sedangkan campuran yang memiliki nilai *flow* yang tinggi dengan stabilitas yang rendah cenderung mudah berubah bentuk apabila mendapatkan beban lalu lintas. Untuk mencapai kualitas campuran yang optimal, diperlukan keseimbangan yang tepat antara nilai *flow* dan stabilitas. Nilai *flow* diperoleh saat sampel benda uji ditekan menggunakan alat uji Marshall. Selama proses ini, nilai *flow* dapat langsung diamati melalui dial pengukuran yang terdapat pada alat uji *Marshall*.

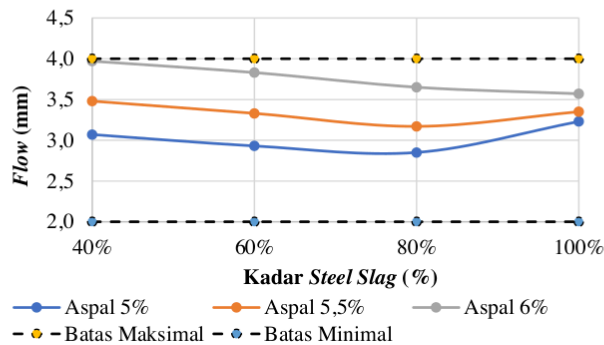


Gambar 4.11 Alat Uji *Marshall*



Gambar 4.12 Pengaruh Kadar Aspal terhadap *Flow*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap nilai *flow*. Pada grafik, terlihat bahwa seiring dengan peningkatan kadar aspal, nilai *flow* juga meningkat. Nilai *flow* menunjukkan kemampuan campuran untuk mengalir, yang merupakan salah satu parameter penting dalam menilai kerja campuran aspal. Kenaikan kadar aspal menyebabkan campuran menjadi lebih plastis dan memungkinkan aliran yang lebih mudah, sehingga nilai *flow* meningkat. Hal tersebut terjadi karena aspal berfungsi sebagai bahan pengikat dalam campuran, memberikan fleksibilitas dan kemampuan deformasi pada campuran. Terdapat batas minimal dan maksimal yang harus diperhatikan untuk menjaga keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas campuran. Nilai *flow* yang terlalu tinggi atau terlalu rendah bisa mempengaruhi performa jalan aspal, seperti daya tahan terhadap deformasi plastis atau kerusakan akibat beban berlebih. Kadar aspal yang lebih tinggi memberikan pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan kemampuan aliran dalam campuran perkerasan jalan.



Gambar 4.13 Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap *Flow*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap nilai *flow* pada tiga kadar aspal yang berbeda: 5%, 5,5%, dan 6%. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa nilai *flow* umumnya mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kadar *steel slag* hingga 80%, tetapi kemudian terjadi lonjakan pada kadar 100%. Penambahan *steel slag* dalam campuran seharusnya menyebabkan nilai *flow* semakin menurun karena *steel slag* memiliki tekstur yang kasar dan tidak beraturan. Tekstur tersebut meningkatkan kepadatan campuran dengan mengisi rongga yang ada, sehingga campuran menjadi lebih padat dan kaku, membuatnya lebih sulit untuk mengalami deformasi. Dalam literatur, dijelaskan bahwa semakin banyak *steel slag* yang ditambahkan, semakin padat campuran, yang secara langsung mengurangi kemampuan alir (*flow*). Oleh karena itu, nilai *flow* yang rendah umumnya menunjukkan bahwa campuran lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi. Namun, pada kadar *steel slag* 100%, terjadi peningkatan nilai *flow*, yang berarti campuran menjadi lebih mudah terdeformasi lagi. Hal

tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satunya adalah bahwa pada kadar *slag* yang sangat tinggi, kemungkinan terbentuk *void* (rongga kecil) lebih banyak dalam campuran karena distribusi material yang tidak homogen. *Void* ini dapat mengurangi kepadatan campuran secara keseluruhan, sehingga meskipun *steel slag* pada dasarnya membuat campuran lebih kaku, pada kadar yang sangat tinggi seperti 100%, kelebihan *slag* justru bisa mengurangi kontak antar partikel dan mengurangi kepadatan efektif. Hal ini menyebabkan campuran memiliki lebih banyak ruang untuk bergerak, yang meningkatkan nilai *flow* dan membuatnya lebih mudah terdeformasi. Fenomena ini mengindikasikan bahwa ada titik optimal dalam penambahan *steel slag*, seperti pada 80%, di mana kepadatan, kekakuan, dan fleksibilitas campuran tercapai dalam keseimbangan yang ideal. Pada kadar 100%, kelebihan *slag* malah menciptakan struktur yang lebih longgar, menyebabkan peningkatan *flow*.

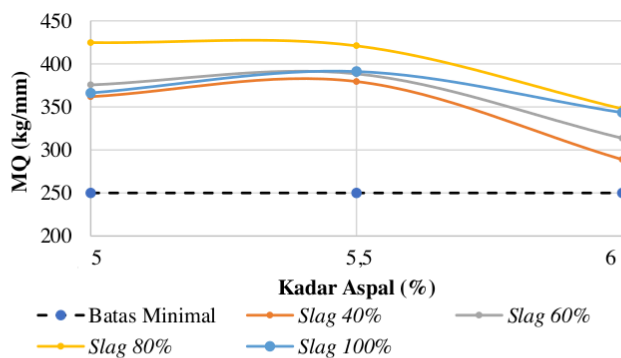
Nilai *flow* pada campuran perkerasan dipengaruhi secara signifikan oleh komposisi kimia dalam *steel slag*, terutama kandungan Fe_2O_3 dan CaO . Struktur kristal Fe_2O_3 yang sangat keras memberikan resistensi tinggi terhadap perubahan bentuk. Sifat ini membuat material membutuhkan energi yang jauh lebih besar untuk mengalami deformasi plastis [29] Fe_2O_3 juga memberikan kekakuan tambahan pada campuran, yang berkontribusi pada pengurangan nilai *flow*. Sementara itu, CaO melalui proses penyemenannya menghasilkan ikatan yang kuat antar partikel, sehingga membantu mengontrol deformasi. CaO bereaksi membentuk ikatan yang sangat kuat

antara partikel-partikel dalam campuran. Proses penyemenan ini menciptakan matriks yang lebih padat dan kohesif. Ikatan yang terbentuk membantu dalam menahan pergerakan plastis di dalam campuran [30]. Kombinasi kedua sifat ini mengakibatkan nilai *flow* yang cenderung menurun, mengindikasikan campuran yang lebih tahan terhadap deformasi permanen namun memiliki fleksibilitas yang lebih rendah.

4.2.6 Hasil Analisa ¹ *Marshall quotient* (MQ)

Nilai *Marshall quotient* (MQ) merupakan hasil bagi antara stabilitas dengan kelelahan (*flow*) dan merupakan pendekatan terhadap tingkat kekakuan dan fleksibilitas campuran. Semakin besar nilai *Marshall quotient* (MQ) berarti campuran semakin kaku dan sebaliknya semakin kecil *Marshall quotient* (MQ) maka perkerasannya semakin lentur. Rumus perhitungan *Marshall quotient*:

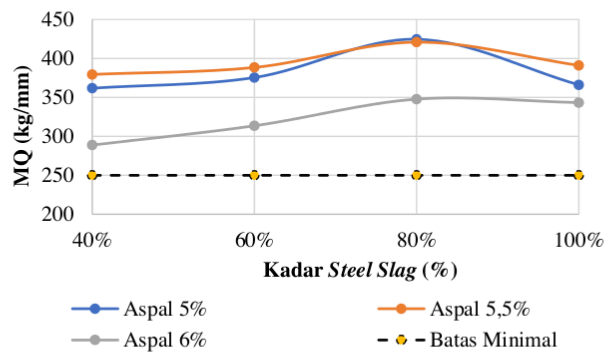
$$\text{Marshall Quotient} = \frac{\text{Stabilitas}}{\text{Flow}} \dots \dots \dots (4.8)$$



Gambar 4.14 Pengaruh Kadar Aspal terhadap *Marshall quotient*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar aspal terhadap Marshall quotient (MQ) pada campuran perkerasan jalan. MQ adalah indikator kekakuan campuran aspal yang diperoleh dari rasio stabilitas Marshall terhadap keelehan (*flow*). Dari grafik, terlihat bahwa nilai MQ meningkat dari kadar aspal 5,0% ke 5,5% menunjukkan peningkatan kekakuan campuran. Namun, penurunan berubah pada kadar aspal 6,0% di mana nilai MQ mengalami penurunan signifikan untuk semua campuran. Penurunan ini dapat dijelaskan karena kadar aspal yang terlalu tinggi cenderung membuat campuran menjadi lebih plastis dan kurang kaku. Ketika kadar aspal melampaui titik optimal, aspal berlebih dapat berfungsi sebagai pelumas antar agregat, mengurangi gesekan internal dan kohesi campuran, sehingga menurunkan kekakuan dan stabilitas. Kadar aspal 5,5% tampak menjadi titik optimal karena memberikan nilai MQ tertinggi untuk semua variasi *slag*. Pada kadar ini, aspal cukup untuk mengikat agregat dengan baik tanpa mengurangi kekakuan campuran. Aspal optimal di 5,5% membuat keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas, menghasilkan campuran yang tahan terhadap deformasi permanen namun tidak terlalu kaku hingga rentan terhadap retak. Semua campuran berada di atas batas minimal MQ yang ditetapkan, menunjukkan bahwa penggunaan *steel slag* dalam berbagai persentase dapat menghasilkan campuran yang memenuhi standar kekakuan yang diperlukan. Namun, perlu dipertimbangkan bahwa campuran yang terlalu kaku (nilai MQ terlalu tinggi) mungkin rentan terhadap retak, sementara yang terlalu lunak berisiko mengalami deformasi. Oleh karena itu,

pemilihan kadar aspal dan persentase *slag* optimal harus mempertimbangkan keseimbangan antara ketahanan terhadap deformasi dan fleksibilitas untuk mencegah retak.



Gambar 4.15 Pengaruh Kadar *Steel slag* terhadap *Marshall Quotient*

Grafik di atas menunjukkan pengaruh kadar *steel slag* terhadap *Marshall Quotient* (MQ) pada campuran perkerasan jalan. MQ adalah indikator kekakuan campuran aspal yang diperoleh dari rasio stabilitas Marshall terhadap kelelahan (*flow*), menunjukkan gambaran tentang ketahanan campuran terhadap deformasi permanen. Terlihat bahwa nilai MQ cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kadar *steel slag* dari 40% hingga 80% untuk semua variasi kadar aspal. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan *steel slag* secara umum meningkatkan kekakuan campuran. Terdapat literatur yang menjelaskan bahwa penggunaan *steel slag* cenderung meningkatkan nilai Marshall Quotient (MQ) [6]. Hal ini disebabkan oleh karakteristik fisik *steel slag* yang umumnya lebih keras, lebih angular, dan

memiliki tekstur permukaan yang lebih kasar dibandingkan dengan agregat alam. Sifat-sifat ini membuat peningkatan gesekan internal dan *interlocking* antar partikel dalam campuran, yang menyebabkan meningkatnya stabilitas dan kekakuan campuran. Ketika kadar *steel slag* mencapai 100%, beberapa faktor mulai berperan yang dapat mengurangi efektivitas campuran. Pertama, densitas yang sangat tinggi dari campuran 100% *steel slag* dapat meningkatkan fleksibilitas yang diperlukan untuk ketahanan terhadap retak. Bentuk angular *steel slag* yang seragam juga dapat menciptakan lebih banyak ruang kosong ketika digunakan 100%, dibandingkan dengan campuran yang memiliki variasi bentuk partikel.

Kadar *steel slag* 80% muncul sebagai titik optimal karena memberikan nilai MQ tertinggi untuk semua variasi kadar aspal. Pada kadar ini, campuran mencapai keseimbangan optimal antara kekakuan yang diberikan oleh *steel slag*. Campuran dengan 80% *steel slag* tampaknya mampu memaksimalkan manfaat dari karakteristik *steel slag* seperti kekerasan, namun tetap mempertahankan workabilitas yang baik dari campuran keseluruhan. Semua campuran termasuk yang menggunakan 100% *steel slag*, masih berada di atas batas minimal MQ yang ditetapkan. Hal tersebut menjelaskan bahwa penggunaan *steel slag* dalam berbagai persentase dapat menghasilkan campuran yang memenuhi standar kekakuan yang diperlukan untuk perkerasan jalan. Namun, pemilihan kadar *steel slag* optimal harus mempertimbangkan tidak hanya nilai MQ, tetapi juga faktor-faktor lain seperti *workabilitas* campuran dan pertimbangan ekonomi dan lingkungan.

Kandungan kimia *steel slag*, terutama Fe_2O_3 , CaO , dan SiO_2 juga terbukti berkontribusi dalam meningkatkan nilai *Marshall Quotient* pada campuran aspal. Fe_2O_3 atau Besi Oksida membentuk ikatan molekul yang kuat sehingga material menjadi lebih tahan terhadap perubahan bentuk, yang berarti meningkatkan ketahanan campuran aspal secara keseluruhan. CaO atau Kalsium Oksida memiliki dua peran penting yaitu memperkuat sifat semen yang menambah stabilitas campuran dan mengatur *flow* dengan memperbaiki daya ikat antar material. SiO_2 atau Silika membantu material tetap stabil pada suhu tinggi dan menyeimbangkan antara kekuatan rekat dengan ketahanan terhadap perubahan bentuk. Kombinasi ketiga senyawa dalam *steel slag* ini saling memberikan pengaruh, Fe_2O_3 meningkatkan kekuatan, CaO menambah stabilitas, dan SiO_2 memberi ketahanan suhu, sehingga menghasilkan nilai *Marshall Quotient* yang baik untuk konstruksi jalan yang awet dan bermutu.

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Komposisi *steel slag* seperti Fe_2O_3 , CaO , SiO_2 dan mineral oksida penyusun memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kualitas campuran perkerasan jalan. Fe_2O_3 meningkatkan ketahanan aus, CaO membuat stabilitas semakin meningkat karena meningkatkan kohesi dan sifat saling mengunci (*interlocking*), dan SiO_2 meningkatkan stabilitas pada suhu tinggi dan ketahanan terhadap air. Dari ketiga komposisi penyusun utama *steel slag* ini dapat disimpulkan bahwa komposisi *steel slag* dapat memberikan hasil stabilitas yang tinggi terhadap kualitas perkerasan jalan.
2. Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan *steel slag* dengan kadar 80% menjadi titik optimal sebagai bahan pengganti agregat alam karena memberikan hasil yang paling baik dibandingkan variasi kadar lainnya. Pengaruh tersebut terlihat dari peningkatan seperti nilai VMA yang mencapai 17,70% pada kadar *steel slag* 80%, nilai VFA mencapai 76,22% pada kadar *steel slag* 100%, dan nilai flow mencapai 3,48 mm pada kadar *steel slag* 40%. Sementara itu, penurunan terjadi pada nilai

VIM yang mencapai 4,71% pada kadar *steel slag* 60%, nilai stabilitas mencapai 1333,01 kg pada kadar *steel slag* 80%, dan nilai marshall quotient mencapai 420,95 kg/mm pada kadar *steel slag* 80. Pada kadar ini, nilai stabilitas mencapai titik tertinggi yang mengindikasikan perkerasan jalan memiliki kekuatan yang optimal dalam menahan beban lalu lintas yang tinggi.

3. Penelitian ini menunjukkan bahwa kadar aspal 5,5% merupakan kadar optimal yang dapat digunakan dalam campuran. Peningkatan terjadi pada beberapa parameter parameter seperti nilai VMA yang mencapai 18,62% pada kadar aspal 6%, nilai VIM mencapai 5,19% pada kadar aspal 5%, nilai Stabilitas mencapai angka tertinggi 1333,01 kg pada kadar aspal 5,5%, dan nilai MQ mencapai 424,69 kg/mm pada kadar aspal 5%. Sementara itu, terjadi penurunan pada nilai VFA yang mencapai 79,01% pada kadar aspal 6% dan nilai flow mencapai 3,65 mm pada kadar aspal 6%. *Steel slag* membuat campuran perkerasan jalan menjadi lebih kaku, oleh karena itu pemilihan kadar aspal yang tepat sangat diperlukan untuk menyeimbangkan efek tersebut.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disarankan agar penelitian ini dapat lebih dikembangkan sebagai berikut :

1. Penggunaan jenis *slag* yang lain seperti *iron slag* untuk mengetahui perbandingan dengan *steel slag*.

2. Penggunaan *steel slag* dari berbagai perusahaan baja di Indonesia untuk mengetahui apakah semua *steel slag* dapat menghasilkan kualitas perkerasan jalan yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Indonesia.go.id, “10 Tahun Pembangunan Infrastruktur: Terikat Nusantara, Menggerakkan Ekonomi,” 2024. [Online]. Available: <https://indonesia.go.id/kategori/editorial/8648/10-tahun-pembangunan-infrastruktur-menghubungkan-nusantara-menggerakkan-ekonomi?lang=1>
- [2] K. PUPR, “Kementerian PUPR Targetkan Tingkat Kemantapan Jalan Nasional Tahun 2023 Mencapai 93,57%,” 2023. [Online]. Available: <https://pu.go.id/berita/kementerian-pupr-targetkan-tingkat-kemantapan-jalan-nasional-tahun-2023-mencapai-9357>
- [3] M. A. P. Munandar and N. Minson Simatupang, “Karakteristik Batu Pecah Ex. Moramo dan Pasir Nambo Sebagai Bahan Campur Cement Treated Base (CTB) Pada Konstruksi Jalan,” 2018.
- [4] M. Pasetto, A. Baliello, G. Giacomello, and E. Pasquini, “The Use of Steel Slags in Asphalt Pavements: A State-of-the-Art Review,” *Sustainability*, vol. 15, no. 11, p. 8817, 2023.
- [5] Media, 4 Visi. “Proyeksi Kinerja Baja Nasional 2024.” <https://lisia.or.id>, <https://lisia.or.id/news/proyeksi-kinerja-baja-nasional-2024>.
- [6] A. Rahmawati, “Pengaruh Penggunaan Limbah Steel Slag Sebagai Pengganti Agregat Kasar Ukuran 1/2” dan 3/8” pada Campuran Hot Rolled Sheet Wearing Course (HRS-WC),” *Dinamika Rekayasa*, vol. 13, no. 1, pp. 10–17, 2017.
- [7] M. C. A. Theresia and A. Winaya, “Pengaruh Pemanfaatan Limbah Slag Baja dan Kerikil Madura Sebagai Pengganti Batu Pecah Untuk Perkerasan Aspal Beton,” in *Seminar Nasional Ilmu Terapan*, vol. 2, no. 1, pp. A05–1, 2018.
- [8] ⁶H. Prasetyo, Y. C. S. Poernomo, and ⁶A. I. Candra, “Studi Perencanaan Perkerasan Lentur dan Rencana Anggaran Biaya (Pada Proyek Ruas Jalan Karangtalun–Kalidawir Kabupaten Tulungagung),” *J. Manaj. Teknol. Tek. Sipil*, vol. 3, no. 2, pp. 347–361, 2020.
- [9] S. P. Salim, B. Hidayat, N. Sari, S. W. Praja, and S. Kusnendi, “Pengaruh Beban Lalu Lintas Terhadap Umur Perkerasan Jalan Rigid,” *Jurnal Penelitian Sekolah Tinggi Transportasi Darat*, vol. 9, no. 1, pp. 41–53, 2018.

- [10] Z. I. Y. Bramantio and N. Hartatik, "Perbedaan Karakteristik Marshall Campuran AC-BC Bergradasi Halus Dengan Campuran AC-BC Bergradasi Kasar," *Jurnal Taguchi: Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri*, vol. 3, no. 1, pp. 561–581, 2023.
- [11] D. Bakarbessy and Y. Y. Pattireuw, "Pemanfaatan Abu Bata Merah Sebagai Pengganti Filler Pada Campuran Aspal Beton (Laston)," *Jurnal PORTAL SIPIL*, vol. 8, no. 1, pp. 72–85, 2019.
- [12] S. Sukirman, *Beton Aspal Campuran Panas*, Bandung: Institut Teknologi Nasional, 2016.
- [13] S. Sukirman, *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur*, Bandung: Institut Teknologi Nasional, 2010.
- [14] S. A. A. Tae, Studi Penelitian Campuran Aspal Jenis Hrs–Base Dengan Menggunakan Agregat Lokal Berdasarkan Karakteristik Marshall (*Quary Sungai Talau Kab. Belu Ntt*) (*Doctoral dissertation*, ITN MALANG). 2024.
- [15] H. Saodang. *Konstruksi Jalan Raya*. Nova.Bandung, 2005.
- [16] K. F. Banurea, "Pemanfaatan Limbah Baja (Slag Baja) Sebagai Bahan Campuran Aspal Terhadap Karakteristik Marshall," M.S. thesis, Universitas Medan Area, 2020.
- [17] D. Asmawan, Analisis Pemanfaatan Limbah Timah (Tin Slag) Sebagai Bahan Campuran Aspal Ac-Wc Pada Perkerasan Jalan (*Doctoral dissertation*, Universitas Islam Lamongan), 2021.
- [18] F. Al-Amri, Studi Perbandingan Penggunaan Aspal Minyak Dengan Aspal Buton Lawele Pada Campuran Aspal Concrete Base Course (Ac-Bc) Menggunakan Metode Marshall Test. *Radial*, 4(2), 181-190, 2013.
- [19] A. Rahmawati, & R. Rizana, Pengaruh Penggunaan Limbah Plastik Polipropilena Sebagai Pengganti Agregat Pada Campuran Laston Terhadap Karakteristik Marshall (105M). *Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-7, Universitas Sebelas Maret, Surakarta*, 2013.
- [20] E. D. Setiawan and A. N. Rahmawati, "Penentuan Karakteristik Aspal Porus Menggunakan Agregat Kasar Batu Pecah Parengan Tuban Dengan Metode Uji Marshall," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 34–46, 2022.
- [21] V. C. Pangemanan, O. H. Kaseke, and M. R. Manoppo, "Pengaruh Suhu dan Durasi Terendamnya Perkerasan Beraspal Panas Terhadap Stabilitas dan Kelelahan (Flow)," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 3, no. 2, pp. 1–12, 2015.

- [22] T. Hidayat, *Analisis hasil nilai viskositas dengan metode pencampuran kerosin pada aspal murni penetrasi 60/70 dengan menggunakan saybolt furol* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim), 2021.
- [23] I. Sulianti, "Studi Pemanfaatan Limbah Beton Mutu Tinggi Pada Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC)," *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, vol. 9, no. 1, pp. 7–14, 2020.
- [24] M. Kasaf, "Penggunaan Slag Steel Sebagai Pengganti Agregat Alam Pada Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) Pada Perkerasan Lentur," M.S. thesis, Dept. Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan Dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2020.
- [25] A. G. Hayati, "Pengaruh Penggunaan Steel Slag (Limbah Baja) Sebagai Pengganti Agregat Tertahan Saringan 1/2" dan 3/8" Terhadap Karakteristik Marshall Pada Campuran AC-WC1," S1 Thesis, Dept. Civil Eng., Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2017.
- [26] A. Rianto, A. Rahmawati, and E. Adly, "Pengaruh Penggunaan Limbah Steel Slag Sebagai Pengganti Agregat Kasar 3/8" Pada Campuran HRS-WC Terhadap Karakteristik Marshall," Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2018.
- [27] M. Anwar, "Pengaruh Ukuran Partikel dan Waktu Steam Aging Terhadap Kandungan f-CaO pada Steel Slag," M.S. Skripsi, Jurusan Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, 2024.
- [28] L. Zhao, Y. Li, L. Zhang, and D. Cang, "Effects of CaO and Fe₂O₃ on the Microstructure and Mechanical Properties of SiO₂-CaO-MgO-Fe₂O₃ Ceramics from Steel Slag," *Isij International*, vol. 57, no. 1, pp. 15–22, 2017.
- [29] P. Risdanareni, B. S. Umniati, and F. Z. Zein, "Workability Enhancement of Geopolymer Concrete Through the Use of Retarder," *Green Construction and Engineering Education for Sustainable Future AIP Conf.*, vol. 1887, pp. 1–9, 2017.
- [30] Y. Ye, S. Wu, C. Li, D. Kong, and B. Shu, "Morphological Discrepancy of Various Basic Oxygen Furnace Steel Slags and Road Performance of Corresponding Asphalt Mixtures," *Materials*, vol. 12, no. 14, p. 2322, 2019.

LAMPIRAN A
CONTOH PERHITUNGAN

Lampiran A. Contoh Perhitungan

Data benda uji :

- a. Tebal benda uji = 62,50 mm
- b. Kadar aspal = 6%
- c. Kadar Agregat = 100 – kadar aspal
= 100 – 6 = 94%
- d. Berat kering = 1285 g
- e. Berat SSD = 1293,6 g
- f. Berat dalam air = 779,5 g
- g. $\text{Volume benda uji} = \text{Berat SSD} - \text{Berat dalam Air}$
= 1285 – 779,5
= 513,7

- h. Berat jenis bulk campuran padat (Gmb)

$$= \frac{\text{Berat kering}}{\text{Volume benda uji}} = \frac{1285}{513,7} = 2,5 \text{ g/cm}^3$$

- i. Berat jenis maksimum campuran (Gmm)

$$= \frac{100}{\frac{\% \text{Agregat}}{\text{Bj agregat eff}} + \frac{\% \text{Aspal}}{\text{Bj Aspal}}}$$
$$= 100 / \left(\frac{95}{2,89} + \frac{5,5}{1,08} \right) = 2,62$$

- j. Rongga udara dalam campuran (VIM)

$$= 100 \times \frac{\text{Gmm} - \text{Gmb}}{\text{Gmm}}$$
$$= 100 \times \frac{2,62 - 2,5}{2,62}$$

$$= 4,7 \%$$

k. Rongga antar agregat (VMA)

$$= 100 - \frac{\text{Berat isi} \times (100 - \text{kadar aspal})}{\text{Berat jenis agregat alam}}$$

$$= 100 - \frac{2,5 \times (100 - 94)}{2,87}$$

$$= 18,56\%$$

l. Rongga terisi aspal (VFA)

$$= 100 \times \frac{\text{VMA} - \text{VIM}}{\text{VMA}}$$

$$= 100 \times \frac{18,56 - 4,7}{18,56}$$

$$= 74,69\%$$

m. Stabilitas

$$= \text{Bacaan dial} \times \text{angka kalibrasi} \times \text{angka korelasi berat}$$

$$= 115 \times 10,9108 \times 1$$

$$= 1254,74 \text{ kg}$$

n. Flow

$$= 3,85 \text{ mm}$$

o. Marshall quotient (MQ)

$$= \frac{\text{Stabilitas}}{\text{Flow}}$$

$$= \frac{1254,74}{3,85}$$

$$= 325,91 \text{ kg/mm}$$

LAMPIRAN B
BLANKO PENGUJIAN

BLANKO PENGUJIAN

No. : 1 Lokasi : Laboratorium Teknik
 Pengujian : Sipil Untirta
 Jenis : Agregat Kasar Tanggal : 4 Februari 2024
 Material Alam Pengujian
 Jenis : Berat Jenis Agregat
 Pengujian Kasar

Tabel B.1 Berat Jenis Agregat Kasar

Keterangan	Nilai	Satuan
Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (SSD)	992,67	gram
Berat Benda Uji setelah dioven (Bk)	972,67	gram
Berat Benda Uji dalam Air (Ba)	613,33	gram
Volume air dalam Benda Uji (SSD-Ba) (V)	379,34	ml
Berat Jenis Bulk $\frac{Bk}{V}$	2,57	gram/ml
Berat Jenis Kering Permukaan Jenuh $\frac{SSD}{V}$	2,62	gram/ml
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) $\frac{Bk}{Bk - Ba}$	2,71	gram/ml
Penyerapan (<i>Absorpsi</i>) $\frac{SSD - Bk}{Bk} \times 100 \%$	2,06	%

BLANKO PENGUJIAN

No. : 2 Lokasi : Laboratorium Teknik
 Pengujian : Sipil Untirta
 Jenis : Agregat Halus Tanggal : 6 Februari 2024
 Material Alam Pengujian
 Jenis : Berat Jenis Agregat
 Pengujian Halus

Tabel B.2 Berat Jenis Agregat Halus

Keterangan	Nilai	Satuan
Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (SSD)	500	gram
Berat Benda Uji setelah dioven (Bk)	487,67	gram
Berat <i>Picnometer</i> Diisi Air (25 ⁰ C) (B)	758,67	gram
Berat <i>Picnometer</i> + Benda Uji (SSD) + Air (25 ⁰ C) (Bt)	1070,83	gram
Berat Jenis Bulk $\frac{Bk}{B + SSD - Bt}$	2,58	gram/ml
Berat Jenis Kering $\frac{SSD}{B + SSD - Bt}$	2,66	gram/ml
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) $\frac{Bk}{B + Bk - Bt}$	2,82	gram/ml
Penyerapan (<i>Absorpsi</i>) $\frac{SSD - Bk}{Bk} \times 100 \%$	3,38	%

BLANKO PENGUJIAN

No. : 3 Lokasi : Laboratorium Teknik
 Pengujian : Sipil Untirta
 Jenis : Agregat Halus Tanggal : 6 Februari 2024
 Material *Steel slag* Pengujian :
 Jenis : Berat Jenis Agregat
 Pengujian Halus

Tabel B.3 Berat Jenis Agregat Halus *Steel slag*

KETERANGAN	Nilai	Satuan
Berat Benda Uji Permukaan Jenuh (SSD)Berat Benda Uji Oven (Bk)	500 488,67	gram gram
Berat Picnometer Diisi Air (25 ⁰ C).(B)	704,17	gram
Berat Picnometer + Benda Uji (SSD) + Air (25 ⁰ C) (Bt)	1060	gram
1 Berat Jenis Bulk $\frac{Bk}{B + SSD - Bt}$	3,39	gram/ml
Berat Jenis Kering $\frac{SSD}{B + SSD - Bt}$	3,47	gram/ml
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) $\frac{Bk}{B + Bk - Bt}$	3,68	gram/ml
Penyerapan (<i>Absorpsi</i>) $\frac{SSD - Bk}{Bk} \times 100 \%$	2,32	%

BLANKO PENGUJIAN

No.	: 4	Lokasi	: Laboratorium Teknik
Pengujian		Pengujian	Sipil Untirta
Jenis	: Agregat Kasar	Tanggal	: 7 Februari 2024
Material	Alam	Pengujian	
Jenis	: <i>Los Angeles</i>		
Pengujian	<i>Abration</i>		

Tabel B.4 *Los Angeles Abrasion*

Gradasi pemeriksaan			
Saringan		Hasil Pengujian	
Lewat	Tertahan	Berat Sebelum	Berat Sesudah
12.50 mm (1/2")	9.57 mm (3/8")	2500	-
19.05 mm (3/4")	12.5 mm(1/2")	2500	-
Jumlah Berat		5000	3804,17

$$\text{Pengujian Abrasi} = \frac{A-B}{A} \times 100\% = \frac{5000 - 3804,17}{5000} \times 100\% = 23,92\%$$

BLANKO PENGUJIAN

No.	: 5	Lokasi	: Laboratorium
Pengujian		Pengujian	Teknik Sipil Untirta
Jenis	: Aspal Pertamina	Tanggal	: 16 Februari 2024
Material	Penetrasi 60/70	Pengujian	
Jenis	: Penetrasi Aspal		
Pengujian			

Tabel B.5 Penetrasi Aspal

		Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
Contoh Dipanaskan	Mulai jam :	13.00 WIB	Temperatur pemanasan 150 ⁰ C
	Selesai jam :	13.30 WIB	
Mendinginkan Contoh	Mulai jam :	13.30 WIB	
	Selesai jam :	14.30 WIB	
Direndam pada suhu 25 °C	Mulai jam :	14.30 WIB	Temperatur bak perendam 25 °C
	Selesai jam :	15.30 WIB	
Pemeriksaan penetrasi pada suhu 25 °C	Mulai jam :	15.30 WIB	Temperatur alat 25 °C
	Selesai jam :	16.00 WIB	

Penetrasi Pada Suhu 25 °C			
Beban 100 gr selama 5 detik	I	II	III
Pengamatan 1	65	70	66
Pengamatan 2	70	67	63
Pengamatan 3	67	68	64
Pengamatan 4	66	64	68
Pengamatan 5	62	63	63
Pengamatan 6	66	63	62
Rata - Rata	66	65,8	64

BLANKO PENGUJIAN

No. : 6 Lokasi : Laboratorium
Pengujian Pengujian Teknik Sipil Untirta
Jenis : Aspal Pertamina Tanggal : 10 Februari 2024
Material Penetrasi 60/70 Pengujian
Jenis : Berat Jenis Aspal
Pengujian

Tabel B.6 Berat Jenis Aspal

Keterangan		Nilai	Satuan
Berat <i>Picknometer</i> + Tutup	(W ₁)	34,5	gram
Berat <i>Picknometer</i> + Tutup + Air (25°C)	(W ₂)	135,5	gram
Berat <i>Picknometer</i> + Tutup + Benda Uji	(W ₃)	126	gram
Berat <i>Picknometer</i> + Tutup + Benda Uji + Air (25°C)	(W ₄)	142,5	gram
Berat Jenis Aspal = $\frac{(W_3 - W_1)}{(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3)}$		1,083	gram/ml

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 7
Jenis Material : Campuran Aspal
Jenis Pengujian : Campuran 40% Aspal 5%
Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta
Tanggal Pengujian :

Tabel B.7 Campuran 40% Aspal 5%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm ³)	Volume Slag (40%)	Berat Agregat (60% Volume)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat					
Inch	mm					5%		
1"	25.4							
3/4"	19		2.57	57,00	22,22	8,89	57,00	57,00
1/2"	12.5		2.57	142,50	55,55	22,22	142,50	142,50
3/8"	9.52		2.57	96,90	37,78	15,11	96,90	96,90
4#	4.76		2.59	216,60	83,55	33,42	216,60	216,60
-4# + 6#	2.36	3.39	2.58	176,70	68,62	27,45	106,02	199,06
-6# + 16#	1.18	3.39	2.58	131,10	50,91	20,36	78,66	147,69
-16# + 30#	0.6	3.39	2.58	91,20	35,42	14,17	54,72	102,74
-30# + 50#	0.3	3.39	2.58	74,10	28,77	11,51	44,46	83,48
-50# + 100#	0.15	3.39	2.58	51,30	19,92	7,97	30,78	57,79
-100# + 200#	0.075	3.39	2.58	34,20	13,28	5,31	20,52	38,53
-200#		3.39	2.58	68,40	26,56	10,62	41,04	77,05
Total Berat Agregat (gr)				1140	442,58	177,03	889,20	1219,34
Berat Aspal Total (gr)						60		
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)						4,92		
Berat Sampel (gr)						1200		

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 8

Jenis Material : Campuran Aspal

Jenis Pengujian : Campuran 40% Aspal 5,5%

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta

Tanggal Pengujian :

Tabel B.8 Campuran 40% Aspal 5,5%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm3)	Volume Slag (40%)	Berat Slag (40% Volume)	Berat Agregat (60%)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm								
1"	25,4								
3/4"	19		2,57	56,70	22,10	8,84		56,70	56,70
1/2"	12,5		2,57	141,75	55,26	22,10		141,75	141,75
3/8"	9,52		2,57	96,39	37,58	15,03		96,39	96,39
4#	4,76		2,59	215,46	83,11	33,24		215,46	215,46
-4# + 6#	2,36	3,39	2,58	175,77	68,26	27,30	92,55	105,46	198,01
-6# + 16#	1,18	3,39	2,58	130,41	50,64	20,26	68,67	78,25	146,91
-16# + 30#	0,6	3,39	2,58	90,72	35,23	14,09	47,77	54,43	102,20
-30# + 50#	0,3	3,39	2,58	73,71	28,62	11,45	38,81	44,23	83,04
-50# + 100#	0,15	3,39	2,58	51,03	19,82	7,93	26,87	30,62	57,49
-100# + 200#	0,075	3,39	2,58	34,02	13,21	5,28	17,91	20,41	38,32
-200#		3,39	2,58	68,04	26,42	10,57	35,83	40,82	76,65
Total Berat Agregat (gr)				1134	440,25	176,10	328,40	884,52	1212,92
Berat Aspal Total (gr)				66					
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)				5,44					
Berat Sampel (gr)				1200					

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 9
Jenis Material : Campuran Aspal
Jenis Pengujian : Campuran 40% Aspal 6%

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta
Tanggal Pengujian :

Tabel B.9 Campuran 40% Aspal 6%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm3)	Volume Slag (40%)	Berat Slag (40% Volume)	Berat Agregat (60%)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm			6%					
1"	25.4								
3/4"	19		2.57	56.40	21.99	8.80		56.40	56.40
1/2"	12.5		2.57	141.00	54.97	21.99		141.00	141.00
3/8"	9.52		2.57	95.88	37.38	14.95		95.88	95.88
4#	4.76		2.59	214.32	82.67	33.07		214.32	214.32
-4# + 6#	2.36	3.39	2.58	174.84	67.89	27.16	92.06	104.90	196.96
-6# + 16#	1.18	3.39	2.58	129.72	50.37	20.15	68.30	77.83	146.13
-16# + 30#	0.6	3.39	2.58	90.24	35.04	14.02	47.51	54.14	101.66
-30# + 50#	0.3	3.39	2.58	73.32	28.47	11.39	38.61	43.99	82.60
-50# + 100#	0.15	3.39	2.58	50.76	19.71	7.88	26.73	30.46	57.18
-100# + 200#	0.075	3.39	2.58	33.84	13.14	5.26	17.82	20.30	38.12
-200#		3.39	2.58	67.68	26.28	10.51	35.64	40.61	76.24
Total Berat Agregat (gr)				1128	437.92	175.17	326.66	879.84	1206.50
Berat Aspal Total (gr)				72					
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)				5.97					
Berat Sampel (gr)				1200					

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 10

Jenis Material : Campuran Aspal

Jenis Pengujian : Campuran 60% Aspal 5%

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta

Tanggal Pengujian :

Tabel B.10 Campuran 60% Aspal 5%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm3)	Volume Slag (60%)	Berat Slag (60% Volume)	Berat Agregat (40% Volume)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm						5%		
1"	25,4								
3/4"	19		2,57	57,00	22,22	13,33		57,00	57,00
1/2"	12,5		2,57	142,50	55,55	33,33		142,50	142,50
3/8"	9,52		2,57	96,90	37,78	22,67		96,90	96,90
4#	4,76		2,59	216,60	83,55	50,13		216,60	216,60
-4# + 6#	2,36	3,39	2,58	176,70	68,62	41,17	139,56	70,68	210,24
-6# + 16#	1,18	3,39	2,58	131,10	50,91	30,55	103,54	52,44	155,98
-16# + 30#	0,6	3,39	2,58	91,20	35,42	21,25	72,03	36,48	108,51
-30# + 50#	0,3	3,39	2,58	74,10	28,77	17,26	58,52	29,64	88,16
-50# + 100#	0,15	3,39	2,58	51,30	19,92	11,95	40,52	20,52	61,04
-100# + 200#	0,075	3,39	2,58	34,20	13,28	7,97	27,01	13,68	40,69
-200#		3,39	2,58	68,40	26,56	15,94	54,02	27,36	81,38
Total Berat Agregat (gr)				1140	442,58	265,55	495,21	763,80	1259,01
Berat Aspal Total (gr)				60					
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)				4,77					
Berat Sampel (gr)				1200					

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 11

Jenis Material : Campuran Aspal

Jenis Pengujian : Campuran 60% Aspal 5,5%

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Unirta

Tanggal Pengujian :

Tabel B.11 Campuran 60% Aspal 5,5%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm3)	Volume Slag (60%)	Berat Slag (60% Volume)	Berat Agregat (40%)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm						5,5%		
1"	25,4								
3/4"	19		2,57	56,70	22,10	13,26		56,70	56,70
1/2"	12,5		2,57	141,75	55,26	33,16		141,75	141,75
3/8"	9,52		2,57	96,39	37,58	22,55		96,39	96,39
4#	4,76		2,59	215,46	83,11	49,86		215,46	215,46
-4# + 6#	2,36	3,39	2,58	175,77	68,26	40,95	138,82	70,31	209,13
-6# + 16#	1,18	3,39	2,58	130,41	50,64	30,38	103,00	52,16	155,16
-16# + 30#	0,6	3,39	2,58	90,72	35,23	21,14	71,65	36,29	107,94
-30# + 50#	0,3	3,39	2,58	73,71	28,62	17,17	58,22	29,48	87,70
-50# + 100#	0,15	3,39	2,58	51,03	19,82	11,89	40,30	20,41	60,72
-100# + 200#	0,075	3,39	2,58	34,02	13,21	7,93	26,87	13,61	40,48
-200#		3,39	2,58	68,04	26,42	15,85	53,74	27,22	80,95
Total Berat Agregat (gr)				1134	440,25	264,15	492,60	759,78	1252,38
Berat Aspal Total (gr)				66					
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)				5,27					
Berat Sampel (gr)				1200					

No. Pengujian : 12
 Jenis Material : Campuran Aspal
 Jenis Pengujian : Campuran 60% Aspal 6%

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta
 Tanggal Pengujian :

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm3)	Volume Slag (60%)	Berat Slag (60% Volume)	Berat Agregat (40%)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm								
1"	25,4								
3/4"	19		2,57	56,40	21,99	13,19		56,40	56,40
1/2"	12,5		2,57	141,00	54,97	32,98		141,00	141,00
3/8"	9,52		2,57	95,88	37,38	22,43		95,88	95,88
4#	4,76		2,59	214,32	82,67	49,60		214,32	214,32
-4# + 6#	2,36	3,39	2,58	174,84	67,89	40,74	138,09	69,94	208,02
-6# + 16#	1,18	3,39	2,58	129,72	50,37	30,22	102,45	51,89	154,34
-16# + 30#	0,6	3,39	2,58	90,24	35,04	21,03	71,27	36,10	107,37
-30# + 50#	0,3	3,39	2,58	73,32	28,47	17,08	57,91	29,33	87,24
-50# + 100#	0,15	3,39	2,58	50,76	19,71	11,83	40,09	20,30	60,39
-100# + 200#	0,075	3,39	2,58	33,84	13,14	7,88	26,73	13,54	40,26
-200#		3,39	2,58	67,68	26,28	15,77	53,45	27,07	80,53
Total Berat Agregat (gr)				1128	437,92	262,75	489,99	755,76	1245,75
Berat Aspal Total (gr)		72							
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)		5,78							
Berat Sampel (gr)		1200							

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 13
Jenis Material : Campuran Aspal
Jenis Pengujian : Campuran 80% Aspal 5%
Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta
Tanggal Pengujian :

Tabel B.13 Campuran 80% Aspal 5%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm ³)	Volume Slag (80%)	Berat Slag (80% Volume)	Berat Agregat (20% Volume)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm								
1"	25,4								
3/4"	19		2,57	57,00	22,22	17,78		57,00	57,00
1/2"	12,5		2,57	142,50	55,55	44,44		142,50	142,50
3/8"	9,52		2,57	96,90	37,78	30,22		96,90	96,90
4#	4,76		2,59	216,60	83,55	66,84		216,60	216,60
-4# + 6#	2,36	3,39	2,58	176,70	68,62	54,89	186,08	35,34	221,42
-6# + 16#	1,18	3,39	2,58	131,10	50,91	40,73	138,06	26,22	164,28
-16# + 30#	0,6	3,39	2,58	91,20	35,42	28,33	96,04	18,24	114,28
-30# + 50#	0,3	3,39	2,58	74,10	28,77	23,02	78,03	14,82	92,85
-50# + 100#	0,15	3,39	2,58	51,30	19,92	15,94	54,02	10,26	64,28
-100# + 200#	0,075	3,39	2,58	34,20	13,28	10,62	36,01	6,84	42,85
-200#		3,39	2,58	68,40	26,56	21,25	72,03	13,68	85,71
Total Berat Agregat (gr)				1140	442,58	354,06	660,27	638,40	1298,67
Berat Aspal Total (gr)				60					
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)				4,62					
Berat Sampel (gr)				1200					

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 14
Jenis Material : Campuran Aspal
Jenis Pengujian : Campuran 80% Aspal 5,5%

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta
Tanggal Pengujian :

Tabel B.14 Campuran 80% Aspal 5,5%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm3)	Volume Slag (80%)	Berat Slag (80% Volume)	Berat Agregat (20%)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm								
1"	25,4								
3/4"	19		2,57	56,70	22,10	17,68		56,70	56,70
1/2"	12,5		2,57	141,75	55,26	44,21		141,75	141,75
3/8"	9,52		2,57	96,39	37,58	30,06		96,39	96,39
4#	4,76		2,59	215,46	83,11	66,49		215,46	215,46
-4# + 6#	2,36	3,39	2,58	175,77	68,26	54,60	185,10	35,15	220,25
-6# + 16#	1,18	3,39	2,58	130,41	50,64	40,51	137,33	26,08	163,41
-16# + 30#	0,6	3,39	2,58	90,72	35,23	28,18	95,53	18,14	113,68
-30# + 50#	0,3	3,39	2,58	73,71	28,62	22,90	77,62	14,74	92,36
-50# + 100#	0,15	3,39	2,58	51,03	19,82	15,85	53,74	10,21	63,94
-100# + 200#	0,075	3,39	2,58	34,02	13,21	10,57	35,83	6,80	42,63
-200#		3,39	2,58	68,04	26,42	21,14	71,65	13,61	85,26
Total Berat Agregat (gr)				1134	440,25	352,20	656,80	635,04	1291,84
Berat Aspal Total (gr)				66					
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)				5,11					
Berat Sampel (gr)				1200					

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 15

Jenis Material : Campuran Aspal

Jenis Pengujian : Campuran 80% Aspal 6%

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta

Tanggal Pengujian :

Tabel B.15 Campuran 80% Aspal 6%

Nomor / Ukuran Saringan		BJ Bulk		Berat Agregat (gram)	Volume Agregat (cm3)	Volume Slag (80%)	Berat Slag (80% Volume)	Berat Agregat (20%)	Total
		BJ Slag	BJ Agregat						
Inch	mm					6%			
1"	25,4			56,40	21,99	17,59		56,40	56,40
3/4"	19		2,57	141,00	54,97	43,98		141,00	141,00
1/2"	12,5		2,57	95,88	37,38	29,90		95,88	95,88
3/8"	9,52		2,59	214,32	82,67	66,13		214,32	214,32
4#	4,76		2,58	174,84	67,89	54,32	184,12	34,97	219,09
-4# + 6#	2,36	3,39	2,58	129,72	50,37	40,30	136,60	25,94	162,55
-6# + 16#	1,18	3,39	2,58	90,24	35,04	28,03	95,03	18,05	113,08
-16# + 30#	0,6	3,39	2,58	73,32	28,47	22,78	77,21	14,66	91,88
-30# + 50#	0,3	3,39	2,58	50,76	19,71	15,77	53,45	10,15	63,61
-50# + 100#	0,15	3,39	2,58	33,84	13,14	10,51	35,64	6,77	42,40
-100# + 200#	0,075	3,39	2,58	67,68	26,28	21,03	71,27	13,54	84,81
-200#		3,39	2,58						
Total Berat Agregat (gr)				1128	437,92	350,34	653,32	631,68	1285,00
Berat Aspal Total (gr)						72			
Persen Berat Aspal Terhadap Agregat (%)						5,60			
Berat Sampel (gr)						1200			

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 16

Jenis Material : Campuran Aspal Steel slag 40%

Jenis Pengujian : Pengujian Marshall

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta

Tanggal Pengujian :

Tabel B.16 Pengujian Marshall Campuran Aspal Steel slag 40%

Kode Beket	Tinggi Benda Uji (cm)	Angka Korelasi Beban	Kadar Aspal		BJ Bulk Agregat	Berat Benda Uji (g)		Isi Benda Uji (cc)	BJ Campuran Maksimum (g/mm)	BJ Efektif Agregat (Gse)	Berat Isi (g/m³) (Gmb)	VIM (%)	VMA (%)		VFA (%)	Stabilitas		Flow (mm)	Hasil Uji Marshall (kg/mm)
			Terhadap Agregat (%)	Terhadap Berat Campuran (%)		Kering	SSD						m	n		P	Q		
A-1	5,92	1,09	95,00	5,00	2,69	1208,00	1237,00	742,00	2,58	2,78	2,44	5,43	16,70	67,50	67,50	90,20	1072,73	3,10	346,04
A-2	6,00	1,09	95,00	5,00	2,69	1215,00	1245,00	752,00	2,58	2,78	2,46	4,49	15,87	71,09	71,09	97,20	1157,17	2,90	399,02
A-3	6,07	1,09	95,00	5,00	2,69	1209,00	1238,00	753,00	2,58	2,78	2,45	4,50	15,85	69,75	69,75	97,20	1168,69	3,20	371,46
Rata-Rata	6,03	1,09	95,00	5,00	2,69	1209,33	1241,67	749,00	2,58	2,78	2,45	4,79	16,22	69,42	69,42	93,20	1179,69	3,07	364,82
A-1	6,23	1,04	94,50	5,50	2,69	1219,00	1251,00	750,00	2,56	2,78	2,44	4,83	17,22	71,93	71,93	112,00	1270,89	3,50	363,41
A-2	6,10	1,00	94,50	5,50	2,69	1233,00	1277,00	768,00	2,56	2,78	2,42	5,44	17,75	69,34	69,34	110,00	1200,19	3,40	353,00
A-3	6,17	1,04	94,50	5,50	2,69	1230,00	1262,00	763,00	2,56	2,78	2,46	3,78	16,30	76,81	76,81	115,00	1304,93	3,55	367,59
Rata-Rata	6,17	1,03	94,50	5,50	2,69	1227,33	1264,00	761,33	2,56	2,78	2,44	4,68	17,09	72,69	72,69	112,33	1258,33	3,48	361,24
A-1	6,32	1,00	94,00	6,00	2,61	1256,50	1299,00	787,00	2,54	2,78	2,45	3,51	17,11	79,48	79,48	108,00	1178,37	4,10	297,41
A-2	6,00	1,00	94,00	6,00	2,61	1260,40	1286,00	765,20	2,54	2,78	2,42	4,85	18,26	73,45	73,45	105,00	1145,63	3,85	297,57
A-3	6,21	1,00	94,00	6,00	2,61	1258,20	1288,50	769,30	2,54	2,78	2,42	4,72	18,15	73,99	73,99	102,00	1112,90	3,95	281,25
Rata-Rata	6,18	1,00	94,00	6,00	2,61	1258,37	1291,17	773,83	2,54	2,78	2,43	4,36	17,84	75,64	75,64	105,00	1145,63	3,97	288,2

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 17

Jenis Material : Campuran Aspal Steel slag 60%

Jenis Pengujian : Pengujian Marshall

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta

Tanggal Pengujian :

Tabel B.17 Pengujian Marshall Campuran Aspal Steel slag 60%

Kode Briket	Tinggi Benda Uji (cm)	Angka Korelasi Beban	Kadar Aspal		BJ Bulk Agregat	Berat Benda Uji (g)		Isi Renda Uji (cc)	BJ Campuran Maksimum (gram)	BJ Efektif Agregat (Gse)	Berat Isi (g/m³) (Gmb)	VIM (%)	VMA (%)		VFA (%)	Stabilitas		flow (mm)	Hasil Basi Marshall
			Terhadap Berat Agregat (%)	Terhadap Berat Campuran (%)		Kering	SSD									Batuan Pada Alat	Stabilitas Dibarekai (kg)		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j = h - i	k	l	m	n	o	p	q	r	s	
A - 1	62,1	1,04	95,00	5,00	2,75	1265,00	1282,00	774,80	507,20	2,62	2,84	4,96	16,48	69,89	98,50	1117,70	3,10	360,55	
A - 2	61,80	1,04	95,00	5,00	2,75	1268,00	1283,00	776,10	506,90	2,62	2,84	4,68	16,23	71,17	97,00	1100,68	2,80	393,10	
A - 3	61,30	1,00	95,00	5,00	2,75	1270,00	1293,00	782,00	511,00	2,62	2,84	5,30	16,77	68,42	99,50	1085,62	2,80	374,35	
Rata-Rata	61,73	1,03	95,00	5,00	2,75	1267,67	1286,00	777,63	508,37	2,62	2,84	4,98	16,49	69,83	98,33	1101,51	2,93	375,51	
A - 1	63,60	1,00	94,50	5,50	2,75	1270,00	1292,00	781,50	510,50	2,60	2,84	4,49	17,13	73,77	119,00	1298,39	3,30	393,45	
A - 2	62,90	1,00	94,50	5,50	2,75	1279,50	1289,00	775,00	514,00	2,60	2,84	4,43	17,08	74,04	117,00	1276,56	3,40	375,46	
A - 3	64,10	1,00	94,50	5,50	2,75	1271,00	1299,00	784,20	514,80	2,60	2,84	5,22	17,76	70,63	120,00	1309,30	3,30	396,76	
Rata-Rata	63,53	1,00	94,50	5,50	2,75	1273,50	1293,33	780,23	513,10	2,60	2,84	4,71	17,32	72,81	118,67	1294,75	3,33	388,42	
A - 1	65,30	0,96	94,00	6,00	2,61	1289,00	1301,00	778,00	523,00	2,59	2,84	4,68	18,33	74,49	110,00	1152,18	4,00	288,05	
A - 2	63,10	1,00	94,00	6,00	2,61	1279,00	1299,50	780,00	519,50	2,59	2,84	4,78	18,42	74,06	113,00	1232,92	3,80	324,45	
A - 3	63,80	1,00	94,00	6,00	2,61	1285,00	1308,00	791,30	516,70	2,59	2,84	3,81	17,59	78,32	112,00	1222,01	3,70	330,27	
Rata-Rata	64,07	0,99	94,00	6,00	2,61	1284,33	1302,83	783,10	519,73	2,59	2,84	4,42	18,12	75,62	111,67	1202,13	3,83	313,60	

BLANKO PENGUJIAN

No. Pengujian : 18

Jenis Material : Campuran Aspal Steel slag 80%

Jenis Pengujian : Pengujian Marshall

Lokasi Pengujian : Laboratorium Teknik Sipil Untirta

Tanggal Pengujian :

Tabel B.18 Pengujian Marshall Campuran Aspal Steel slag 80%

Kode Briket	Tinggi Benda Uji (cm)	Angka Korelasi Beban	Kadar Aspal		BJ Bulk Agregat	Berat Benda Uji (g)		Isi Benda Uji (cc)	BJ Campuran Maksimum (gram)	BJ Efektif Agregat (Gse)	Berat Isi (g/m³) (Gmb)	VIM (%)		VMA (%)	VFA (%)	Stabilitas		flow (mm)	Hasil Ragi Marshall
			Terhadap Berat Agregat (%)	Terhadap Berat Campuran (%)		Kering	SSD					m	n			Bacaan Pada Alat	Setelah Dibereski (kg)		
a	b	c	d	e	f	g	h	i	j = b - i	k	l				o	p	q	r	s
A - 1	60	1,04	95,00	5,00	2,80	1273,00	1284,00	780,00	504,00	2,67	2,89	5,23	16,89	69,05	70,07	109,00	12,56,85	2,85	433,98
A - 2	62,30	1,04	95,00	5,00	2,80	1285,50	1296,00	788,30	507,70	2,67	2,89	4,99	16,69	70,07	70,07	105,00	11,91,46	2,80	425,52
A - 3	61,50	1,04	95,00	5,00	2,80	1278,00	1289,00	782,30	506,70	2,67	2,89	5,36	17,01	68,48	68,48	106,00	12,02,81	2,90	414,76
Rata-Rata	61,27	1,04	95,00	5,00	2,80	1278,83	1289,67	783,53	506,13	2,67	2,89	5,19	16,86	69,20	69,20	106,67	12,10,37	2,85	434,69
A - 1	61,00	1,04	94,50	5,50	2,80	1282,00	1298,30	789,20	509,10	2,64	2,89	4,79	17,58	72,77	72,77	118,00	13,38,97	3,20	418,43
A - 2	61,50	1,04	94,50	5,50	2,80	1276,00	1288,20	781,20	507,00	2,64	2,89	4,84	17,62	72,54	72,54	119,00	13,50,32	3,00	450,11
A - 3	63,00	1,00	94,50	5,50	2,80	1283,00	1290,70	779,20	511,50	2,64	2,89	5,16	17,90	71,18	71,18	120,00	13,09,30	3,30	396,76
Rata-Rata	61,83	1,03	94,50	5,50	2,80	1280,33	1292,40	783,20	509,20	2,64	2,89	4,93	17,70	72,16	72,16	119,00	13,33,01	3,17	420,95
A - 1	62,80	1,00	94,00	6,00	2,61	1285,00	1293,00	779,30	513,70	2,62	2,89	4,70	18,56	74,69	74,69	115,00	12,54,74	3,85	325,91
A - 2	61,50	1,00	94,00	6,00	2,61	1288,00	1294,80	781,50	513,30	2,62	2,89	4,40	18,30	75,96	75,96	118,00	12,87,47	3,50	367,85
A - 3	63,20	1,00	94,00	6,00	2,61	1279,00	1293,60	779,50	514,10	2,62	2,89	5,21	19,00	72,55	72,55	116,00	12,65,65	3,60	351,57
Rata-Rata	62,50	1,00	94,00	6,00	2,61	1284,00	1293,80	780,10	513,70	2,62	2,89	4,77	18,62	74,40	74,40	116,33	12,69,29	3,65	347,75

LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan



Gambar C.1 Agregat Halus



Gambar C.2 Agregat Kasar



Gambar C.3 Alat Masak Campuran



Gambar C.4 Alat Penumbuk



Gambar C.5 Alat Uji Aspal



Gambar C.6 Alat Uji Marshall



Gambar C.7 Aspal



Gambar C.8 Pycnometer



Gambar C.9 *Quarry*



Gambar C.10 Sampel benda uji



Gambar C.11 *Sieve Shaker*



Gambar C.12 *Siever*



Gambar C.13 Termometer



Gambar C.14 Timbangan



Gambar C.15 *Waterbath*

ORIGINALITY REPORT

10%

SIMILARITY INDEX

10%

INTERNET SOURCES

6%

PUBLICATIONS

6%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repository.its.ac.id Internet Source	1 %
2	eprints.polsri.ac.id Internet Source	1 %
3	www.scribd.com Internet Source	1 %
4	repository.unej.ac.id Internet Source	1 %
5	iptek.its.ac.id Internet Source	1 %
6	Henny Prasetyo, Yosef Cahyo Setianto Poernomo, Agata Iwan Candra. "Studi Perencanaan Perkerasan Lentur Dan Rencana Anggaran Biaya (Pada Proyek Ruas Jalan Karangtalun – Kalidawir Kabupaten Tulungagung)", Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil, 2020 Publication	1 %
7	docplayer.info Internet Source	1 %

8	core.ac.uk	Internet Source	1 %
9	e-journal.uajy.ac.id	Internet Source	1 %
10	eprints.untirta.ac.id	Internet Source	1 %
11	eprints.uny.ac.id	Internet Source	1 %
12	ejurnal.untag-smd.ac.id	Internet Source	1 %

Exclude quotes Off

Exclude matches < 1%

Exclude bibliography Off