TESIS – RC 185401

PENGGUNAAN SLAG STEEL SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT ALAM PADA CAMPURAN ASPHALT CONRETE BINDER COURSE (AC-BC) PADA PERKERASAN LENTUR

MICHEL KASAF
03111850060013

Dosen Pembimbing
Dr. Catur Arif Prastyanto, ST., M.Eng

Program Magister
Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan Dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020

‘’Halaman ini sengaja dikosongkan’’

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh

MICHEL KASAF

NRP: 03111850060013

Tanggal Ujian : 29 Juni 2020

Periode Wisuda : September 2020

Disetujui oleh :

Pembimbing :

1. Dr. Catur Arif Prastyanto, S.T., M.Eng .....
   NIP: 19700708 199802 1 001

Penguji :

1. Ir. Hera Widyastuti, M.T., Ph.D .....
   NIP: 19600828 198701 2 001

2. Dr. Machsus, S.T., M.T. .....
   NIP: 19730914 200501 1 002

Kepala Departemen Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumian

Dr. techn. Umboro Lasminto, S.T. M.Sc
NIP: 19721202 199802 1 001

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

Tesis yang berjudul: "*Penggunaan Slag Steel Sebagai Pengganti Agregat Alam Pada Campuran Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) Pada Perkerasan Lentur*" ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tulis untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tulis yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulis orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah tesis maupun daftar pustaka.

Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiasi di dalam naskah **tesis** ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, Agustus 2020

Michel Kasaf

NRP: 03111850060013

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

PENGGUNAAN SLAG STEEL SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT ALAM PADA CAMPURAN ASPHALT CONRETE BINDER COURSE (AC-BC) PADA PERKERASAN LENTUR

Nama mahasiswa : Michel Kasaf
NRP : 03111850060013
Dosen Konsultasi : Dr. Catur Arif Prastyanto, ST., M.Eng.

ABSTRAK

Agregat merupakan komponen terbesar dalam kontruksi lapisan aspal beton. Bentuk dan tekstur agregat sangat mempengaruhi kekuatan dan mutu beton aspal. Permintaan penggunaan agregat alam untuk pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia terus mengalami peningkatan. Di sisi lain, ketersediaan agregat alam memiliki keterbatasan. Untuk itu, perlu dilakukan suatu upaya yang dapat menemukan alternatif dari penggunaan agregat alam salah satunya adalah pemanfaatan limbah pemurnian baja (*slag steel*). Limbah sisa pemurnian baja (*slag steel*) termasuk dalam limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun). Limbah dari industri pemurnian baja ini terus mengalami penumpukan dikarenakan tidak adanya pemanfaatan yang berkelanjutan, oleh karena itu pemanfaatan limbah slag dalam pembangunan jalan sangat diperlukan guna meminimalisir terjadinya penumpukan yang dapat berdampak buruk terhadap lingkungan.

Pada penelitian ini agregat slag steel digunakan sebagai pengganti agregat alam dengan persentase sebanyak 0%, 50%, 80% dan 100%. Pada tahapan awal dilakukan pengujian karakteristik agregat slag, pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah agregat yang digunakan memenuhi persyaratan sebagai bahan campuran aspal. Selanjutnya dilakukan pembuatan rancangan campuran dengan pengujian Marshall. Analisis karakteristik didapatkan dari pengujian Marshall berupa nilai kepadatan, *Void In Mix* (VIM), *Void in Mineral Aggregate* (VMA), *Void Filled with Asphalt* (VFA), Flow, Stabillitas dan *Marshall Quotient*. Studi ini mengacu kepada Spesifikasi Bina Marga 2018.

Hasil yang didapatkan penambahan 80% agregat slag dalam campuran menghasilkan stabilitas tertinggi yaitu sebesar 2320,19 Kg, dan stabilitas terendah terdapat pada variasi 100% agregat alam yaitu sebesar 1245,21 Kg. Stabilitas yang dihasilkan masih memenuhi nilai batas minimum spesifikasi Bina Marga 2018 yaitu sebesar 800 Kg. Sementara untuk nilai durabilitas dengan penambahan agregat slag steel kedalam campuran meghasilkan nilai yang lebih baik, durabilitas tertinggi terdapat pada variasi 50% slag steel yaitu sebesar 93,84% sedangkan durabilitas terendah terdapat pada variasi 100% agregat alam yaitu sebesar 90,54%. Nilai durabilitas setiap campuran telah memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 yaitu ≥90%.

Kata kunci: slag steel, marshall, stabilitas, durabilitas

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

USE OF SLAG STEEL AS A REPLACEMENT OF NATURAL AGGREGATE IN MIXTURE OF ASPHALT CONCRETE BINDER COURSE (AC-BC) ON FLEXIBLE PAVEMENT

By : Michel Kasaf
Student Identity Number : 03111850060013
Supervisor : Dr. Catur Arif Prastyanto, ST., M.Eng.

ABSTRACT

Aggregates are the largest component in the construction of the asphalt concrete layer. The shape and texture of the aggregate greatly affect the strength and quality of the asphalt concrete. Demand for the use of natural aggregates for road infrastructure development in Indonesia continues to increase. On the other hand, the availability of natural aggregates has limitations. For that, it is necessary to make an effort that can find alternatives to the use of natural aggregates, one of which is the use of steel refining waste (slag steel). Waste from steel refining (slag steel) is included in B3 waste (Hazardous and Toxic Materials). Waste from the steel refining industry continues to accumulate due to the absence of sustainable use, therefore the use of slag waste in road construction is needed to minimize the buildup that can adversely affect the environment.

In this study slag steel aggregates were used as substitutes for natural aggregates with a percentage of 0%, 50%, 80% and 100%. In the initial stages of testing the characteristics of slag aggregate, this test aims to determine whether the aggregate used meets the requirements as an asphalt mixture. Furthermore, making a mixture design with Marshall testing. Characteristic analysis was obtained from Marshall testing in the form of density values, Void In Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), Void Filled with Asphalt (VFA), Flow, Stability and Marshall Quotient. This study refers to 2018 Bina Marga Specifications.

The results obtained by adding 80% aggregate slag in the mixture produced the highest stability in the amount of 2320.19 kg, and the lowest stability was found in variations of 100% natural aggregate in the amount of 1245.21 kg. The resulting stability still meets the 2018 Bina Marga specification minimum limit of 800 kg. While the value of durability with the addition of slag steel aggregates into the mixture results in a better value, the highest durability is found in 50% slag steel variations that is equal to 93.84% while the lowest durability is found in variations of 100% natural aggregate that is equal to 90.54%. The durability value of each mixture meets the 2018 Bina Marga requirements of ≥90%.

Keywords: steel slag, marshall, stability, durability

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala karunia dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "*Penggunaan Slag Steel Sebagai Pengganti Agregat Alam Pada Campuran Asphalt Concrete - Binder Course (AC-BC) Pada Perkerasan Lentur*". Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan kuliah Program Magister, Bidang Keahlian Manajemen Rekayasa Transportasi, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penyusunan proposal tesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Terima kasih untuk kedua orang tua Bapak Wahyuddin Pelis, S.sos., M.AP dan ibu tercinta Hj.Siti Khadijah yang telah banyak memberikan doa, dukungan, semangat dan motivasi kepada penulis sehingga penulis bisa sampai pada tahap ini.
2. Terima kasih untuk abangda Khalfi Wahyudi, S,Sos., M.AP, abangda Dedi Akbar S.Sos dan adikku tersayang Ulfa Rahayu S.Farm yang telah banyak memberikan doa, dukungan, semangat dan motivasi kepada penulis.
3. Terima kasih untuk Bapak Dr. Catur Arif Prastyanto, S.T., M.Eng selaku dosen pembimbing, yang telah banyak memberikan waktu, arahan dan masukan kepada penulis.
4. Terima kasih untuk Ibu Ir. Hera Widyastuti, M.T., Ph.D selaku dosen penguji
5. Terima kasih untuk Bapak Dr. Machsus, S.T., M.T selaku dosen penguji
6. Seluruh dosen pengajar program Magister bidang keahlian Manajemen Rekayasa Transportasi, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumian, ITS.
7. Seluruh teknisi Laboratorium Perhubungan dan Bahan Kontruksi Jalan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumian, ITS. Yang telah membantu penulis dalam penelitian.

8. Teman-teman Manajemen Rekayasa Transportasi angkatan 2018, yang telah memberi bantuan, dukungan dan semangat dalam penyelesaian tesis ini.
9. Semua pihak yang telah membantu yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyadari bahwa dalam Tesis ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca sangat penulis harapkan, akhir kata semoga Tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS i

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS iii

ABSTRAK v

ABSTRACT vii

KATA PENGANTAR ix

DAFTAR ISI xi

DAFTAR TABEL xv

DAFTAR GAMBAR xvii

BAB 1 1

PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 4

1.3 Tujuan Penelitian 5

1.4 Batasan Masalah 5

1.5 Manfaat Penelitian 5

BAB II 7

KAJIAN PUSTAKA 7

2.1 Perkerasan Jalan 7

2.2 Perkembangan Riset di Bidang Perkerasan Lentur 9

2.3 Bahan Campuran Aspal 9

2.3.1 Agregat 9

2.3.2 Agregat Kasar 11

2.3.3 Agregat Halus 12

2.3.4 Filler 12
2.3.5 Aspal 13
2.4 Perencanaan Campuran Aspal 14
2.4.1 Gradasi Agregat 14
2.5 Slag Steel 16
2.6 Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC) 17
2.7 Rancangan Campuran Aspal 18
2.7.1 Pengujian Marshall 18
2.8 Penelitian Terdahulu 21
2.9 Penelitian Terdahulu dalam Pemanfaatan Slag Baja 24
2.10 Posisi Peneliti dalam pemanfaatan limbah slag baja 24
BAB III 27
METODOLOGI PENELITIAN 27
3.1 Material yang Digunakan 27
3.2 Peralatan yang Digunakan 27
3.3 Prosedur Penelitian 27
3.3.1 Pemeriksaan sifat-sifat fisis agregat 27
3.3.2 Pemeriksaan Filler 31
3.3.3 Pemeriksaan Aspal 32
3.3.4 Perencanaan Campuran Aspal Beton 35
3.3.5 Pembuatan Campuran Beton Aspal 37
3.3.6 Pengujian Campuran Beton Aspal 39
3.4 Tahapan Penelitian 44
BAB IV 45
HASIL DAN PEMBAHASAN 45
4.1 Pemeriksaan Bahan 45

4.1.1 Pemeriksaan Bahan Agregat 45
4.1.2 Pemeriksaan Aspal 48
4.2 Perencanaan Campuran Apal Beton 50
4.3 Penentuan Komposisi Aspal Terhadap Campuran 51
4.4 Pengujian Campuran Aspal 54
4.4.1 Pengujian Campuran Metode Marshall 54
4.4.2 Penentuan Kadar Aspal Optimum dengan Metode *Marshall* 76
4.4.3 Pengujian Perendaman Marshall (KAO) 84
4.4.5 Pengujian Perendaman *Marshall* 24 jam (Durabilitas) 89
4.5 Diskusi 91
BAB V 95
KESIMPULAN DAN SARAN 95
5.1 Kesimpulan 95
5.2 Saran 96
DAFTAR PUSTAKA 97

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku 8
Tabel 2.2 Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Beraspal.....16
Tabel 2.3 Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC) 16
Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu Penggunaan Agregat Slag 22
Tabel 2.5 Peneltian Terkini Komposisi Slag Baja.....25
Tabel 3.1 Spesifikasi Agregat Kasar 31
Tabel 3.2 Spesifikasi Agregat Halus 31
Tabel 3.3 Spesifikasi Aspal Keras Penetrasi 60/70 35
Tabel 3.4 Gradasi agregat yang digunakan 36
Tabel 3.5 Kadar aspal tengah yang digunakan dalam penelitian 37
Tabel 3.6 Kebutuhan benda uji perendaman 40
Tabel 3.7 Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Benda Uji. 41
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Alam 46
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Slag..... 46
Tabel 4.3 Hasil pengujian Karakteristik Aspal..... 48
Tabel 4.4 Gradasi Proporsi Agregat 50
Tabel 4.5 Kadar Aspal dan Kebutuhan Agregat 100% Agregat Alam..... 52
Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat variasi 50% Agregat Alam : 50% Agregat Slag 53
Tabel 4.7 Kebutuhan Agregat variasi 20% Agregat Alam : 80% Agregat Slag 53
Tabel 4.8 Kadar Aspal dan Kebutuhan Agregat 100% Agregat Slag 54
Tabel 4.9 Data Hasil Pengujian *Marshall* (100% Agregat Alam)..... 56
Tabel 4.10 Data Hasil Pengujian *Marshall* (50% Agregat Alam, 50% Slag) 56
Tabel 4.11 Data Hasil Pengujian *Marshall* (20% Agregat Alam, 80% slag)..... 57
Tabel 4.12 Data Hasil Pengujian *Marshall* (100% Agregat Slag) 57
Tabel 4.13 Nilai Karakteristik *Marshall* 100% Agregat Alam. 61
Tabel 4.14 Nilai Karakteristik *Marshall* (50% Alam : 50% Slag) 62
Tabel 4.15 Nilai Karakteristik *Marshall* (20% Alam : 80% Slag) 62
Tabel 4.16 Nilai Karakteristik *Marshall* 100% Agregat Slag. 63
Tabel 4.17 Rekapitulasi Marshall Perendaman 30 menit (100% Agregat Alam) 84

Tabel 4.18 Rekapitulasi Marshall Perendaman 30 menit (50% Agregat Slag) .. 85
Tabel 4.19 Rekapitulasi Marshall Perendaman 30 menit (80% Agregat Slag) .. 85
Tabel 4. 20 Data Hasil Perhitungan Nilai Durabilitas 90

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Lapisan kontruksi perkerasan lentur (Sukirman, 2003). 8
Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian 44
Gambar 4.1 Grafik Kepadatan (*Density*)..... 64
Gambar 4.2 Grafik Rongga dalam Campuran (VIM) 66
Gambar 4.3 Grafik Rongga dalam mineral agregat (VMA) 68
Gambar 4.4 Grafik rongga terisi aspal (VFA)..... 70
Gambar 4.5 Grafik Stabilitas pada setiap campuran 72
Gambar 4.6 Grafik Kelelehan (*Flow*) pada setiap campuran..... 74
Gambar 4.7 Grafik *Marshall Quotient* (MQ)..... 76
Gambar 4.8 Grafik Parameter Marshall 100% Agregat Alam 77
Gambar 4.9 Penentuan Kadar Aspal Optimum 100% Agregat Alam..... 78
Gambar 4.10 Grafik Parameter Marshall 50% Slag : 50% Agregat Alam..... 79
Gambar 4.11 Penentuan Kadar Aspal Optimum 50% Agregat Slag..... 80
Gambar 4.12 Grafik Parameter Marshall 80% Slag : 20% Agregat Alam..... 81
Gambar 4.13 Penentuan Kadar Aspal Optimum 80% Agregat Slag..... 82
Gambar 4.14 Grafik Parameter Marshall 100% Slag Steel..... 83
Gambar 4.15 Penentuan Kadar Aspal Optimum 100% Agregat Slag..... 84
Gambar 4.16 Pengaruh Slag Steel Terhadap Karakteristik Marshall..... 86
Gambar 4. 17 Perbandingan Nilai Durabilitas (%) 90

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lapisan aspal beton merupakan lapisan aspal bergradasi menerus yang umum digunakan untuk jalan dengan beban lalu lintas yang berat. Berdasarkan fungsinya, Laston terdiri dari tiga macam campuran, yaitu diantaranya Lapisan pengikat *Aspal Concrete Binder Course* (AC-BC) merupakan lapisan perkerasan yang terletak dibawah lapisan aus (*wearing course*) dan di atas lapisan pondasi (*base course*). Lapisan ini tidak berhubungan langsung dengan cuaca, tetapi harus mempunyai ketebalan dan kekauan yang cukup untuk mengurangi tegangan/regangan akibat beban lalu lintas (Sukirman, 2003).

Kualitas konstruksi perkerasan jalan yang baik sangat dipengaruhi oleh komposisi material yang digunakan, meliputi jenis agregat, daya dukung tanah, serta aspal. Komponen terbesar dalam kontruksi lapisan aspal beton yaitu agregat, Bentuk dan tekstur agregat sangat mempengaruhi kekuatan beton aspal. dalam klasifikasi pengolahannya agregat terbagi menjadi dua yaitu agregat alam dan agregat buatan. Agregat alam adalah agregat yang dihasilkan dari eksplorasi batu yang ada di alam, sedangkan agregat buatan adalah agregat yang didapat dari proses fisika atau kimia dari suatu material sehingga sifatnya menyerupai agregat.

Permintaan penggunaan agregat alam untuk pembangunan infrastruktur jalan di Indonesia terus mengalami peningkatan. Di sisi lain, ketersediaan agregat alam memiliki keterbatasan. Penggunaan agregat alam secara terus menerus ini pula akan merusak kondisi lingkungan. Peningkatan jalan dengan cara penambahan lapis tambahan yang terus menerus akan menyebabkan tebal lapis perkerasan semakin tebal dan bahan yang diperlukan semakin sedikit (Balitbang, 2012). Untuk itu, perlu dilakukan suatu upaya yang dapat menemukan alternatif dari penggunaan agregat alam, salah satunya adalah pemanfaatan limbah sisa pemurnian baja (*slag steel*).

Slag Steel adalah batuan kasar berbentuk kubikal tidak teratur yang dihasilkan dari pemurnian industri baja, slag steel termasuk dalam limbah Bahan

Berbahaya dan Beracun (B3) sesuai Peraturan Pemerintah No 85/1999. Indonesia setiap tahunnya menghasilkan limbah dari industri pemurnian baja dengan jumlah yang besar dan limbah yang dihasilkan dibuang di tempat penampungan tanpa digunakan dan mengakibatkan terjadinya penumpukan. Karena slag steel mengandung komposisi kimia, tentu hal ini menyebabkan pencemaran dan kerusakan lingkungan. Menurut Indonesia Iron and Steel Industry Association (IISIA) pada tahun 2019 Indonesia menghasilkan Limbah Slag dari Industri pemurnian baja sebanyak 940 ribu ton. Oleh karena itu penanganan terhadap limbah ini harus segera dilakukan, salah satu metode untuk mendaur ulang limbah ini dan melestarikan sumber agregat alam dengan mempertimbangkan konsep pembangunan berkelanjutan adalah dengan menggunakan nya dalam pembangunan kontruksi jalan (Peraturan Pemerintah No 101 tahun 2014).

Menurut Behnood dan Ameri (2012) campuran aspal dengan menggunakan slag steel menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan yang menggunakan agregat alami, dimana slag yang digunakan sebagai agregat kasar dalam campuran *Split Mastic Asphalt* (SMA) dapat meningkat nilai Stabilitas Marshall. Batuan *Slag steel* berbentuk granular berongga jika terisi oleh filler dan aspal, akan bereaksi secara kimia maupun secara fisik sehingga ikatan antar batuan steel slag akan lebih kuat, jika dipadatkan tahan terhadap pergeseran bila ditekan dengan tekanan berat. Selain itu batuan steel slag mempunyai bentuk kasar dan berlubang-lubang (porous) akan memberikan ikatan yang lebih baik (Anshari, 1998). Jika dilihat dari potensinya, slag baja merupakan suatau bahan alternatif yang memiliki tingkat kestabilan yang tinggi, tahan terhadap reaksi kimia dan tahan terhadap perubahan suhu yang ekstrim (Djakfar dkk, 2013). Penambahan persentase slag dalam campuran aspal memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap pengaruh udara dan kelembapan (Bethary dkk, 2019). Slag steel memiliki sejumlah keunggulan dengan sifat teknik tinggi dan secara ekonomis, Slag steel mungkin lebih murah jika digunakan di jalan-jalan perkotaan tetapi akan lebih mahal untuk jalan-jalan pedesaan karena biaya transportasi (Zulfiqar dkk, 2015). Selain dari pemilihan jenis material, pemilihan gradasi juga sangat mempengaruhi kualitas campuran aspal.

Gradasi agregat merupakan salah satu bagian penting dalam campuran beraspal. Sifat-sifat campuran seperti stabilitas, kekakuan, kemudahan kerja, permeabilitas, keawetan, ketahanan terhadap kelelahan, tahanan gelincir, dan ketahanan terhadap air sangat dipengaruhi oleh gradasi agregat (Setiawan dkk, 2017). Gradasi agregat berfungsi memberikan kekuatan yang pada akhirnya mempengaruhi stabilitas dalam campuran, dengan kondisi saling mengunci (interlocking) dari masing-masing partikel agregat kasar (Sumiati & Sukarman, 2014). Gradasi menentukan kriteria design seperti apa yang ingin kita capai.

Untuk mengetahui karakteristik campuran aspal yang digunakan, maka akan dilakukan pengujian marshall dan durabilitas. Durabilitas adalah ketahanan (durability) perkerasan akibat pengaruh cuaca dan air. Untuk mendapatkan durabilitas yang baik biasanya dibutuhkan kadar aspal yang tinggi. Walaupun dengan menggunakan kadar aspal yang tinggi tetapi bila jalan tersebut selalu terendam oleh air maka lambat laun jalan akan cepat mengalami kerusakan (getas) sebelum mencapai batas umur rencana (Tahir & Setiawan, 2009). Untuk itu perlu dilakukan pengujian durabilitas pada penelitian ini agar diketahui ketahanan terhadap air dari penggunaan agregat buatan dalam campuran aspal. Oleh karena itu perencanaan campuran aspal yang digunakan harus mampu memberikan kekuatan, tahan terhadap air, serta awet dan bertahan sampai umur rencana.

Pada penelitian sebelumnya, Ibrahim M (2007) menggantikan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% agregat kasar bercampur dengan slag baja dan menemukan bahwa mengganti hingga 75% agregat kasar dengan slag baja meningkatkan umur kelelahan aspal campuran. Rahmawati (2018) melakukan penelitian perbandingan agregat 1/2 dan 3/8 dengan komposisi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukan Penambahan agregat slag ukuran 3/8 dengan persentase 100% menghasilkan nilai stabilitas tertinggi yaitu sebesar 2085 Kg. Bethary *at al* (2019) menggunakan agregat slag sebagai pengganti agregat kasar dan halus dengan komposisi 10%, 20%, 30% menunjukan Peningkatan Slag steel dalam campuran mempengaruhi nilai volumetrik VIM, VMA, VFA, MQ dan Stabilitas. stabilitas marshall cenderung meningkat pada tingkat agregat 20% sebesar 1585,02 Kg.

Berdasarkan uraian diatas, akan dilakukan penelitian bagaimana pemanfaatan *slag steel* sebagai bahan pengganti agregat alam terhadap karakteristik lapisan perkerasan lentur pada lapisan AC-BC (*Aspalt Concrete Binder Course*). Dengan variasi campuran agregat slag steel sebanyak 0%, 50%, 80% dan 100%. Dalam penelitian ini agregat buatan slag steel digunakan pada agregat kasar dan halus, dengan tambahan agregat alam (*Virgin Material*).

Pada penelitian sebelumnya, penggunaan agregat slag steel dalam campuran aspal sebanyak 10%, 20% dan 30%. Hasil yang diperoleh penambahan 30% agregat slag masih memenuhi persyaratan (Bethary dkk, 2019). Hasil analisa ini memberikan pemanfaatan slag steel masih sedikit dalam campuran, sehingga perlu dikembangkan dengan penggunaan agregat slag steel yang lebih banyak lagi untuk mengurangi penggunaan agregat alam yang secara masif. Untuk itu, Pada penelitian ini dilakukan penambahan penggunaan agregat slag steel dalam campuran agregat kasar dan halus.

Agregat slag digunakan sebagai bahan campuran agregat alam pada perkerasan lentur dengan parameter Marshall. Gradasi yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu mengacu kepada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Penelitian ini diharapkan mampu memberi alternative penggunaan agregat alam dalam campuran aspal untuk perkerasan lentur serta menjadi inovasi terhadap pengolahan limbah baja (slag steel).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan sebagaimana berikut:

1. Bagaimana propertis material slag steel sebagai bahan campuran AC-BC terhadap Spesifikasi Bina Marga 2018?
2. Berapa nilai kadar aspal optimum (KAO) pada setiap variasi campuran?
3. Berapa nilai marshall yang dihasilkan pada setiap variasi campuran?
4. Berapa nilai durabilitas campuran aspal dengan penggunaan agregat buatan *slag steel*?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan perumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui propertis material slag steel sebagai bahan campuran AC-BC terhadap Spesifikasi Bina Marga 2018.
2. Mengetahui nilai kadar aspal optimum (KAO) pada setiap variasi campuran.
3. Mengetahui nilai karakterisitik marshall yang dihasilkan pada setiap variasi campuran.
4. Mengetahui nilai durabilitas campuran aspal dengan penggunaan agregat buatan slag steel.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan pembahasan, maka pada penelitian ini diberikan batasan batasan masalah sebagai berikut:

1. Aspal menggunakan penetrasi 60/70.
2. Gradasi yang akan digunakan yaitu gradasi yang sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.
3. Agregat buatan digunakan pada agregat kasar dan halus.
4. Penelitian ini hanya sebatas penerapan di laboartorium.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Mendapatkan pemahaman mengenai pengaruh penggunaan agregat buatan slag steel dalam campuran aspal.
2. Dapat dijadikan sebagai acuan untuk penelitian berikutnya.
3. Memberikan alternatif dalam pemanfaatan limbah baja (slag steel) untuk digunakan dalam perkerasan lentur.

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

BAB II
KAJIAN PUSTAKA

Bab ini menyajikan refrensi yang mendukung permasalahan dalam penelitian ini. Teori–teori tersebut dikutip dari hasil penelitian terdahulu dan pendapat para ahli serta dari referensi yang ada.

2.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan adalah campuran antara agregat dan bahan ikat yang digunakan untuk melayani beban lalu lintas. Agregat yang dipakai antara lain batu pecah, batu kali, dan hasil samping peleburan baja. Bahan ikat yang dipakai antara lain adalah aspal, semen, dan tanah liat (Sukirman, 1992).

Berdasarkan pengikatnya, konstruksi perkerasan jalan dapat dibedakan sebagai berikut:

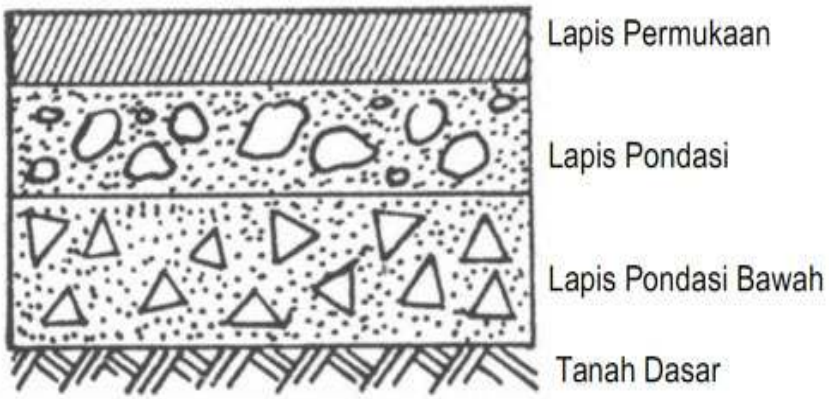
1. Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar.
2. Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan semen (*portland cement*) sebagai bahan pengikat. Plat beton dengan atau tanpa tulangan diletakkan diatas tanah dasar dengan atau tanpa lapis pondasi bawah. Beban lalu lintas sebagian besar dipikul oleh plat beton.
3. Konstruksi perkerasan komposit (*composit pavement*), yaitu perkerasan kaku yang dikombinasikan dengan perkerasan lentur, dapat berupa perkerasan lentur diatas perkerasan kaku atau perkerasan kaku diatas perkerasan lentur (Sukirman, 1992).

Dalam pemilihan jenis perkerasan, untuk beban roda dengan kecepatan tinggi lebih sesuai dengan flexible pavement, sedangkan beban yang statis dengan kecepatan rendah lebih cocok dengan rigid pavement (Suryadharma dan Susanto, 1999).

Tabel 2.1 Perbedaan antara perkerasan lentur dan perkerasan kaku (Sukirman, 1992).

No	Keterangan	Perkerasan Lentur	Perkerasan Kaku
1	Bahan Pengikat	Aspal	Semen
2	Repetisi Beban	Timbul Rutting (lendutan pada jalur roda)	Timbul retak-retak pada permukaan
3	Penurunan Tanah Dasar	Jalan Bergelombang (mengikuti tanah dasar)	Bersifat sebagai balok diatas perkerasaan
4	Perubahan Temperatur	Modulus Kekakuan berubah. Timbul tegangan dalam yang kecil	Modulus kekakuan tidak berubah . timbul tegangan dalam yang besar

Perkerasan di Indonesia pada umumnya menggunakan Perkerasan lentur. Konstruksi perkerasan lentur disebut "lentur" karena konstruksi ini mengizinkan terjadinya deformasi vertikal akibat beban lalu lintas yang terjadi. Perkerasan lentur biasanya terdiri dari 3 lapis material konstruksi jalan diatas tanah dasar, yaitu lapis pondasi bawah, lapis pondasi atas, dan lapis permukaan (Sukirman, 2003).



Gambar 2.1 Lapisan kontruksi perkerasan lentur (Sukirman, 2003).

2.2 Perkembangan Riset di Bidang Perkerasan Lentur

Penelitian di bidang perkerasan lentur terus mengalami inovasi terbaru. Para peneliti terus melakukan riset meliputi jenis material berupa agregat maupun aspal. Berikut adalah beberapa penelitian tentang perkerasan lentur:

1. Stienss *et al.* (2017) melakukan penelitian dengan judul '*Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures*', didalam penelitiannya penggunaan serat *aramid-polyalphaolefin* dijadikan sebagai bahan tambah pada campuran aspal, hasilnya menunjukan bahwa penggunaan serat dapat meningkatkan kinerja perkerasan lentur terhadap suhu rendah.
2. Fakhri *et al*. (2017) melakukan penelitian dengan judul '*Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber*', di dalam penelitiannya menyelidiki potensi penggunaan serbuk karet dan perkerasan aspal yang direklamasi kembali (RAP) dalam campuran aspal. Hasilya menunjukan bahwa nilai stabilitas Marshall, kerentanan kelembaban, retak kelelahan, dan tes deformasi permanen menunjukkan bahwa jumlah tinggi Sasobit tidak hanya dapat mengurangi suhu pencampuran dan pemadatan, tetapi juga menyediakan campuran aspal canggih yang dimodifikasi oleh serbuk karet, dan secara bersamaan dapat dianggap sebagai metode praktis melawan pemanasan global dan penumpukan bahan limbah seperti RAP dan ban akhir masa pakai.

2.3 Bahan Campuran Aspal

Agregat, aspal dan filler merupakan bahan dasar dari campuran beraspal. Kualitas campuran beraspal sangat ditentukan oleh mutu dari bahan tersebut.

2.3.1 Agregat

Agregat merupakan komponen utama dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90-95% agregat berdasarkan prosentase berat, atau 75-85% agregat berdasarkan prosentase volume. Dengan demikian, kualitas perkerasan jalan ditentukan juga dari sifat agregat dan hasil campuran agregat dengan material lain. Agregat adalah bahan pengisi atau yang dicampurkan dalam proses pembuatan aspal yang berasal

dari batu dan mempunyai peranan penting terhadap kualitas aspal maupun harganya (Sukirman, 2007).

Agregat dapat dibedakan atas agregat kasar, agregat halus, serta abu batu/mineral (*filler*). Agregat berdasarkan pengolahannya dibedakan atas:

- Agregat siap pakai, yaitu agregat yang dipergunakan sebagai material perkerasan jalan dengan bentuk dan ukuran sebagaimana diperoleh di lokasi asalnya atau dengan sedikit proses pengolahan, agregat ini terbentuk berdasarkan proses erosi dan degradasi. Agregat ini sering disebut agregat alam.
- Agregat yang perlu diolah terlebih dahulu sebelum dipakai, yaitu agregat yang diperoleh di bukit-bukit, di gunung-gunung, ataupun di sungai-sungai. Agregat di gunung dan di bukit umumnya ditemui dalam bentuk masif, sehingga perlu dilakukan pemecahan dahulu supaya dapat diangkat ke tempat mesin pemecah batu (*stone crusher*).
- Agregat buatan adalah agregat yang didapatkan dari proses kimia atau fisika dari beberapa material sehingga menghasilkan suatu material baru yang sifatnya menyerupai agregat. Beberapa jenis dari agregat ini merupakan hasil sampingan dari proses industri dan dari proses material yang sengaja diproses agar dapat digunakan sebagai agregat atau sebagai mineral pengisi (*filler).*

Jaya et al. (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh bentuk agregat terhadap volumetric campuran aspal, hasilnya Propertis volumetrik mengalami peningkatan ketika agregat berbentuk kubus digunakan dalam campuran, serta meningkatkan resilient dan stiffnes modulus. Tekstur permukaan perkerasan lentur sangat bergantung dari gradasi serta bentuk agregat yang digunakan. Agregat memberikan kontribusi besar terhadap ketahanan slip ban (Sengoz at al, 2014). Oleh karena itu bentuk agregat juga mempengaruhi skid-resistence pada perkerasan.

Agregat harus memiliki sifat yang mampu merekat terhadap aspal. Di bawah aksi putaran ban berkecepatan tinggi, uap air pada jalan menghasilkan tekanan, yang menyebabkan aspal mengalami pergeseran, sehingga menyebabkan

terjadinya lubang pada permukaan, raveling dan masalah lainnya. Salah satu penyebab utama gangguan ini adalah sifat perekat yang buruk antara aspal dan agregat. Oleh karena itu, pada saat desain perkerasan, metode yang tepat harus digunakan untuk mendeteksi sifat perekat antara agregat dan aspal (Cui, Xiao, Yan, Li, & Wu, 2018).

Cui et al (2018) melakukan penelitian tentang pengaruh karateristik bentuk dan tekstur agregat terhadap kinerja campuran aspal, untuk melihat perilaku morfologi agregat digunakan aggregate image measurement systems (AIMS). Dalam alat ini partikel morfologi dapat sepenuhnya terlihat yaitu kebulatan (shpericity), angularity, dan tekstur permukaan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan angularity dan sphericity dapat secara serius mempengaruhi ikatan antara aspal dan agregat, dan menentukan apakah kombinasi aspal dan agregat tahan lama, sehingga mempengaruhi umur layanan dan kinerja layanan perkerasan aspal. Ada hubungan linear antara angularity atau shpericity agregat dan rasio cakupan aspal. Semakin besar kekakuan, semakin kasar teksturnya, dan semakin kecil kebulatannya, semakin besar rasio cakupan aspal akan mengindikasikan properti adhesi yang lebih baik terhadap campuran aspal.

2.3.2 Agregat Kasar

Agregat kasar adalah agregat yang tertahan saringan No. 8 (2,36 mm) (Ashaplt Institue, 2001). Menurut SNI 1970-2008, agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm (No.4) sampai 40 mm (No. 1½ inci). Fungsi agregat kasar adalah memberikan stabilitas dan tahanan gesek campuran terhadap suatu aksi perpindahan. Stabilitas ditentukan oleh bentuk dan tekstur permukaan agregat kasar. Umumnya karakteristik morfologis agregat kasar dapat dilihat dari beberapa aspek yaitu bentuk, ukuran, angularity, dan tekstur permukaan (Guo, Zhao, Zhang, & Shang, 2016).

Dalam proses pemadatan campuran aspal, distribusi spasial dan efektivitas bidang kontak antara partikel agregat bergantung pada bentuk, angularity, dan tekstur permukaan agregat, terutama untuk agregat kasar (Wang, H *et al*, 2016). Temperatur yang tinggi mengakibatkan penurun modulus dalam ikatan campuran

aspal, sehingga diperlukan interlocking yang kuat pada agregat kasar, interlocking ini dipengaruhi dari sifat-sifat morphologi agregat. Ketidak-beraturan bentuk pada agregat kasar menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan dalam campuran, sehingga secara perlahan campuran akan mengalami microcracking dan mengalami perubahan struktur, akhirnya campuran mengalami penurunan kinerja secara menyeluruh (Tokyay dan Akcaoglu 2004).

2.3.3 Agregat Halus

Agregat halus adalah material yang lolos saringan no. 8 (2,36 mm) dan tertahan pada saringan no.200 (0,075 mm), harus terdiri dari pasir atau hasil penyaringan batu pecah. Fungsi agregat halus adalah dalam gap graded, agregat halus pada #8 sampai dengan #30 dikurangi agar diperoleh rongga udara yang memadai untuk jumlah aspal tertentu. Keseimbangan proporsi penggunaan agregat kasar dan halus penting agar diperoleh permukaan yang tidak licin dengan jumlah kadar aspal yang diinginkan. Agregat halus pada umumnya digunakan untuk mengisi rongga dan menstabilkan agregat kasar dalam struktur perkerasan, serta memiliki pengaruh potensial terhadap kinerja perkerasan (Lin & Tongjing, 2018).

Xie (2017) menyebutkan dalam peneletiannya yang berjudul 'Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt Pavement' Agregat terdiri dari partikel kasar (> 2 mm) dan partikel halus (<2 mm), yang keduanya memiliki pengaruh yang sangat berbeda terhadap campuran aspal. Pada struktur internal, agregat kasar umumnya bertanggung jawab atas interlocking agregat, sehingga membentuk struktur granular yang meningkatkan stabilitas campuran aspal. Untuk memastikan integritas campuran aspal, agregat halus ditambahkan ke kerangka agregat kasar dan memberikan efek penting pada ketahanan geser campuran.

2.3.4 Filler

Agregat sangat halus (filler) adalah agregat yang lebih kecil dari 75 μm atau lolos saringan No.200 dengan persentase berat yang lolos minimal 75%. Fungsi filler adalah sebagai pengisi pada pembuatan campuran aspal. Berdasarkan

spesifikasi Bina Marga tahun 2010, proporsi filler adalah antara 1% sampai 2% terhadap berat total campuran beraspal. Bahan pengisi yang ditambah terdiri atas debu batu kapur (limestone dust), semen Portland, abu terbang, abu tanur semen atau bahan non plastis lainnya dari sumber yang disetujui oleh direksi pekerjaan. Bahan tersebut harus bebas dari bahan yang tidak dikehendaki. Bahan pengisi yang ditambahkan harus kering dan bebas dari gumpalan-gumpalan, dan bila diuji dengan pengayakan sesuai dengan SNI 03-4142-1996 harus sesuai dengan persyaratan bahan pengisi untuk campuran beraspal (SNI 03-6723-2002), yaitu mengandung bahan yang lolos ayakan 0,279 mm (No. 50) minimum 95% dan lolos ayakan 0,075 mm (No. 200) minimum 70 % terhadap beratnya, serta mempunyai sifat non plastis.

2.3.5 Aspal

Aspal merupakan material yang berwarna hitam kecoklatan yang bersifat termoplastis, sehingga akan melunak dan mencair bila dipanaskan sampai temperatur tertentu. Aspal kembali membeku jika temperatur turun. Aspal tersusun terutama dari sebagian besar bitumen yang kesemuanya terdapat dalam bentuk padat atau setengah padat dari alam atau hasil pemurnian minyak bumi, atau merupakan campuran dari bahan bitumen dengan minyak bumi atau derivatnya (ASTM, 1994).

Bitumen (The Asphalt Institute, 1993) adalah suatu campuran dari senyawa hidrokarbon yang berasal dari alam atau dari suatu proses pemanasan, atau berasal dari kedua proses tersebut, kadang-kadang disertai dengan derivatnya yang bersifat non logam, yang dapat berbentuk gas, cairan, setengah padat atau padat, dan campuran tersebut dapat larut dalam Karbondisulfida (CS2). Aspal yang dipakai dalam konstruksi jalan mempunyai sifat fisis yang penting, antara lain: kepekatan (consistency), ketahanan lama atau ketahanan terhadap pelapukan oleh karena cuaca, derajat pengerasan, dan ketahanan terhadap air.

Sukirman (1999) menyatakan bahwa aspal yang digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan berfungsi sebagai:

- Bahan pengikat, memberikan ikatan yang kuat antara aspal dan agregat dan antara aspal itu sendiri.

- Bahan pengisi, mengisi rongga antar butir-butir dan pori-pori yang ada dari agregat itu sendiri.

Aspal dapat dibedakan berdasarkan nilai penetrasinya, yaitu:

- Aspal dengan penetrasi antara 40-50
- Aspal dengan penetrasi antara 60-70
- Aspal dengan penetrasi antara 80-100
- Aspal dengan penetrasi antara 120-150
- Aspal dengan penetrasi antara 200-300

Aspal dengan penetrasi rendah digunakan di daerah bercuaca panas atau lalu lintas dengan volume tinggi, sedang aspal semen dengan penetrasi tinggi digunakan untuk daerah yang bercuaca dingin ataupun lalu lintas dengan volume rendah. Di Indonesia pada umumnya digunakan aspal semen dengan penetrasi 60/70.

2.4 Perencanaan Campuran Aspal

Bukhari, dkk (2007:59) menyebutkan salah satu faktor yang menentukan mutu campuran aspal beton adalah perencanaan campuran. Perencanaan campuran terdiri atas: pemilihan tipe gradasi agregat dan jenis/kadar aspal. Perencanaan campuran beraspal bertujuan untuk mendapatkan campuran efektif dari gradasi agregat dan aspal. Campuran antara agregat dan aspal yang optimal akan menghasilkan lapisan perkerasan yang optimal pula. Roberts et al. (1996) menyebutkan salah satu tujuan mix design campuran beraspal adalah agar mencapai nilai ketahanan deformasi (stability) yang baik.

2.4.1 Gradasi Agregat

Gradasi agregat merupakan distribusi partikel-partikel agregat berdasarkan ukurannya yang saling mengisi dan membentuk suatu ikatan saling mengunci (interlocking) sehingga dapat mempengaruhi stabilitas perkerasan (Sukirman, 1999). Gradasi atau distribusi agregat dapat dikelompokkan ke dalam agregat bergradasi baik dan agregat bergradasi buruk. Agregat bergradasi baik (well graded) adalah agregat yang ukuran butirnya terdistribusi merata atau dengan kata lain mengandung porsi yang berimbang antara agregat kasar dan halus dalam campuran. Gradasi baik atau gradasi menerus atau gradasi rapat (dense graded)

akan menghasilkan lapisan perkerasan dengan stabilitas tinggi, kedap air dan berat volume yang besar.

Agregat bergradasi terbuka (open graded) adalah agregat yang distribusi ukuran butirnya sedemikian rupa sehingga pori-porinya tidak terisi dengan baik (Sukirman, 2003). Salah satu penggunaan agregat bergradasi terbuka adalah pada lapisan perkerasan aspal porus (porous asphalt).

Menurut (Australian Asphalt Pavement Association, 1997) Gradasi terbuka adalah campuran dengan konten kekosongan udara yang tinggi (lebih dari 20%) yang digunakan secara umum dalam lapisan tipis (biasanya 25 hingga 40 mm), walaupun memberikan peningkatan kecil dalam kekuatan perkerasan, open graded tidak cocok pada kondisi permukaan cacat atau dalam situasi kuat geser tinggi. Penggunaan utamanya di daerah perkotaan, terutama pada tipe jalan arteri. Open graded dapat mendukung penggunaan untuk meningkatkan skid resistance dalam keadaan basah, mengurangi kebisingan akbiat gesekan roda serta memberikan permukaan yang halus pada perkerasan. Agregat bergradasi senjang (gap graded) adalah agregat yang distribusi ukuran butirnya tidak menerus atau ada bagian ukuran yang tidak ada, jika ada sedikit sekali (Sukirman, 2003).

Satu set saringan umumnya terdiri dari saringan berukuran 4 inci,3 1/2 inci,3 inci,2 1/2 inci, 2 inci, 1 1/2 inci, 1 inci, 3/4 inci, 1/2 inci, 3/8 inci, No.4, No.8, No.16, No.30, No.50, No.100, No.200. Ukuran saringan dalam ukuran panjang menunjukan ukuran bukaan, sedangkan nomor saringan menunjukan ukuran bukaan dalam 1 inci panjang. Gradasi agregat diperoleh dari hasil analisis pemeriksaan dengan mempergunakan 1 set saringan. Saringan berukuran bukaan paling besar diletakkan teratas, dan yang paling halus (No.200) terbawah sebelum pan (Sukirman,2003).

Sesuai spesifikasi umum yang dikeluarkan oleh Kementrian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga tahun 2018, gradasi agregat untuk campuran aspal beton berbeda-beda sesuai dengan jenis perkerasan.nya. Gradasi ini terbagi menjadi gradasi halus dan kasar dengan persentase lolos saringan berbeda. Gradasi Agregat untuk campuran aspal selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.2:

Tabel 2.2 Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Beraspal

Ukuran Ayakan		% Berat Yang Lolos terhadap Total Agregat							
		Stone Matrix Asphalt (SMA)			Lataston (HRS)		Laston (AC)		
ASTM	**(mm)**	**Tipis**	**Halus**	**Kasar**	**Wc**	**Base**	**WC**	**BC**	**Base**
1 1/2	37,5								100
1	25			100				100	90-100
3/4	19		100	90-100	100	100	100	90-100	76-90
1/2	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	0,600	12-18			35-60	15-35	14-30	12-28	10-22
No.50	0,300	10-15					9-22	7-20	6-15
No.100	0,150						6-15	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: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

Selain itu, Spesifikasi Bina Marga 2018 juga memberikan persyaratan laston dalam lapis perkerasan yang dapat dilihat pada Tabel :

Tabel 2.3 Ketentuan Sifat-sifat Campuran Laston (AC)

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		Lapis Aus	Lapis Antara	Fondasi
Jumlah tumbukan per bidang		75		112 (3)
Rasio partikel lolos ayakan 0,075mm dengan kadar aspal efektif	Min.	0,6		
	Maks.	1,2		
Rongga dalam campuran (%) (4)	Min.	3,0		
	Maks.	5,0		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	15	14	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.	65	65	65
Stabilitas Marshall (kg)	Min.	800		1800 (3)
Pelelehan (mm)	Min.	2		3
	Maks	4		6 (3)
Stabilitas Marshall Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C (5)	Min.	90		
Rongga dalam campuran (%) pada Kepadatan membal (refusal) (6)	Min.	2		

Sumber: Spesifikasi Umum Bina Marga 2018

2.5 Slag Steel

Slag baja adalah batuan kasar berbentuk kubikal tidak teratur, yang terbentuk dari mineral-mineral yang digunakan sebagai pemurnian baja dari dapur

tinggi. Batuan slag baja mempunyai kekerasan yang tinggi dan permukaan yang kasar (Hartati, 2009). Slag baja memiliki permukaan dengan tekstur yang lebih kasar dibandingkan dengan agregat biasa. Karena porositas permukaan slag baja yang tinggi, sehingga aspal dapat diserap lebih banyak. slag baja mengandung alumunium oksida bersama-sama dengan unsur logam lainnya, yang dalam slag baja merupakan kontributor perlawanan abrasif tinggi. Unsur CaO dan SiO2 menyiratkan bahwa slag baja secara subtansial bersifat basa, dan hal ini tentu akan memberikan sifat adhesi slag baja di campuran beraspal (Kavussi et al, 2015).

Raposeiras et al. (2016) menyatakan bahwa rancangan campuran panas yang menggunakan material copperslag (cs) dengan kadar 25% memiliki nilai stabilitas yang hampir sebanding dengan nilai stabilitas campuran kontrol. Terdapat perbedaan sekitar 10% pada nilai MQ, tetapi kekuatan tarik tidak mengalami peningkatan yang signifikan, karena peningkatan yang terjadi hanya sekitar 8%. Sedangkan untuk campuran dengan 35% slag mengalami peningkatan nilai kinerja campuran tetapi juga mengalami penurunan nilai daktilitas. Penambahan slag steel dalam campuran menyebabkan peningkatan terhadap nilai kepadatan dan rongga didalam campuran akan lebih sedikit (Kavyashree et al, 2016). Menurut Gunawan (2011) Campuran beraspal bisa seluruhnya terdiri dari agregat slag (100%) dari agregat kasar sampai halus sehingga nilai kepadatan nya semakin tinggi. Tetapi, hal ini akan menjadi kendala dilapangan kerena dengan tonase yang sama volumenya akan menjadi lebih kecil.

2.6 Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC)

Berdasarkan fungsinya, Asphalt Concrete terdiri dari tiga macam campuran, yaitu Asphalt Concrete lapis aus (AC-WC), Asphalt Concrete lapis pengikat (AC-BC) dan Asphalt Concrete lapis pondasi (AC-Base).

Lapisan Aspal Concrete Binder Course (AC-BC) merupakan lapisan perkerasan yang terletak dibawah lapisan aus (*wearing course*) dan di atas lapisan pondasi (*base course*). Lapisan ini tidak berhubungan langsung dengan cuaca, tetapi harus mempunyai ketebalan dan kekauan yang cukup untuk mengurangi tegangan/regangan akibat beban lalu lintas yang akan diteruskan ke lapisan di

bawahnya yaitu *base* dan *sub grade* (tanah dasar). Karakteristik yang terpenting pada campuran ini adalah stabilitas.

2.7 Rancangan Campuran Aspal

salah satu faktor yang menentukan mutu campuran aspal beton adalah perencanaan campuran. Perencanaan campuran terdiri atas: pemilihan tipe gradasi agregat dan jenis/kadar aspal. Perencanaan campuran beraspal bertujuan untuk mendapatkan campuran efektif dari gradasi agregat dan aspal. Campuran antara agregat dan aspal yang optimal akan menghasilkan lapisan perkerasan yang optimal pula (Bukhari, 2007).

Di Indonesia terdapat dua metode rancangan campuran, yaitu metode Marshall yang dikembangkan oleh The Asphalt Institute dan metode CQCMU yang dikembangkan di Indonesia mengacu pada British Standard.

2.7.1 Pengujian Marshall

Ada beberapa metode untuk merencanakan suatu campuran yang baik, salah satunya adalah dengan uji Marshall. Menurut Sukirman (2003: 118) metode campuran yang paling banyak dipergunakan di Indonesia saat ini adalah metode rancangan campuran berdasarkan pengujian empiris, yaitu dengan menggunakan alat Marshall. Uji Marshall merupakan tahapan penting dalam penentuan karakteristik campuran beraspal. Karakteristik campuran beraspal yang merupakan parameter Marshall adalah kepadatan (density), rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam mineral agregat (VMA), rongga terisi aspal (VFA), stabilitas, kelelehan plastis (flow), Marshall Quotient dan durabilitas.

Perhitungan marshall dapat menggunakan rumus:

1. Kepadatan (*density*)

Kepadatan merupakan perbandingan antara berat kering benda uji dengan berat air pada volume yang sama. Kepadatan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$i = \frac{e}{(f-g)} \quad \text{.....} 2.1$$

Keterangan:

i = *density* (gr/cm^3);

e = berat kering (gr);

f = berat dalam kering keadaan jenuh permukaan (gr);

g = berat dalam air (gr);

(f - g) = volume bulk (cm^3).

2. Rongga dalam campuran (*void in mix*)

Rongga dalam campuran atau *void in mix* (VIM) adalah bagian ruang kosong dari seluruh campuran yang merupakan perbandingan volume ruang udara dengan volume sampel yang dipadatkan dan dinyatakan dalam persen. Sukirman (2003) menyatakan banyaknya pori yang berada dalam beton aspal padat adalah banyaknya pori diantara butir-butir agregat yang diselimuti aspal. Rongga dalam campuran dinyatakan dalam persen terhadap volume beton aspal padat, dapat dihitung dengan persamaan:

$$k = 100 - 100\left(\frac{Gmb}{Gmm}\right) \quad \text{..... 2.2}$$

Keterangan:

k = persen rongga (%);

Gmb/i = berat volume atau density (gr/cm^3);

Gmm = berat jenis teoritis.

$$Gmm = \frac{100}{\frac{\%\,Agregat}{Bj\,Agregat} + \frac{\%\,Aspal}{Bj\,Aspal} + \frac{\%\,Filler}{Bj\,Filler}} \quad \text{..... 2.3}$$

3. Rongga dalam mineral agregat (*void in mineral aggregate*)

Rongga didalam mineral agregat atau rongga antara butiran agregat adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat suatu campuran perkerasan yang telah dipadatkan, yaitu rongga udara dan volume kadar aspal efektif, yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total benda uji. Perhitungan nilai rongga antar butir agregat (VMA) terhadap campuran dihitung dengan persamaan:

$$l = 100 - \frac{Gmb\ x\ Kadar\ Agregat}{Gsb} \quad \text{..... 2.4}$$

Keterangan:

l = rongga di dalam mineral agregat (VMA);

Gsb = berat jenis efektif;

Gmb/i = berat volume benda uji (gr/cm^3).

4. Rongga terisi aspal (*void filled by asphalt*)

Rongga terisi aspal atau *void filled by asphalt* (VFA) adalah merupakan perbandingan antara rongga-rongga yang terisi aspal dengan volume benda uji. Sukirman (2003) menyebutkan persentase pori antara butir agregat yang terisi aspal dinamakan VFA. Jadi VFA adalah bagian dari VMA yang terisi oleh aspal, tidak termasuk aspal yang terabsorpsi oleh masing-masing butir agregat. Aspal yang mengisi pori-pori berfungsi untuk menyelimuti butir-butir agregat di dalam beton aspal padat, atau dengan kata lain VFA merupakan persentase volume beton aspal padat yang menjadi film atau selimut aspal. Besarnya nilai rongga terisi aspal dapat dihitung dengan persamaan:

$$VFA = \frac{100\ x\ (VMA - Va)}{VMA} \quad \text{..... 2.5}$$

Keterangan:

VFA = rongga terisi aspal, persen VMA;

VMA = rongga diantara mineral agregat, persen volume bulk;

Va atau VIM = rongga di dalam campuran, persen total campuran

5. Stabilitas (*stability*)

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur, ataupun *bleeding* (Sukirman, 2003). Nilai stabilitas diperoleh dari pembacaan dial stabilitas Marshall dan kemudian harus dikalikan dengan kalibrasi alat dan faktor koreksi benda uji. Besarnya nilai stabilitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$S = n \times f_a \times f_b \quad \text{..... 2.6}$$

Keterangan:

S = Stabilitas (kg);

n = pembacaan dial stabilitas;

f_a = faktor kalibrasi alat;

f_b = faktor koreksi benda uji.

6. Kelelehan plastis (*flow*)

Kelelehan plastis ialah keadaan perubahan bentuk suatu campuran aspal yang terjadi akibat suatu beban sampai batas runtuh. Nilai kelelehan plastis dapat langsung dibaca pada dial *flow* dan dinyatakan dalam satuan milimeter atau 0,1 *inchi*.

7. Marshall *quotient* (MQ)

Marshall *quotient* adalah perbandingan nilai stabilitas dan *flow*. Nilai stabilitas Marshall yang tinggi dan *flow* yang rendah menunjukkan campuran aspal beton yang kaku, sehingga bila menerima beban mudah retak. Besarnya nilai Marshall *quotient* dapat diperoleh dengan persamaan:

$$MQ = \frac{S}{flow} \quad \text{.....} \quad 2.7$$

Keterangan:

MQ = nilai Marshall quotient (kg/mm);

S = nilai stabilitas Marshall (kg);

Flow = pembacaan dial *flow* (mm).

8. Durabilitas

Durabilitas adalah ketahanan (durability) perkerasan akibat pengaruh cuaca dan air. Untuk mendapatkan durabilitas yang baik biasanya dibutuhkan kadar aspal yang tinggi.

2.8 Penelitian Terdahulu

Untuk mendukung penelitian tentang pengunaan agregat buatan dalam hal ini slag baja, berikut adalah beberapa referensi penelitian tentang agregat buatan:

Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu Penggunaan Agregat Slag

NO	PENULIS	TAHUN	JUDUL	VARIABEL	METODE	HASIL
1	Ahmed Ebrahim Abu El-Maaty Behir	2013	Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement	1. Komposisi campuran Steel slag dan batu kapur 2. Jenis lapisan perkerasan	1. Aggregate properties 2. Aggregates gradation 3. Effect of steel slage percentage	1. Kepadatan dan kekuatan terbaik pada lapisan perkerasan diperoleh pada campuran 70% slag dan 30% batu kapur 2. Menambahkan slag baja ke agregat batu kapur meningkatkan ketahanan terhadap defleksi dan regangan vertikal
2	1. Sajjad Masoudi 2. Sayyed Mahdi Abtahi 3. Ahmad Goli	2016	Evaluation of Electric arc Furnace Steel Slag Coarce Aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging	1. Bentuk dan tekstur agregat Slag 2. Komposisi agregat	1. Marshall Test 2. Indirect tensile strength Test 3. Modulus Test	1. Porositas pada Slag baja meningkatkan aspal pengikat optimal 0.45% 2. Campuran WMA yang mengandung Slag baja menunjukan Stabilitas Marshall jangka pendek dan jangka panjang yang lebih tinggi 3. Penggunaan Slag Baja Meningkatkan Indeks penuaan Campuran Aspal
3	1. Theresia MCA 2. Eka Susanti	2017	Pemanfaatan limbah slag baja sebagai pengganti batu pecah untuk perkerasan jalan	1. Karakteristik Agregat	1.Propertis Agregat 2. Kadar aspal optimum	1. hasil pengujian karakteristik material ini memenuhi standar dari Pd T-04-2005-B 2. Pemeriksaan keausan agregat kasar standar sebesar 24,98% dan kadar agregat slag sebesar 20,24% memenuhi persyaratan < 40% dan prosentase kadar aspal optimum sebesar 6%.

NO	PENULIS	TAHUN	JUDUL	VARIABEL	METODE	HASIL
4	1. Rindu Twidi Bethary 2. Bambang Sugeng S 3. Harmein Rahman	2018	Campuran Beraspal menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement dan Agregat Slag Baja	1. Komposisi Agregat 2. Bentuk dan tekstur RAP dan Slag baja 3. Gradasi Agregat	1. Universal Testing Machine (UTM) 2. Four Point Bending	1. Penggunaaan material RAP dan slag baja mencapai optimum pada kadar RAP (20-25)% dan kadar slag baja (25-35)%. Secara keseluruhan pada kondisi optimum terjadi peningkatan kinerja campuran beraspal dan ketahanan terhadap kelelahan. 2. Slag baja memiliki permukaan yang kasar, sehingga dapat mencegah potensi terjadinya retak yang disebabkan oleh gesekan internal campuran.
5	1. Anita Rahmawati	2018	Utilization of steel slag waste as Course aggregate 1/2 And 3/8 on Hot Rolled Sheet Wearing Course	Komposisi Campuran Agregat Slag baja	- Marshall Test	1. Semakin banyak kadar steel slag yang digunakan dalam campuran HRS dapat meningkatkan nilai kelelehan. 2. Semakin banyak kadar steel slag cenderung menaikan nilai VMA dikarenakan sifat steel slag yang berongga (porous).

2.9 Penelitian Terdahulu dalam Pemanfaatan Slag Baja

- Bethary dkk (2019) melakukan penelitian yang berjudul "*Aging effect condition on hot asphalt mixtures marshall (AC-BC) performance by using slag"* didalam penelitiannya menunjukan Peningkatan Slag steel dalam campuran mempengaruhi nilai volumetrik VIM, VMA, VFA, MQ dan Stabilitas. Stabilitas Marshall cenderung meningkat pada tingkat agregat 20% sebesar 1585,02 Kg.
- Devi (2017) melakukan penelitian yang berjudul "*Pengaruh penggunaan Penambahan Limbah Steel Slag Sebagai Pengganti Agregat Kasar NO.1/2 dan No.8 Terhadap Parameter Marshall*" Pada penelitian ini Steel Slag dipakai sebanyak 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dengan kadar aspal optimum (KAO) 6%. Hasil Penelitian ini menunjukan sudah memenuhi spesifikasi Marshall dengan hasil sebesar 2475,18 kg, 2279,345 kg, 2129,137 kg, 1707,024 kg, 1988,56 kg dan 1817,092 kg. Untuk nilai VIM, VFA, VMA, Flow, dan MQ menunjukkan besaran yang memenuhi spesifikasi.
- Anita Rahmawati (2018) melakukan penelitian yang berjudul "*Utilization of steel slag waste as Coarse aggregate 1/2 And 3/8 on Hot Rolled Sheet Wearing Course*". Hasil penelitiannya Menunjukan semakin banyak kadar slag yang digunakan dalam campuran pekerasan akan meneningkatkan nilai stabilitas, sehingga jalan lebih mampu memikul beban lalu lintas diatasnya. Direkomendasikan penambahan kadar steel slag sebesar 50% dapat meningkatkan kemampuan jalan dalam menerima beban diatasnya namun kontruksi masih flexible dan lentur.

2.10 Posisi Peneliti dalam pemanfaatan limbah slag baja

Penelitian ini dikembangkan dari penelitian sebelumnya, diharapkan penelitian ini dapat memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 dengan komposisi campuran 0%, 50%, 80% dan 100%. Pada penelitian sebelumnya penambahan slag steel digunakan pada dengan komposisi 10%, 20% dan 30% menunjukan stabilitas campuran terus mengalami peningkatan dan memenuhi ketetapan.

Sehingga pada penelitian ini akan dilakukan pengembangan dengan menggunakan campuran agregat slag steel pada seluruh ukuran saringan pada agregat kasar. Pada campuran 100% slag steel, agregat yang digunakan sepenuhnya menggunakan agregat slag tanpa campuran agregat alam. Berikut Ini beberapa penelitian terdahulu yang akan dilakukan pengembangan oleh peneliti dapat dilihat pada Tabel 2.4

Tabel 2.5 Peneltian Terkini Komposisi Slag Baja.

No	Referensi	Agregat Pengganti	Metode	Komposisi Slag
1	Michel Kasaf, 2020	Pengganti Agregat Kasar N0. 3/4, 1/2, 3/8, 4, 8 dan Agregat Halus No. 16, 30, 50, 100, 200, dan Filler	1. Pengujian Karakteristik agregat 2. Pengujian KAO 3. Marshall test 4. Durability test	0%,50%,80%,100%
2	Bethary dkk, 2019	Pengganti Agregat Kasar N0. 3/4, 1/2, 3/8, 4, 8 dan Agregat Halus No. 16, 30, 50, 100, 200	1. Pengujian Karakteristik agregat 2. Pengujian KAO 3. Marshall test 4. Test of Short- and Long-Term Aging /AASHTO R30	10%, 20%, 30%
3	Anita Rahmawati, 2018	Pengganti Agregar Kasar No 1/2 And 3/8	1. Pengujian karakteristik agregat 2. Pengujian KAO 3. Marshall test	0%,25%,50%,75%,100%
4	Sihtasari Devi, 2017	Pengganti Agregat Kasar No.1/2 dan No.8	1. Pengujian Karakteristik agregat 2. Pengujian KAO 3. Marshall test	0%,10%,20%,30%,40%,50%

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini akan disajikan proses dan tahapan-tahapan mulai dari persiapan bahan, pengujian sifat-sifat fisis bahan yang akan digunakan, analisis saringan agregat, pembuatan dan pengujian benda uji dan pada bagian akhir disajikan pengolahan dan analisis data.

3.1 Material yang Digunakan

Penelitian ini menggunakan material berupa aspal dan agregat. Aspal yang digunakan adalah aspal Pen. 60/70 produksi Pertamina. Agregat yang digunakan adalah agregat buatan slag baja dan dicampur dengan Agregat alam.

3.2 Peralatan yang Digunakan

Peralatan yang digunakan adalah peralatan untuk pemeriksaan sifat-sifat fisis aspal, pemeriksaan sifat-sifat fisis agregat, dan pengujian Marshall. Untuk pengujian Marshall, peralatan yang digunakan adalah peralatan Marshall yang terdiri dari Marshall test apparatus, mold pemadat beserta pelat dasarnya, flow meter, hammer pemadat, serta bak perendam yang dilengkapi dengan pengatur suhu.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terbagi atas beberapa tahap, yaitu pengujian sifat-sifat fisis agregat, pengujian sifat-sifat fisis aspal, perencanaan campuran beton aspal metode Marshall, pembuatan benda uji pengujian stabilitas dan flow dengan alat Marshall, dan perhitungan parameter Marshall lainnya dari benda uji.

3.3.1 Pemeriksaan sifat-sifat fisis agregat

Pengujian sifat-sifat fisis agregat meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan agregat, pelapukan, abrasi agregat dengan mesin Los Angeles, kelekatan agregat terhadap aspal, serta indeks kepipihan dan kelonjongan agregat. Adapun tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pemeriksaan sifat fisis agregat adalah sebagai berikut:

1. Berat jenis dan penyerapan agregat Kasar

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis (bulk specific gravity), berat jenis kering permukaan jenuh (saturated surface dry specific gravity), berat jenis semu (apparent specific gravity) dan penyerapan (absorpsition). Pemeriksaan ini berpedoman pada ketentuan SNI-1969-2008 untuk agregat kasar dan SNI 1970-2008 untuk agregat halus. Berikut ini adalah langkah kerja pengujian:

a. Benda uji yang digunakan adalah agregat yang lolos 19,0 mm dan tertahan saringan no.4 dan telah dicuci sehingga bersih kemudian dikeringkan dengan oven pada suhu 110˚C + 5˚C.
b. Agregat dikeluarkan dari oven dan didinginkan pada suhu ruang selama 1-3 jam, kemudian ditimbang berat kering (Bk).
c. kemudian agregat tersebut direndam selama 24 jam, selanjutnya agregat dimasukkan kedalam keranjang kawat dan direndam sambil digoncang-goncangkan batu-batunya tujuannya untuk mengeluarkan udara yang tersekap dan setelah itu ditimbang beratnya (Ba).
d. Agregat dikeluarkan dilap dengan kain sampai selaput air pada permukaan hilang sehingga agregat kering permukaan jenuh (SSD) dan ditimbang (Bj).

2. Berat jenis dan penyerapan agregat halus

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis (bulk specific gravity), berat jenis kering permukaan jenuh (saturated surface dry specific gravity), berat jenis semu (apparent specific gravity). Pemeriksaan ini berpedoman pada ketentuan SNI 1970-2008 untuk agregat halus. Berikut ini adalah langkah kerja pengujian:

a. Isi piknometer dengan air sebagian saja. Segera setelah itu masukkan ke dalam piknometer (500+10) gram agregat halus dalam kondisi jenuh kering permukaan yang telah dipersiapkan sebelumnya. Tambahkan kembali air sampai kira-kira 90 % kapasitas piknometer. Putar dan guncangkan piknometer dengan tangan untuk menghilangkan gelembung udara yang terdapat di dalam air.

b. Keluarkan agregat halus dari dalam piknometer, keringkan sampai berat tetap pada temperatur (110+5)°C, dinginkan pada temperatur ruang selama 1 jam dan timbang beratnya. Pada saat mengeringkan dan menimbang berat benda uji dari dalam piknometer, sisa dari contoh uji dalam kondisi jenuh kering permukaan boleh digunakan untuk menimbang berat kering ovennya. Benda uji ini harus diambil pada saat yang bersamaan dan selisih beratnya hanya 0,2 gram.

3. Keausan agregat (abrasion)

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk mengetahui ketahanan agregat terhadap keausan dengan menggunakan mesin Los Angeles. Pemeriksaan ini berpedoman pada ketentuan SNI 2417-2008. Berikut ini adalah tahapan-tahapan pengerjaan pemeriksaan keausan agregat.

a. Agregat disiapkan terlebih dahulu sebanyak 5000gram dengan ketentuan lolos saringan 19,0 mm dan tertahan di atas saringan 9,5 mm sebanyak 2500gram serta lolos saringan 9,5 mm dan tertahan di atas saringan 4,75 mm sebanyak 2500gram.
b. Agregat dibersihkan dan dikeringkan dalam oven sampai berat tetap pada suhu 110˚C, setelah agregat mempunyai berat tetap maka agregat dikeluarkan dari oven dan didiamkan pada suhu ruang.
c. Kemudian agregat ditimbang sebanyak 5000gram lalu dimasukkan ke dalam mesin Los Angeles berikut bola baja sebanyak 12 buah, kemudian alat dihidupkan dengan kecepatan 30 rpm dengan jumlah putaran 500 kali.
d. Selanjutnya agregat dikeluarkan dan kemudian disaring dengan saringan No. 12. setelah itu agregat dicuci sampai bersih untuk kemudian dioven sampai berat tetap. Setelah berat tetap agregat ditimbang.

4. Kelekatan terhadap aspal (affinity for asphalt)

Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan persentase luas permukaan aspal yang diselimuti agregat terhadap seluruh permukaan agregat. Benda uji pada pengujian kelekatan agregat terhadap aspal adalah agregat yang lolos saringan 12,5 mm (1/2”) dan tertahan saringan 9,5 mm (3/8”) sebanyak 100 gram. Agregat dicuci

dengan air suling dan dikeringkan beserta wadah pada suhu 140 °C hingga berat tetap.

5. Indeks kepipihan dan kelonjongan

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk mengetahui persentase jumlah butir pipih dan butir lonjong yang terdapat dalam suatu benda uji dibandingkan berat totalnya. Pemeriksaan ini dilakukan dengan berpedoman pada ketentuan AASHTO T-27-74. Peralatan yang digunakan adalah Elongation gauge dan Flakiness gauge, Untuk menentukan indeks kepipihan, agregat yang digunakan adalah agregat yang lolos saringan 19,0 mm dan tertahan saringan 16 mm sebanyak 300 gr. Agregat kemudian dimasukkan kedalam alat Elongation gauge satu persatu, agregat yang lolos dari ukuran alat tersebut lalu ditimbang.

6. Pemeriksaan tumbukan (impact)

Pemeriksaan ini dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan agregat melalui tumbukan dengan menggunakan alat impact. Agregat yang digunakan adalah agregat lolos saringan 12,5 mm dan tertahan saringan 9,5 mm sebanyak 1000gram untuk satu benda uji. Agregat tersebut dibersihkan dan dikeringkan dalam oven pada suhu 1100 C sampai mencapai berat tetap, kemudian di dinginkan pada suhu ruang. Setelah itu benda uji dimasukkan ke dalam mold tempat penumbukan dengan diameter 4” dan tinggi 3” dan permukaannya diratakan kemudian timbang beratnya. Penumbukan dilakukan sebanyak 15 kali dengan tinggi jatuh 15,15 inci (40 cm), kemudian benda uji ditimbang kembali dengan menggunakan saringan No. 8 (2,36 mm) dan agregat yang lolos ditimbang beratnya dengan air suling dan dikeringkan beserta wadah pada suhu 140 °C hingga berat tetap.

Persyaratan spesifikasi agregat kasar dan halus menurut Bina Marga ditunjukkan dalam Tabel 3.1 dan 3.2:

Tabel 3.1 Spesifikasi Agregat Kasar

Pengujian		Standart	
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium dan magnesium sulfat		SNI 3407:2008	Maks. 12%
Abrasi dengan mesin Los Angeles	Campuran AC bergradasi kasar	SNI 2417:2008	Maks. 30%
	Semua jenis campuran aspal bergradasi lainnya		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal		SNI 03-2439-1991	Min. 95%
Angularitas (Kedalaman dari permukaan < 10 cm)		DoT's Pennsylvania Test Method, PTM No. 621	95/90 [a]
Angularitas (Kedalaman dari permukaan ≥ 10 cm)			80/75 [a]
Partikel Pipih dan Lonjong		ASTMD4791 Perbandingan 1:5	Maks. 10%
Material lolos Ayakan No. 200		SNI 03-4142-1996	Maks. 1%

(Sumber: Spesifikasi Bina Marga)

Tabel 3.2 Spesifikasi Agregat Halus

Pengujian	Standar	Nilai
Nilai setara pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50% untuk SS, HRS dan AC bergradasi Halus Min. 70% untuk AC bergradasi Kasar
Material Lolos Ayakan No. 200	SNI 03-4428-1997	Maks. 8%
Kadar Lempung	SNI 3423:2008	Maks. 1%
Angularitas (kedalaman dari permukaan < 10 cm)	AASHTO TP-33 atau ASTM C1252-93	Min. 45
Angularitas (kedalaman dari permukaan ≥ 10 cm)		Min. 40

(Sumber: Spesifikasi Bina Marga)

3.3.2 Pemeriksaan Filler

Bahan pengisi harus bebas dari bahan yang tidak dikehendaki. Bahan pengisi yang ditambahakan harus kering dan bebas dari gumpalan-gumpalan. Pengujian bahan pengisi meliputi Analisa saringan atau pengujian jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan no. 200 (0,075 mm) yaitu banyaknya bahan yang lolos saringan tersebut sesudah agregat dicuci sampai air cucian menjadi jernih.

Tujuan metode ini adalah untuk memperoleh persentase jumlah bahan dalam agregat yang lolos saringan Nomor 200 (0,075 mm), sehingga berguna bagi

perencana dan pelaksana pembangunan jalan. Terdapat beberapa parameter pengujian dalam pemeriksaan filler, yaitu:

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus. (SNI 15-2351-1991)
2. Pengujian analisis saringan agregat halus. (SNI 03-1968-1990)

3.3.3 Pemeriksaan Aspal

Bahan aspal harus diesktraksi dari benda uji sesuai cara SNI 03-6894-2002. Setelah konsentrasi larutan aspal yang terekstraksi mencapai 200mm, partikel mineral yang terkandung harus dipindahkan ke dalam sentrifugal. Pemindahan ini dianggap memenuhi bilamana kadar abu dalam bahan aspal yang diperoleh kembali tidak melebihi 1 % (dengan pengapian). Bahan aspal harus diperoleh kembali dari larutan sesuai dengan prosedur SNI 034797-1988. Terdapat beberapa langkah pemeriksaan aspal, secara lebih detail dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengujian Peneterasi (SNI 06 – 2456 – 2011)

Pengujian penetrasi aspal, untuk menentukan penetrasi bitumen keras atau lembek. Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan penetrasi bitumen keras atau lembek (solid atau semi solid) dengan memasukkan jarum penetrasi ukuran tertentu, beban dan waktu tertentu ke dalam bitumen pada suhu tertentu. Adapun tahapan proses pengujian sebagai berikut:

a. Benda uji diletakkan didalam wadah air yang kecil dengan suhu yang telah ditentukan dan diamkan selama 1 sampai 1,5 jam.
b. Pemegang jarum diperiksa dan dipastikan dalam kondisi baik, kemudian jarum penetrasi dibersihkan dari kotoran yang menempel.
c. Pemberat 100gram diletakkan diatas jarum sehingga diperoleh beban sebesar (100 ± 0,1) gram
d. Tempatkan benda uji dibawah alat penetrasi, lalu jarum diturunkan perlahan-lahan hingga menyentuh permukaan benda uji.
e. Pemegang jarum dilepaskan dan *stopwatch* dijalankan serentak selama jangka waktu (5 ± 0,1 detik) gram.
f. Pengujian dilakukan tidak kurang dari 5 kali untuk benda uji yang sama dengan ketentuan setiap titik pemeriksaan berjarak dengan titik lainnya.

2. Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal (SNI-06-2433-2011)

Pengertian titik nyala adalah suhu dimana pada saat terlihat nyala singkat kurang dari 5 detik pada suatu titik di atas permukaan aspal. Tujuan pengujian adalah untuk mengetahui temperatur dimana aspal dapat dipanaskan dengan aman yaitu tanpa adanya bahaya peletupan atau kebakaran yang tiba-tiba akibat adanya nyala api terbuka dan untuk mengetahui sifat bahan terhadap bahaya api, pada suhu berapa bahan tersebut akan terbakar. Apabila aspal dipanaskan sampai melebihi titik bakarnya, maka aspal akan mudah terbakar sehingga dianjurkan tidak memanaskan aspal diatas titik nyala. Menurut SNI-06-2433-2011 persyaratan standar titik nyala untuk aspal 60/70 menit $\geq 232^0$ C. Berikut ini adalah tahapan-tahapan pengujian titik nyala dan titik bakar aspal:

a. Aspal dipanaskan antara $150^0 - 175^0$ sampai cukup cair
b. Kemudian aspal dituangkan kedalam cawan *clevelend* hingga mencapai garis dan gelembung udara yang ada pada permukaan hilang.
c. Menempatkan thermometer tegak lurus didalam benda uji dengan jarak 6,4mm diatas dasar cawan, dan diletakkan pada satu garis yang menghubungkan titik tengah cawan dan titik poros termometer terletak pada ¼ diameter cawan dari tepi.
d. Menyalakan sumber Pemanas dan aturlah pemanasan dengan kenaikan suhu menjadi (15 ± 1) ºC per menit sampai benda uji mencapai suhu 56ºC dibawah titik nyala perkiraan.
e. Mencatat setiap kenaikan suhu pada setiap waktu tertentu sampai mengalami titik nyala.

3. Pengujian kehilangan berat jenis aspal (SNI 06-2440-1991)

Pengujian ini dimaksudkan sebagai acuan dan penanganan dalam pelaksanaan pengujian kehilangan berat minyak dan aspal dengan cara pemanasan dan tebal tertentu. Tujuan pengujian ini adalah menentukan kehilangan berat minyak dan aspal, yang dinyatakan dengan persen dan berat semula.

4. Pengujian Daktilitas (ducktility test) (SNI-06-2432-2011)

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan elastisitas aspal. Tujuan dari tes ini adalah untuk mengetahui jarak terpanjang (elastisitas) aspal yang ditarik

antara dua cetakan yang berisi bitument keras sebelum putus pada suhu dan kecepatan tarik tertentu. Tahapan pengujian adalah sebagi berikut:

a. Memasukan benda uji yang telah dipanaskan kedalam bak perendam pada suhu 25^0C selama 85-95 menit.
b. Kemudian benda uji ditarik secara teratur dengan kecepatan 5cm/menit sampai benda uji putus.
c. Lalu membaca jarak antar pemegang cetakan pada saat benda uji putus dalam satuan cm. Selama pengujian berlangsung benda uji harus terendam dalam air sekurang-kurangnya 2,5cm.

5. Pengujian Berat Jenis Aspal (SNI 06-2441-2011)

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan berat jenis aspal dan korelasi perhitungan berat terhadap volume atau sebaliknya. Menurut SNI 06-2441-2011 persyaratan berat jenis untuk aspal pen 60/70 ≥1,0gram. Berikut ini merupakan tahapan pengujian untuk berat jenis aspal:

a. Menyiapkan aspal yang dibulatkan berjumlah 5 butir.
b. Ambil piknometer dan timbang berat piknometernya dalam keadaan kosong.
c. Mengisi piknometer dengan air kira-kira seleher piknometer lalu timbang beratnya. Setelah itu buang airnya lalu lap sampai kering.
d. Memasukkan bola berjumlah 5 butir kedalam piknometer dan menimbang beratnya.
e. Lalu masukkan air kedalam piknometer setinggi leher dari piknometer lalu menimbang beratnya.
f. Setelah semuanya selesai masukan sampel ke dalam oven dan diamkan selama 1x24 jam.
g. Menghitung nilai pengurangan berat aspal yang telah meleleh setelah di oven.

6. Pengujian Titik Lembek Aspal dan Ter (SNI 06-2434-20111)

Pemeriksaan ini dimaksudkan untuk menentukan titik lembek aspal dan ter yang berkisar antara 30^0C sampai 200^0C dengan menggunakan ring and ball. Yang dimaksud dengan titik lembek adalah suhu pada saat bola baja, dengan berat tertentu, mendesak turun suatu lapisan aspal atau ter yang tertahan dalam cicin

yang berukuran tertentu, sehingga aspal atau ter tersebut menyentuh plat dasar yang terletak pada cicin pada tinggi tertentu, sebagai akibat kecepatan pemanasan tertentu. Tahapan pengujian adalah sebagai berikut:

a. Menyiapkan aspal pen 60/70 yang telah dibulatkan sebanyak 2 butir.
b. Masukkan air ke dalam piknometer sebanyak 800 ml;
c. Masukkan aspal dengan bulatan kecil yang telah ditempatkan ditabung yang didalamnya terdapat plat kuning.
d. Lalu menghitung suhu setiap menitnya untuk mengetahui titik leleh pada suhu dan menit keberapa aspal mengalami kelelehan.

Persyaratan aspal penetrasi 60/70 yang digunakan untuk campuran aspal seperti pada Tabel 3.3:

Tabel 3.3 Spesifikasi Bina Marga 2018 Aspal Keras Penetrasi 60/70

No	Jenis Pengujian	Metoda Pengujian	Pen 60-70
1	Penetrasi pada 25°C (dmm)	SNI 2456:2011	60 - 70
2	Viskositas 135°C (cSt)	ASTM D2170-10	300
3	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48
4	Indeks Penetrasi	-	≥ -1,0
5	Duktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100
6	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥ 232
7	Kelarutan dalam Trichloroethylene	ASTM D5546	≥ 99
8	Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥ 1,0
9	Stabilitas Penyimpanan (°C)	ASTM D 5976-00	-

3.3.4 Perencanaan Campuran Aspal Beton

a. Pemilihan gradasi agregat

Setelah melakukan pengujian terhadap material yang akan digunakan, maka selanjutnya dilakukan penyiapan campuran agregat sesuai dengan persyaratan gradasi. Pada penelitian ini gradasi yang digunakan yaitu gradasi rapat. Gradasi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.4:

Tabel 3.4 Gradasi agregat yang digunakan

Ukuran Saringan		Gradasi Rapat				
		% Berat yang lolos			Tertahan pada masing-masing saringan	
Saringan	Ukuran (mm)	Spesifikasi bawah	Spesifikasi atas	Gradasi Uji	(%)	(gr)
1	25	100	100	100	0	0
3/4	19	90	100	95	5	60
1/2	12.5	75	90	82.5	12.5	150
3/8	9.5	66	82	74	8.5	102
No.4	4.75	46	64	55	19	228
No.8	2.36	30	49	39.5	15.5	186
No.16	1.18	18	38	28	11.5	138
No. 30	0.6	12	28	20	8	96
No.50	0.3	7	20	13.5	6.5	78
No.100	0.15	5	13	9	4.5	54
No.200	0.075	4	8	6	3	36
Pan		0	0	0	6	72
Jumlah					100	1200

b. Penentuan Kadar Aspal

Variasi kadar aspal ditentukan berdasarkan pada kadar aspal awal perkiraan yang merupakan kadar aspal tengah atau ideal. Kadar aspal tengah dihitung berdasarkan persamaan:

Pb = 0,035 (%CA) + 0,045(%FA) + 0,18 (%*Filler*) + Konstanta..... 3.1

Keterangan:

Pb = kadar aspal perkiraan, persen terhadap berat campuran;

CA = persen agregat tertahan saringan No. 8;

FA = agregat halus lolos saringan No. 8 dan tertahan No. 200;

Filler = agregat minimal 75% lolos saringan No. 200

Perhitungan penentuan kadar aspal empiris diambil pada batas tengah campuran gradasi rapat, perhitungan kadar aspal yang didapat adalah sebagai berikut sebagai berikut:

Pb = 0,035 (60,50%) + 0,045 (33,50) + 0,18 (6) + 0,75

= 5,46 % ≈ 5,5%

Tabel 3.5 Kadar aspal tengah yang digunakan dalam penelitian

	Agregat			Berat Agregat Tertahan				
				Untuk Variasi Kadar Aspal (gr)				
	Uk. Saringan	**% lolos**	**% Tertahan**	**4.5%**	**5.0%**	**5.5%**	**6.0%**	**6.5%**
	1	100	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CA	3/4	95	5	57.3	57.0	56.7	56.4	56.1
	1/2	82.5	12.5	143.3	142.5	141.8	141.0	140.3
	3/8	74	8.5	97.4	96.9	96.4	95.9	95.4
	No.4	55	19	217.7	216.6	215.5	214.3	213.2
	No.8	39.5	15.5	177.6	176.7	175.8	174.8	173.9
FA	No.16	28	11.5	131.8	131.1	130.4	129.7	129.0
	No. 30	20	8	91.7	91.2	90.7	90.2	89.8
	No.50	13.5	6.5	74.5	74.1	73.7	73.3	72.9
	No.100	9	4.5	51.6	51.3	51.0	50.8	50.5
	No.200	6	3	34.4	34.2	34.0	33.8	33.7
Total Persen Agregat Tertahan			94	1077.2	1071.6	1066.0	1060.3	1054.7
Filler			6.0	68.8	68.4	68.0	67.7	67.3
Berat Agregat (gr)			100.0	1146.0	1140.0	1134.0	1128.0	1122.0
Berat Aspal (gr)				54.0	60.0	66.0	72.0	78.0
Berat Campuran (gr)				1200.0	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0

Kadar aspal tengah yang diperoleh dari rumus tersebut dibulatkan mendekati angka 0,5% terdekat. Variasi yang digunakan sebanyak 5 variasi kadar aspal yang masing-masing berbeda 0,5%. Variasi kadar aspal yang dipilih sedemikian rupa, sehingga dua kadar aspal kurang dari nilai kadar aspal tengah, dan dua kadar aspal lainnya lebih besar dari nilai kadar aspal tengah. Jika kadar aspal tengah/ideal adalah a%, maka variasi kadar aspal adalah (a - 1)%, (a - 0,5)%, a%, (a + 0,5)%, dan (a + 1)%.

3.3.5 Pembuatan Campuran Beton Aspal

Setelah agregat slag dan material lainnya telah siap digunakan, maka selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji campuran agregat slag steel. Pembuatan benda uji atau briket beton aspal terlebih dahulu disiapkan agregat alam *(Virgin Aggregate)*, *Slag Steel* dan aspal pen.60/70 sesuai jumlah benda uji yang akan dibuat dan menyiapkan campuran sesuai perhitungan gradasi combine untuk campuran aspal sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018.

Pembuatan campuran ini dikembangkan dari penelitian sebelumnya, Pada penelitian sebelumnya penambahan slag steel digunakan dengan variasi campuran 10%, 20% dan 30% (Bethary, 2019) Hasil penelitian menunjukan semakin banyak kadar slag yang digunakan dalam campuran pekerasan akan meningkatkan nilai

stabilitas dan memenuhi standart ketetapan, untuk itu pada penelitian akan dilakukan pengembangan dalam persentase variasi campuran agregat slag digunakan sebagai pengganti agregat kasar No. 3/4, 1/2, 3/8, 4, 8 dan Agregat Halus No. 16, 30, 50, 100, 200. Variasi komposisi campuran dari penambahan material *Slag steel* yaitu 0%, 50%, 80%, 100%. Filler yang digunakan juga menggunakan variasi abu batu dan abu slag. Tahapan pembuatan aspal beton sebagai berikut:

1. Menyiapkan material berupa agregat alam *(Virgin Aggregate)*, agregat Buatan *Slag Baja, filler*, dan aspal penetrasi 60/70.
2. Menyaring agregat sesuai kebutuhan dan menempatkannya pada wadah sesuai ukuran butir masing-masing yaitu Bin I (0-5 cm), Bin II (5-10 cm), Bin III (10-15 cm), Bin IV (15-20cm) dan Slag Baja.
3. Menimbang agregat yang telah di saring sesuai proporsi di *job mix formula* (JMF), kemudian memasukkan agregat dalam wadah.
4. Menyiapkan peralatan penggorengan dan pencampur aspal beton, seperti kompor, wajan, pengaduk, pengatur suhu, dll.
5. Agregat dipanaskan sampai mencapai temperatur ± 20 °C di atas suhu pencampuran. Agregat panas dan aspal panas dimasukan kedalam tempat pencampuran untuk dicampur merata pada suhu pencampuran ± 150°C sesuai dengan ketentuan beton aspal campuran panas (hotmix).
6. Agregat dan aspal dalam wajan diaduk sampai keduanya tercampur menjadi satu dan merata. Suhu pencampuran antara 120°C – 150°C.
7. Menyiapkan peralatan pemadatan, seperti compactor, cetok, spatula, dll
8. Memasukkan campuran agregat dan aspal di wajan pada cetakan berbentuk silinder satu benda uji padat setinggi 6,35cm dengan diameter 10,2cm. Umumnya berat agregat campuran adalah ± 1200 gram kemudian di rojok sebanyak 25 kali.
9. Menaruh cetakan yang telah berisi campuran pada alat pemadat. Kemudian campuran di tumbuk sebanyak 2 x 75 kali pada bagian atas dan bawah, suhu pemadatan 95°C – 150°C.
10. Mengeluarkan cetakan berisi campuran yang telah padat dari alat pemadat dan mendinginkannya beberapa saat.

11. Campuran yang telah padat selanjutnya dikeluarkan dari cetakan menggunakan *extruder* dan benda uji aspal beton siap untuk dilakukan pengujian selanjutnya.

3.3.6 Pengujian Campuran Beton Aspal

1. Pengujian Marshall

Pemeriksaan terhadap campuran dilakukan dengan *Marshall Test* yang bertujuan untuk menentukan ketahanan (*stability*) dan kelelehan (*flow*) dari campuran aspal dan agregat dan menentukan kadar aspal optimum untuk pengujian setelahnya. Alat Marshall merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan *proving ring* (cincin penguji) berkapasitas 22,2 KN (=5000 lbf) dan *flowmeter* untuk mengukur kelelehan plastis atau *flow.*

Metode yang digunakan untuk pembuatan aspal beton akan mengikuti tahapan pelaksanaan metode marshall (SNI-06-2489-1991 atau AASTHO T 245-90, atau ASTM D 1559-76). Berat total agregat campuran adalah berat agregat yang dapat menghasilkan satu benda uji padat setinggi 6,35cm (2,5 inch) dengan diameter 10,2cm. Umumnya berat agregat campuran adalah ± 1200 gram. Pemadatan untuk uji *Marshall* dilakukan dengan penumbukan sebanyak 75 kali per bidang sesuai dengan persyaratan lalu lintas berat dengan menggunakan penumbuk.

Setelah benda uji dipadatkan, kemudian disimpan pada suhu ruang selama 24 jam, selanjutnya benda uji ditimbang di udara, di dalam air dan dalam kondisi kering-permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry,* SSD*)* untuk mendapatkan berat jenis *bulk* (*Bulk Specific Gravity*). Selanjutnya direndam pada temperatur 60°C selama 30 menit dan siap untuk pengujian stabilitas dan *flow*.Stabilitas benda uji adalah kemampuan maksimum benda uji yang dihasilkan pada suhu 60° dan diuji dengan alat tertentu. Nilai *flow* adalah pergerakan total atau regangan yang terjadi dalam benda uji antara kondisi tanpa beban dan beban maksimum selama pengujian stabilitas (*Asphalt Institute*, 1993).

2. Pengujian Perendaman (Durabilitas)

Pengujian perendaman *Marshall* ini dilakukan untuk melihat ketahanan campuran terhadap pengaruh kerusakan oleh air. Air pada campuran beraspal dapat mengakibatkan berkurangnya daya lekat aspal terhadap agregat, sehingga dapat

melemahkan ikatan antar agregat. Hasil yang berbeda pada masing-masing jenis campuran akan sifat stabilitas Marshall dapat dibaca pada indeks stabilitas sisa dimana stabilitas sebelum direndam dibandingkan dengan stabilitas yang direndam selama 24 jam.

Pengujian tersebut adalah uji durabilitas standar yang di lakukan di dalam *waterbath* dengan kondisi temperatur 60±1°C. Sebenarnya kondisi seluruh benda uji baik yang kering maupun basah tetap direndam dalam *waterbath*. Hanya saja benda uji yang kering hanya direndam selama 30±1 menit untuk memastikan benda uji tersebut dalam keadaan hampa udara, sedangkan benda uji basah direndam selama 24±1 jam agar benar-benar dalam kondisi jenuh air dan panas seperti kondisi di lapangan.

Uji perendaman terdiri dari 3 sampel yang direndam pada bak perendaman untuk semua sampel kadar aspal optimum. Spesifikasi Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah untuk mengevaluasi keawetan campuran adalah pengujian Marshall perendaman di dalam air pada suhu 60ºC selama 24 jam. Kebutuhan benda uji campuran aspal beton pada kadar aspal optimum akan diuraikan pada Tabel 3.6:

Tabel 3.6 Kebutuhan benda uji perendaman

Benda Uji Perendaman	**Jumlah Benda Uji**
Direndam air disuhu 60^0 selama 24 jam	9
Marshall KAO	9
Total benda Uji	**18**

Perbandingan stabilitas yang direndam dengan stabilitas standar, dinyatakan sebagai persen, dan disebut Indeks Stabilitas Sisa (IRS), dan dihitung sebagai berikut :

IRS = (MSi/MSs)x100%.....3.2

Keterangan:

IRS : Indeks Kekuatan Sisa (Index of Retained Strength) (%).

Msi : Stabilitas Marshall setelah perendaman 24 jam pada suhu 60±1ºC (kg)

MSs : Stabilitas Marshall standar perendaman selama 30±1 menit suhu 60ºC, (kg).

Berikut adalah tabel jumlah total benda uji yang akan dibuat pada Tabel 3.7:

Tabel 3.7 Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Benda Uji.

No	Uraian	Jumlah
1	Benda uji untuk penentuan kadar aspal optimum (KAO)	**60**
2	Benda Uji Untuk Uji Marshall KAO + Perendaman	**18**
	Jumlah	**78**

3.3.7 Analisis Data

Setelah dilakukan pengujian di laboratorium, maka data yang diperoleh disajikan dalam bentuk tabel hasil pengujian, tabel hasil perhitungan dan grafik. Pada benda uji dilakukan pengujian dengan metode Marshall. Dari hasil pengujian ini diperoleh data stabilitas dan flow. Data stabilitas dan flow inilah yang diolah dengan rumus – rumus sebagai berikut:

b. Kepadatan (density)

Kepadatan merupakan perbandingan antara berat kering benda uji dengan berat air pada volume yang sama. Kepadatan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$i = \frac{e}{(f-g)} \quad \text{..... 3.3}$$

Keterangan:

i = *density* (gr/cm^3);

e = berat kering (gr);

f = berat dalam kering keadaan jenuh permukaan (gr);

g = berat dalam air (gr);

(f - g) = volume bulk (cm^3).

c. Rongga dalam campuran (void in mix)

Rongga dalam campuran atau void in mix (VIM) adalah bagian ruang kosong dari seluruh campuran yang merupakan perbandingan volume ruang

udara dengan volume sampel yang dipadatkan dan dinyatakan dalam persen. Sukirman (2003) menyatakan banyaknya pori yang berada dalam beton aspal padat adalah banyaknya pori diantara butir-butir agregat yang diselimuti aspal. Rongga dalam campuran dinyatakan dalam persen terhadap volume beton aspal padat, dapat dihitung dengan persamaan:

$$k = 100 - 100\left(\frac{Gmb}{Gmm}\right)) \quad \text{.....3.4}$$

Keterangan:

k = persen rongga (%);

Gmb = berat volume atau density (gr/cm^3);

Gmm = berat jenis teoritis.

$$Gmm = \frac{100}{\frac{\%\,Agregat}{Bj\,Agregat} + \frac{\%\,Aspal}{Bj\,Aspal} + \frac{\%\,Filler}{Bj\,Filler}} \quad \text{.....3.5}$$

d. Rongga dalam mineral agregat (void in mineral aggregate)

Rongga didalam mineral agregat atau rongga antara butiran agregat adalah volume rongga yang terdapat di antara partikel agregat suatu campuran perkerasan yang telah dipadatkan, yaitu rongga udara dan volume kadar aspal efektif, yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total benda uji. Perhitungan nilai rongga antar butir agregat (VMA) terhadap campuran dihitung dengan persamaan:

$$I = 100 - \frac{Gmb\ x\ Kadar\ Agregat}{Gsb} \quad \text{.....3.6}$$

Keterangan:

I = rongga di dalam mineral agregat (VMA);

Gsb = berat jenis efektif;

Gmb = berat volume benda uji (gr/cm^3).

e. Rongga terisi aspal (void filled by asphalt)

Rongga terisi aspal atau void filled by asphalt (VFA) adalah merupakan perbandingan antara rongga-rongga yang terisi aspal dengan volume benda uji. Sukirman (2003) menyebutkan persentase pori antara butir agregat yang terisi aspal dinamakan VFA. Jadi VFA adalah bagian dari VMA yang terisi oleh aspal, tidak

termasuk aspal yang terabsorpsi oleh masing-masing butir agregat. Aspal yang mengisi pori-pori berfungsi untuk menyelimuti butir-butir agregat di dalam beton aspal padat, atau dengan kata lain VFA merupakan persentase volume beton aspal padat yang menjadi film atau selimut aspal. Besarnya nilai rongga terisi aspal dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{VFA} = \frac{100\ x\ (VMA - Va)}{VMA} \quad \text{.....} \quad 3.7$$

Keterangan:

VFA = rongga terisi aspal, persen

VMA = rongga diantara mineral agregat, persen volume bulk;

Va atau VIM = rongga di dalam campuran, persen total campuran.

f. Kelelehan plastis (*flow*)

Kelelehan plastis ialah keadaan perubahan bentuk suatu campuran aspal yang terjadi akibat suatu beban sampai batas runtuh. Nilai kelelehan plastis dapat langsung dibaca pada dial *flow* dan dinyatakan dalam satuan milimeter atau 0,1 *inchi*.

g. Marshall *quotient* (MQ)

Marshall *quotient* adalah perbandingan nilai stabilitas dan *flow*. Nilai stabilitas Marshall yang tinggi dan *flow* yang rendah menunjukkan campuran aspal beton yang kaku, sehingga bila menerima beban mudah retak. Besarnya nilai Marshall *quotient* dapat diperoleh dengan persamaan:

$$\text{MQ} = \frac{S}{flow} \quad \text{.....} \quad 3.8$$

Keterangan:

MQ = nilai Marshall quotient (kg/mm);

S = nilai stabilitas Marshall (kg);

Flow = pembacaan dial *flow* (mm).

3.4 Tahapan Penelitian

Untuk memudahkan dalam penyelesaian penelitian ini maka akan dibuat tahapan penelitian, Gambar 3.1 memperlihatkan tahapan-tahapan pada penelitian ini.

	Working stage	Input	Working Detail	Output
	Tahap I Pendahuluan dan Studi Literatur • Identifiksasi Masalah 1. Penggunaan agregat alam secara masif. 2. Pemanfaatan limbah slag baja 3. Peningkatan kualitas campuran aspal		Studi Literatur	1. Rumusan Masalah 2. Komposisi Bahan Penyusun Agregat
	Tahap II Proses Pelaksanaan Penelitian Proses pencampuran agregat slag dan agregat alam	Komposisi campuran agregat dan Penentuan Kadar aspal	Persiapan Bahan agregat Gradasi agregat Pengujian propertis agregat slag	1. Agregat Buatan (slag baja) sebagai bahan campuran aspal
	Proses Pembuatan dan pengujian benda uji	Memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018	Pengujian material (sifat fisis agregat dan aspal) Mix Desain Pembuatan Benda uji Marshall Test	1. Pemenuhan standart Spesifikasi 2. Benda uji untuk Tes Marshall
	Tahap III Hasil Study Analisa Data	Hasil analisa data dan evaluasi hasil	Kesimpulan dan saran	1. Menjawab rumusan masalah

Gambar 3.1 Bagan Alir Penelitian

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemeriksaan Bahan

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap material yang digunakan sebagai agregat dan aspal untuk campuran perkerasan jalan. Pemeriksaan bahan dilakukan di Laboratorium Perhubungan dan Bahan Perkerasan Jalan Instititut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Pengujian terhadap material yang digunakan sebagai material untuk campuran beraspal antara lain agregat kasar, agregat halus, agregat slag, bahan pengisi (*filler*), serta aspal pen 60/70. Standar Pengujian didasarkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

Hasil pengujian material dibagi dalam dua bagian, yaitu hasil pengujian karakteristik agregat yang terdiri dari agregat alami dan agregat buatan dan hasil pengujian karakteristik aspal.

4.1.1 Pemeriksaan Bahan Agregat

Agregat kasar, agregat halus dan *filler* didapatkan di Laboratorium Perhubungan dan Bahan Perkerasan Jalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Sedangkan bahan material agregat buatan (*Slag Steel*) berasal dari limbah sisa pemurnian baja PT. Isfatindo, Jawa Timur.

Hasil dari pengujian akan dibandingkan dengan spesifikasi Bina Marga 2018 sehingga dapat ditentukan apakah bahan-bahan tersebut sudah sesuai spesifikasi dan bisa digunakan untuk campuran aspal dan dilanjutkan dengan pengujian *Marshall* dan Perendaman (*Immertion Test*).

Pemeriksaan bahan dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari material yang digunakan sebagai campuran memenuhi persyaratan yang ditentukan dalam spesifikasi. Hasil pengujian agregat yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.1-4.2:

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Alam

No	Pengujian	Persyaratan	Hasil Pengujian
	1. Agregat Kasar		
1	Berat Jenis Bulk, gr/cm^3	-	2,542
2	Penyerapan Air, %	maks. 3	2,349
3	Abrasi dengan Mesin Los Angeles, %	maks. 40	30,8
4	Kelekatan agregat terhadap aspal, %	min. 95	98
	2. Agregat Halus		
1	Berat Jenis Bulk, gr/cm^3	-	2,599
2	Penyerapan Air, %	maks. 3	2,965
	3. Filler		
1	Berat jenis, gr/cm3	-	2,614

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Slag

No	Pengujian	Persyaratan	Hasil Pengujian
	1. Agregat Slag Steel (Agregat kasar)		
1	Berat Jenis Bulk, gr/cm^3	-	5,405
2	Penyerapan Air, %	maks. 3	1
3	Abrasi dengan Mesin Los Angeles, %	maks. 40	20,60
4	Kelekatan agregat terhadap aspal, %	min. 95	97
	2. Agregat Halus		
1	Berat Jenis Bulk, gr/cm^3		3,378
2	Penyerapan Air, %	maks.3	2,229

Pada Tabel 4.1-4.2 dapat dilihat bahwa terdapat persyaratan yang mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 tentang spesifikasi agregat. Untuk hasil pengujian dan perhitungan pemeriksaan agregat dapat dilihat pada Lampiran A.1. Pada pemeriksaan agregat kasar, agregat halus, dan filler, nilai hasil pengujian yang didapatkan telah memenuhi standar spesifikasi yang ditetapkan. untuk persyaratan agregat buatan digunakan spesifikasi yang sama dengan agregat alam dikarenakan pada penelitian ini agregat buatan yang digunakan adalah agregat buatan dengan fraksi kasar dan halus. Hal ini dilakukan untuk menjadi alternatif pengurangan pemakaian agregat alam pada campuran perkerasan aspal.

Setelah dilakukan pemeriksaan pada agregat *Slag Steel*, didapatkan hasil pada pengujian berat jenis dan penyerapan air telah memenuhi nilai persyaratan. Dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa agregat *Slag steel* yang digunakan telah memenuhi spesifikasi karakteristik agregat yang telah ditentukan sehingga dapat digunakan sebagai bahan campuran perkerasan jalan.

Hasil dari pengujian karakteristik agregat kasar, agregat halus, agregat slag steel dan bahan pengisi yang digunakan dalam campuran seperti terlihat pada Tabel 4.1-4.2 menunjukkan bahwa agregat yang digunakan telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

1. Berat jenis dan penyerapan air

Pengujian berat jenis ini dilakukan pada tiap fraksi agregat yaitu agregat kasar, agregat halus dan *filler*. Dari pengujian ini juga diperoleh nilai penyerapan yang menunjukkan banyaknya pori dalam agregat. Pori dibutuhkan untuk menyerap aspal sehingga terbentuk ikatan antar aspal dan butiran agregat. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan tercantum dalam Tabel 4.1-4.2. Berat jenis (*specific gravity*) pada fraksi kasar agregat alam yaitu sebesar 2,542% dengan penyerapan air sebesar 2,349%. sedangkan pada fraksi agregat halus memiliki berat jenis sebesar 2,599% dengan nilai penyerapan sebesar 2,965%. Nilai tersebut memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Pada pengujian agregat *slag steel* didapatkan nilai berat jenis pada agregat kasar sebesar 5,405% dengan nilai penyerapan sebesar 1%. Sedangkan pada Agregat halus *Slag steel* didapatkan nilai berat jenis sebesar 3,378% dengan nilai penyerapan air sebesar 2,229%. Dari hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat, nilai yang didapatkan telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Sehingga agregat dapat digunakan sebagai bahan campuran Perkerasan jalan.

2. Keausan agregat dengan alat Abrasi Los Angeles

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui durabilitas agregat. Pada agregat kasar alami didapatkan nilai sebesar 30,8% , agregat buatan slag sebesar 20,60%. Nilai tersebut telah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yang menetapkan persyaratan maksimal 40%. Dari hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa agregat slag yang digunakan mempunyai nilai keausan yang

cukup kecil sehingga tidak mudah pecah selama pemadatan atau akibat beban lalu lintas. Dengan nilai keausan yang cukup kecil dan memenuhi spesifikasi yang dibutuhkan, maka gradasi agregat di dalam perkerasan tidak akan berubah secara signifikan, sehingga dapat mempertahankan gradasi rencana dengan baik.

3. Kelekatan agregat terhadap aspal

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya kelekatan agregat terhadap aspal. Dari hasil pengujian diperoleh nilai 98% untuk agregat kasar alami dan sebesar 97% pada agregat slag. Nilai ini lebih besar dari 95% yang menjadi persyaratan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Hal ini menunjukkan bahwa agregat yang diuji memiliki sifat kelekatan terhadap aspal yang cukup besar sehingga agregat cukup tahan terhadap pemisahan aspal, misalnya akibat pengaruh air.

4.1.2 Pemeriksaan Aspal

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal produksi PT. Pertamina Pen 60/70. Karakteristik aspal Pen 60/70 ini akan diperiksa sesuai persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Hasil dari pengujian karakteristik aspal Pen 60/70 dapat dilihat pada Tabel 4.3:

Tabel 4.3 Hasil pengujian Karakteristik Aspal

No.	Jenis Pengujian	Persyaratan	Hasil Pengujian
1	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	60 – 70	64
2	Titik Lembek (°C)	≥ 48	51
3	Daktilitas pada 25°C (cm)	≥ 100	≥ 100
4	Titik Nyala (°C)	≥ 232	256
5	Berat Jenis	≥ 1,0	1,033

Berdasarkan Tabel 4.3 terdapat nilai persyaratan karakteristik aspal yang mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Untuk hasil pengujian dan perhitungan pemeriksaan aspal dapat dilihat pada Lampiran. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa aspal yang digunakan memenuhi spesifikasi karakteristik yang telah ditentukan sehingga dapat digunakan pada campuran perkerasan jalan.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap aspal produksi PT. Pertamina Pen 60/70. Hasil dari pengujian sifat fisik atau karakteristik aspal dapat dilihat pada Tabel 4.3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aspal yang digunakan memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018.

1. Pengujian Penetrasi

Pengujian penetrasi dimaksudkan untuk menetapkan nilai kekerasan aspal. Semakin besar nilai penetrasi maka aspal semakin lunak dan begitu juga sebaliknya, semakin kecil nilai penetrasi maka aspal semakin keras.

Pada pengujian penetrasi aspal di laboraturium didapatkan hasil bacaan pada alat penetrasi rata-rata aspal yang diuji adalah 64. Dari hasil pengujian bisa diketahui aspal yang digunakan memenuhi syarat aspal penetrasi 60/70, yaitu nilai penetrasinya harus berada diantara 60 sampai dengan 70.

2. Pengujian Titik Lembek

Pengujian titik lembek aspal bertujuan untuk mengetahui suhu dimana aspal mulai mencapai titik lembeknya sehingga bisa dijadikan patokan dalam pekerjaan di lapangan untuk menentukan suhu maksimum yang digunakan sebelum aspal menjadi lembek. Dari hasil pengujian titik lembek didapatkan nilai yaitu 52ºC. Nilai ini sudah memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dimana nilai titik lembek untuk aspal penetrasi 60/70 yaitu antara 48ºC – 58ºC.

3. Pengujian Titik Nyala dengan *Cleveland Open Cup*

Dari hasil pengujian titik nyala didapatkan suhu titik nyala pada aspal pertamina pen. 60/70 adalah 256ºC. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, hasil ini sudah sesuai dengan spesifikasi untuk aspal penetrasi 60/70 yaitu titik nyala harus ≥232ºC.

4. Pengujian Daktilitas

Pengujian daktilitas pada aspal bertujuan untuk mengetahui ketahanan aspal dalam mempertahankan sifat aslinya terhadap perubahan misalnya air dan untuk mengetahui elastisitas bahan aspal. Sesuai persyaratan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, aspal yang baik untuk digunakan adalah aspal dengan nilai

daktilitas ≥100 cm. Pada pengujian ini aspal yang diuji sudah memenuhi syarat dengan nilai minimal 100 cm.

5. Pengujian Berat Jenis Aspal

Berat jenis aspal yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebesar 1,033 kg/m^3. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 berat jenis aspal yang dapat digunakan adalah aspal dengan berat jenis ≥1,0 kg/m^3.

4.2 Perencanaan Campuran Apal Beton

Setelah melakukan pengujian terhadap terhadap agregat kasar, agregat halus, agregat slag, filler dan aspal. Langkah selanjutnya yaitu menentukan proporsi material dan merencanakan campuran aspal beton. Dalam hal ini campuran yang digunakan yaitu campuran gradasi rapat atau gradasi menerus. Proporsi agregat yang digunakan dalam campuran dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Gradasi Proporsi Agregat

Ukuran Saringan		Gradasi Rapat				
		% Berat yang lolos			Tertahan pada masing-masing saringan	
Saringan	Ukuran (mm)	Spesifikasi bawah	Spesifikasi atas	Gradasi Uji	(%)	(gr)
1	25	100	100	100	0	0
3/4	19	90	100	95	5	60
1/2	12.5	75	90	82.5	12.5	150
3/8	9.5	66	82	74	8.5	102
No.4	4.75	46	64	55	19	228
No.8	2.36	30	49	39.5	15.5	186
No.16	1.18	18	38	28	11.5	138
No. 30	0.6	12	28	20	8	96
No.50	0.3	7	20	13.5	6.5	78
No.100	0.15	5	13	9	4.5	54
No.200	0.075	4	8	6	3	36
Pan		0	0	0	6	72
Jumlah					100	1200

Gradasi berguna untuk menentukan proporsi agregat yang akan digunakan sebagai campuran aspal. Proporsi yang dimaksud adalah kandungan agregat kasar, halus dan filler pada satu buah sampel memiliki berat sebesar 1200gr.

4.3 Penentuan Komposisi Aspal Terhadap Campuran

Perhitungan komposisi aspal digunakan untuk mengetahui nilai kadar aspal tengah ideal dan sebagai perkiraan kadar aspal dalam mencari nilai kadar aspal optimum. Komposisi aspal ditentukan pada persentase gradasi tengah pada campuran aspal.

Perhitungan penentuan kadar aspal optimum adalah sebagai berikut:

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

= 0,035 (60,50%) + 0,045 (33,50) + 0,18 (6) + 0,75

= 5,46 % ≈ 5,5%

Keterangan:

Pb = Kadar aspal perkiraan, persen terhadap berat campuran;

CA = Persen agregat tertahan saringan No. 8;

FA = Agregat halus lolos saringan No. 8 dan tertahan No. 200;

Filler = Agregat minimal 75% lolos saringan No. 200

K = Nilai Konstanta sekitar 0,5 - 1,0 untuk aspal concret (AC)

Dari perhitungan diatas didapat nilai kadar aspal tengah ideal sebesar 5.5%. Selanjutnya untuk mencari kadar aspal optimum akan dibuat benda uji sebanyak 5 variasi kadar aspal yang masing-masing berbeda 0,5%. Variasi kadar aspal yang dipilih sedemikian rupa, sehingga dua kadar aspal kurang dari nilai kadar aspal tengah, dan dua kadar aspal lainnya lebih besar dari nilai kadar aspal tengah. Jika kadar aspal tengah/ideal adalah a%, maka variasi kadar aspal adalah (a - 1)%, (a - 0,5)%, a%, (a + 0,5)%, dan (a + 1)%. Dengan menggunakan perhitungan seperti diatas maka didapat kadar aspal perkiraan dan kebutuhan agregat secara keseluruhan. Kadar aspal dan kebutuhan agregat dapat dilihat pada Tabel 4.5 - 4.8

Tabel 4.5 Kadar Aspal dan Kebutuhan Agregat 100% Agregat Alam

	Agregat			Berat Agregat Tertahan				
				Untuk Variasi Kadar Aspal (gr)				
	Uk. Saringan	**% lolos**	**% Tertahan**	**4.5%**	**5.0%**	**5.5%**	**6.0%**	**6.5%**
	1	100	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CA	3/4	95	5	57.3	57.0	56.7	56.4	56.1
	1/2	82.5	12.5	143.3	142.5	141.8	141.0	140.3
	3/8	74	8.5	97.4	96.9	96.4	95.9	95.4
	No.4	55	19	217.7	216.6	215.5	214.3	213.2
	No.8	39.5	15.5	177.6	176.7	175.8	174.8	173.9
FA	No.16	28	11.5	131.8	131.1	130.4	129.7	129.0
	No. 30	20	8	91.7	91.2	90.7	90.2	89.8
	No.50	13.5	6.5	74.5	74.1	73.7	73.3	72.9
	No.100	9	4.5	51.6	51.3	51.0	50.8	50.5
	No.200	6	3	34.4	34.2	34.0	33.8	33.7
Total Persen Agregat Tertahan			94	1077.2	1071.6	1066.0	1060.3	1054.7
Filler			6.0	68.8	68.4	68.0	67.7	67.3
Berat Agregat (gr)			100.0	1146.0	1140.0	1134.0	1128.0	1122.0
Berat Aspal (gr)				54.0	60.0	66.0	72.0	78.0
Berat Campuran (gr)				1200.0	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0

Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat variasi 50% Agregat Alam : 50% Agregat Slag

Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat																	
	No. Ayakan		Berat Tertahan	4.5%		Berat Tertahan	5%		Berat Tertahan	5.5%		Berat Tertahan	6%		Berat Tertahan	6.5%	
				54	gr		60	gr		66	gr		72	gr		78	gr
	in	mm	gr	AS	AA	gr	AS	AA	gr	AS	AA	gr	AS	AA	gr	AS	AA
CA	1	25	0	0		0	0		0	0		0	0		0	0	
	3/4	19	57.30	28.65	28.65	57.00	28.50	28.50	56.70	28.35	28.35	56.40	28.20	28.20	56.10	28.05	28.05
	1/2	12.5	143.25	71.63	71.63	142.50	71.25	71.25	141.75	70.88	70.88	141.00	70.50	70.50	140.25	70.13	70.13
	3/8	9.5	97.41	48.71	48.71	96.90	48.45	48.45	96.39	48.20	48.20	95.88	47.94	47.94	95.37	47.69	47.69
	No.4	4.75	217.74	108.87	108.87	216.60	108.30	108.30	215.46	107.73	107.73	214.32	107.16	107.16	213.18	106.59	106.59
	No.8	2.36	177.63	88.82	88.82	176.70	88.35	88.35	175.77	87.89	87.89	174.84	87.42	87.42	173.91	86.96	86.96
FA	No.16	1.18	131.79		131.79	131.10		131.10	130.41		130.41	129.72		129.72	129.03		129.03
	No. 30	0.6	91.68		91.68	91.20		91.20	90.72		90.72	90.24		90.24	89.76		89.76
	No.50	0.3	74.49		74.49	74.10		74.10	73.71		73.71	73.32		73.32	72.93		72.93
	No.100	0.15	51.57		51.57	51.30		51.30	51.03		51.03	50.76		50.76	50.49		50.49
	No.200	0.075	34.38		34.38	34.20		34.20	34.02		34.02	33.84		33.84	33.66		33.66
FF	Pan		68.76		68.76	68.40		68.40	68.04		68.04	67.68		67.68	67.32		67.32
	Jumlah		1146.00	346.67	799.34	1140.00	344.85	795.15	1134.00	343.04	790.97	1128.00	341.22	786.78	1122.00	339.41	782.60

Tabel 4.7 Kebutuhan Agregat variasi 20% Agregat Alam : 80% Agregat Slag

Kadar Aspal Perkiraan dan Kebutuhan Agregat																	
	No. Ayakan		%Berat Tertahan	4.5%		Berat Tertahan	5%		Berat Tertahan	5.5%		Berat Tertahan	6%		Berat Tertahan	6.5%	
				54	gr		60	gr		66	gr		72	gr		78	gr
	in	mm	gr	AS	AA	gr	AS	AA	gr	AS	AA	gr	AS	AA	gr	AS	AA
CA	1	25	0	0		0	0		0	0		0	0		0	0	
	3/4	19	57.30	45.84	11.46	57.00	45.60	11.40	56.70	45.36	11.34	56.40	45.12	11.28	56.10	44.88	11.22
	1/2	12.5	143.25	114.60	28.65	142.50	114.00	28.50	141.75	113.40	28.35	141.00	112.80	28.20	140.25	112.20	28.05
	3/8	9.5	97.41	77.93	19.48	96.90	77.52	19.38	96.39	77.11	19.28	95.88	76.70	19.18	95.37	76.30	19.07
	No.4	4.75	217.74	174.19	43.55	216.60	173.28	43.32	215.46	172.37	43.09	214.32	171.46	42.86	213.18	170.54	42.64
	No.8	2.36	177.63	142.10	35.53	176.70	141.36	35.34	175.77	140.62	35.15	174.84	139.87	34.97	173.91	139.13	34.78
FA	No.16	1.18	131.79		131.79	131.10		131.10	130.41		130.41	129.72		129.72	129.03		129.03
	No. 30	0.6	91.68		91.68	91.20		91.20	90.72		90.72	90.24		90.24	89.76		89.76
	No.50	0.3	74.49		74.49	74.10		74.10	73.71		73.71	73.32		73.32	72.93		72.93
	No.100	0.15	51.57		51.57	51.30		51.30	51.03		51.03	50.76		50.76	50.49		50.49
	No.200	0.075	34.38		34.38	34.20		34.20	34.02		34.02	33.84		33.84	33.66		33.66
FF	Pan		68.76		68.76	68.40		68.40	68.04		68.04	67.68		67.68	67.32		67.32
	Jumlah		1146.00	554.66	591.34	1140.00	551.76	588.24	1134.00	548.86	585.14	1128.00	545.95	582.05	1122.00	543.05	578.95

Tabel 4.8 Kadar Aspal dan Kebutuhan Agregat 100% Agregat Slag

	Agregat			Berat Agregat Tertahan Untuk Variasi Kadar Aspal (gr)				
	Uk. Saringan	% lolos	% Tertahan	4.5%	5.0%	5.5%	6.0%	6.5%
	1	100	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CA	3/4	95	5	57.3	57.0	56.7	56.4	56.1
	1/2	82.5	12.5	143.3	142.5	141.8	141.0	140.3
	3/8	74	8.5	97.4	96.9	96.4	95.9	95.4
	No.4	55	19	217.7	216.6	215.5	214.3	213.2
	No.8	39.5	15.5	177.6	176.7	175.8	174.8	173.9
FA	No.16	28	11.5	131.8	131.1	130.4	129.7	129.0
	No. 30	20	8	91.7	91.2	90.7	90.2	89.8
	No.50	13.5	6.5	74.5	74.1	73.7	73.3	72.9
	No.100	9	4.5	51.6	51.3	51.0	50.8	50.5
	No.200	6	3	34.4	34.2	34.0	33.8	33.7
Total Persen Agregat Tertahan			94	1077.2	1071.6	1066.0	1060.3	1054.7
Filler			6.0	68.8	68.4	68.0	67.7	67.3
Berat Agregat (gr)			100.0	1146.0	1140.0	1134.0	1128.0	1122.0
Berat Aspal (gr)				54.0	60.0	66.0	72.0	78.0
Berat Campuran (gr)				1200.0	1200.0	1200.0	1200.0	1200.0

Tabel 4.5 – Tabel 4.8 menunjukan proporsi material yang digunakan untuk membuat benda uji seberat 1200gram dengan jumlah 3 benda uji pada masing-masing variasi kadar aspal.

4.4 Pengujian Campuran Aspal

Setelah dilakukan pemeriksaan terhadap karakteristik material yang digunakan, selanjutnya yaitu merencanakan campuran aspal. Pada penelitian ini campuran dibuat menggunakan gradasi rapat untuk perkerasan jalan lentur. Pada penelitian ini ada 4 variasi campuran yang digunakan yaitu, variasi 1 campuran 100% agregat alam, variasi ke 2 50% agregat alam dan 50% agregat slag, variasi ke 3 20% agregat alam dan 80% agregat slag dan variasi ke 4 100% agregat slag. Pada campuran Variasi ke 2 dan ke 3 agregat slag hanya digunakan pada agregat kasar, sedangkan pada variasi ke 4 agregat slag digunakan pada agregat kasar dan halus. Penelitian pada pengujian *Marshall* dan perendaman (*immersion test*) dilakukan di Laboratorium Perhubungan dan Bahan Perkerasan Jalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

4.4.1 Pengujian Campuran Metode Marshall

Nilai Kadar Aspal Optimum diperoleh melalui pengujian dengan metode *Marshall*. Beberapa parameter seperti kepadatan, rongga dalam campuran (VIM),

rongga dalam mineral agregat (VMA), rongga terisi aspal (VFA), stabilitas, kelelehan (*flow*) dan *Marshall Qoutient*, diperoleh dari hasil pengujian *Marshall*. Rumus-rumus yang digunakan dalam analisis *Marshall* ditunjukkan pada Lampiran. Agar lebih jelas pengujian campuran metode marshall diuraikan sebagai berikut:

1. Untuk pengujian metode marshall, pertama membuat benda uji terlebih dahulu. Proporsi material dalam campuran aspal menyesuaikan pada Tabel 4.5 - 4.8. pada Tabel 4.5 – Tabel 4.8 diketahui terdapat 5 campuran yang akan dibuat benda uji dengan kadar aspal yang berbeda-beda. Campuran 1 dengan kadar aspl 4.5%; campuran 2 dengan kadar aspal 5%; campuran 3 dengan kadar aspal 5,5%; campuran 4 dengan kadar aspal 6% dan campuran ke 5 dengan kadar aspal 6.5%. Setiap campuran dibuat 3 benda uji. Sehingga total benda uji untuk pengujian marshall yaitu berjumlah 60 benda uji.
2. Setelah membuat benda uji sesuai ketentuan di poin 1, kemudian benda uji dilakukan pengujian untuk melihat nilai karakteristik dengan pengujian marshall untuk mengetahui nilai stabilitas, kelelehan dan volumetrik pada campuran. Data hasil pengujian marshall pada masing-masing variasi dapat dilihat pada Tabel 4.9-4.12.

Hasil perhitungan karakteristik dari berbagai kadar aspal tersebut selanjutnya digunakan untuk mencari kadar aspal optimum. Beberapa parameter seperti Kepadatan, rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam mineral (VMA) dan rongga terisi aspal (VFA). Rumus yang digunakan dalam perhitungan analisis marshall dapat dilihat pada lampiran B.

Data yang didapat dari pengujian *Marshall* adalah data tinggi sampel, stabilitas, dan flow. Data hasil pengujian dari tiap variasi tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.9 - 4.12:

Tabel 4.9 Data Hasil Pengujian *Marshall* (100% Agregat Alam)

Kadar Aspal			
	H	Stabilitas	Flow
%	cm	kg	mm
4.5	6.99	350	3.0
	6.90	292	2.8
	6.96	275	4.2
5	6.91	333	2.10
	6.99	288	4.3
	6.98	350	3.1
5.5	6.79	298	2.20
	6.83	340	3.10
	6.72	345	2.8
6	6.72	420	2.1
	6.98	255	4.0
	6.92	310	3.9
6.5	6.72	318	2.5
	6.72	345	3.5
	6.54	300	3.2

Tabel 4.10 Data Hasil Pengujian *Marshall* (50% Agregat Alam, 50% Slag)

Kadar Aspal			
	H	Stabilitas	Flow
%	cm	kg	mm
4.5	6.07	431	3.30
	6.13	375	3.23
	6.10	379	3.80
5	6.01	440	3.90
	5.90	357	3.92
	5.82	330	3.15
5.5	5.93	445	2.45
	6.00	426	2.80
	5.96	379	3.50
6	5.85	460	2.90
	5.84	422	2.50
	5.95	440	2.00
6.5	5.72	390	2.82
	5.86	350	2.50
	5.96	340	2.00

Tabel 4.11 Data Hasil Pengujian *Marshall* (20% Agregat Alam, 80% slag)

Kadar Aspal			
	H	Stabilitas	Flow
%	cm	kg	mm
4.5	5.71	444	3.55
	5.43	450	5.52
	5.71	455	3.50
5	5.57	322	2.40
	5.70	589	2.60
	5.72	510	4.12
5.5	5.53	403	3.50
	5.64	432	2.00
	5.60	492	4.60
6	5.64	446	3.20
	5.58	380	3.00
	5.57	450	2.90
6.5	5.55	339	7.20
	5.46	375	5.45
	5.52	382	5.75

Tabel 4.12 Data Hasil Pengujian *Marshall* (100% Agregat Slag)

Kadar Aspal			
	H	Stabilitas	Flow
%	cm	kg	mm
4.5	4.85	238	4.10
	4.86	168	4.25
	4.85	153	3.70
5	4.95	226	4.50
	4.91	180	4.70
	4.92	178	3.45
5.5	4.90	202	4.70
	4.90	185	5.15
	4.92	190	3.10
6	4.88	205	7.20
	4.85	170	3.06
	4.85	155	6.73
6.5	4.95	164	6.80
	4.91	158	5.55
	4.94	179	5.85

Dari Tabel 4.9-4.12 dapat dilihat data hasil pengujian pada setiap campuran masing-masing variasi, variasi kadar aspal dibuat sebanyak 3 sampel. Data H merupakan tinggi rata-rata benda uji kering yang diukur menggunakan jangka

sorong yang mana tinggi diambil pada 3 titik di setiap sampelnya dan dihitung rata-rata benda uji, sedangkan data stabilitas dan flow didapatkan dengan membaca dial secara langsung saat dilakukan pengujian *Marshall*.

Pada perhitungan *Marshall* diperlukan beberapa data yaitu berat jenis, tinggi benda uji, nilai koreksi benda uji, serta kalibrasi dari alat. Analisis *Marshall* dilakukan dengan menghitung variasi kadar aspal. Berikut ini adalah contoh perhitungan karakteristik Marshall pada campuran 50% Agregat slag 50% agregat alam dengan kadar aspal 4.5%. Perhitungan lengkap untuk kadar aspal lainnya dapat dilihat pada Lampiran B.1. Contoh perhitungan pada analisis *Marshall* adalah sebagai berikut :

- Data benda uji :
  - Tinggi sampel = 6,07 mm
  - Berat sampel = 1200 gram
  - Berat aspal = 4,5% x 1200 gram = 54 gram
  - Berat agregat = 100% - Kadar aspal = 100% - 4,5% = 95,5%
  - Berat Jenis aspal = 1,033
  - Bj Bulk/Bj Semu Agregat Kasar = 2,542 / 2,703
  - Bj Bulk/Bj Semu Agregat Halus = 2.557 / 2.848
  - Bj Bulk/Bj Semu Filler = 2.614 / 2.726
  - Bj Bulk/Bj Semu Slag = 5.405 / 5.714
  - Berat Kering = 1188,60 gram
  - Berat jenu/SSD = 1198.70 gram
  - Berat dalam air = 760 gram
  - Berat jenis efektif agregat kasar

$$= \frac{Bj\ Agregat + Bj\ Semu}{2} = \frac{2{,}542 + 2{,}703}{2} = 3{,}893$$

  - Berat jenis efektif (Gse)

$$= \frac{100}{\frac{\%Agregat\ Kasar}{Bj\ efektif\ Kasar} + \frac{\%Agregat\ Halus}{Bj\ efektif\ Halus} + \frac{\%Filler}{Bj\ efektif\ Filler} + \frac{\%agregat\ slag}{BJ\ efektif\ slag}}$$

$$= \frac{100}{\frac{30{,}25}{2{,}542} + \frac{33{,}50}{2{,}557} + \frac{6}{2{,}614} + \frac{30{,}25}{5.405}}$$

= 3,162

Dari perhitungan *Marshall* akan didapat nilai VIM, VMA, VFA, Stabilitas, Flow, dan MQ. Berikut adalah contoh perhitungan *Marshall* :

- Contoh perhitungan
  a. Nomor briket
  b. Teball benda uji = 6,07 mm
  c. Kadar aspal = 4,5%
  d. Kadar agregat = 100 – C
     = 100 – 4,5 = 95,5%
  e. Berat kering = 1188,60 gram
  f. Berat jenuh/SSD = 1198.70 gram
  g. Berat dalam air = 759 gram
  h. Volume benda uji = Berat SSD – Berat dalam Air
     = 1198.70 - 759
     = 439,70 gram
  i. Berat jenis bulk campuran padat (Gmb)

$$= \frac{e}{h} = \frac{1188,60}{439,70} = 2,70\ g/cm3$$

  j. Berat jenis maksimum campuran (Gmm)

$$= \frac{100}{\frac{\%agregat}{Bj\ agregat\ Eff} + \frac{\%Aspal}{Bj\ Aspal}}$$

$$= 100/(\frac{95,5}{3,162} + \frac{4,5}{1,033}) = 2,89$$

  k. Berat jenis efektif agregat campuran (Gsb)

$$= \frac{\%agregat\ 1 + \%agregat2 + \%agregat3 + \%agregat4}{\frac{\%agregat1}{Bj\ agregat\ Eff1} + \frac{\%agregat2}{Bj\ agregat\ Eff2} + \frac{\%agregat3}{Bj\ agregat\ Eff3} + \frac{\%agregat4}{Bj\ agregat\ Eff4}}$$

$$= \frac{30,25 + 33,50 + 6,00\ + 30,25}{\frac{30,25}{2,542} + \frac{33,50}{2,557} + \frac{6}{2,614} + \frac{30,25}{5,404}}$$

= 3,040

l. Rongga udara dalam campuran (VIM)

$= 100 - 100\ (\frac{Gmb}{Gmm})$

$= 100 - 100\ (\frac{2,89}{2,70})$

= 6,58 %

m. Rongga antar agregat (VMA)

$= 100 - \frac{Gmb\ x\ Kadar\ Agregat}{Gsb}$

$= 100 - \frac{2,70\ x\ 95,50}{3,040}$

$= 15.08\ \%$

n. Rongga terisi aspal (VFA)

$= \frac{VMA - VIM}{VMA} x100$

$= \frac{15,08 - 6.58}{15,08} x100$

$= 56,34$

o. Stabilitas bacaan alat = 431

p. Stabilitas terkoreksi :

Koreksi isi = 1,32 (lihat tabel)

Faktor kalibrasi = 0,454 x 7,28 = 3,305

q. Stabilitas setelah koreksi

= stabilitas bacaan alat x koreksi tinggi x faktor kalibrasi

= 431 x 1,32 x 3,305

= 1880,35 kg

r. Flow = 3,30 mm

s. *Marshall Quotient (MQ)* $= \frac{Stabilitas}{Flow}$

= 569,80 kg/mm

Dari data hasil pengujian *Marshall* dilakukan perhitungan dan didapatkan rata-rata dari tiap nilai karakteristik untuk campuran perkerasan. Berdasarkan perhitungan tersebut didapatkan nilai karakteristik yang dapat dilihat pada Tabel 4.13 - Tabel 4.16 dapat dilihat nilai rata-rata dari hasil perhitungan karakteristik

Marshall masing-masing variasi campuran pada setiap kadar aspal. Standar spesifikasi karakteristik campuran yang ditentukan mengacu pada standar spesifikasi Bina Marga 2018 untuk campuran perkerasan jalan. Dapat dilihat bahwa parameter *Marshall* dari semua jenis campuran cenderung memenuhi persyaratan Bina Marga 2018. Namun ketika penggunaan agregat slag steel 100% ditambahkan dapat dilihat bahwa nilai VIM dan VFA tidak memenuhi persyaratan kadar aspal. Contoh benda uji campuran aspal dan dokumentasi pengujian *Marshall* dapat dilihat pada Lampiran.

Analisis nilai empiris *Marshall* ditunjukkan dengan nilai stabilitas dan kelelehan (*flow*) yang merupakan besaran yang diukur langsung dari pengujian pada saat benda uji dibebani dengan alat uji Marshall. Sedangkan nilai volumetrik campuran yang dilakukan meliputi rongga dalam campuran (VIM), rongga dalam mineral agregat (VMA), dan rongga terisi aspal (VFA).

Tabel 4.13 Nilai Karakteristik *Marshall* 100% Agregat Alam.

Karakteristik Campuran	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4.5	5	5.5	6	6.5	
Stabilitas (kg)	1025.69	1099.86	1145.30	1128.59	1103.38	≥ 800kg
Flow (mm)	3.33	3.17	2.70	3.33	3.07	2-4
VIM (%)	7.82	5.63	3.18	2.13	1.55	3-5
VMA (%)	19.94	19.09	18.04	18.22	18.78	≥ 14
VFB (%)	61.08	70.72	82.48	88.33	91.79	≥ 65
MQ (kg/mm)	320.70	384.84	428.83	393.27	366.10	≥ 250
Kepadatan (g/cm3)	2.28	2.32	2.36	2.37	2.37	

Tabel 4.14 Nilai Karakteristik *Marshall* (50% Alam : 50% Slag)

Karakteristik Campuran	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4.5	5	5.5	6	6.5	
Stabilitas (kg)	1723.29	1721.01	1817.82	1922.52	1570.59	≥ 800kg
Flow (mm)	3.44	3.32	2.92	2.47	2.44	2-4
VIM (%)	6.55	6.15	4.87	3.05	2.51	3-5
VMA (%)	15.06	15.78	16.01	15.64	16.39	≥ 14
VFB (%)	56.48	61.29	69.68	80.53	84.76	≥ 65
MQ (kg/mm)	503.81	520.96	642.87	796.09	651.94	≥ 250
Kepadatan (g/cm3)	2.70	2.69	2.70	2.73	2.72	

Tabel 4.15 Nilai Karakteristik *Marshall* (20% Alam : 80% Slag)

Karakteristik Campuran	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4.5	5	5.5	6	6.5	
Stabilitas (kg)	2204.64	2481.24	2280.67	2347.65	2016.48	≥ 800Kg
Flow (mm)	4.19	3.04	3.37	3.03	6.13	2 - 4
VIM (%)	12.79	7.16	6.15	3.22	2.37	3 - 5
VMA (%)	20.19	16.27	16.89	15.54	16.31	≥ 14
VFB (%)	37.07	56.12	63.63	79.32	85.76	≥ 65
MQ (kg/mm)	540.60	848.94	752.94	774.97	335.45	≥ 250
Kepadatan (g/cm3)	2.87	3.02	3.02	3.08	3.07	

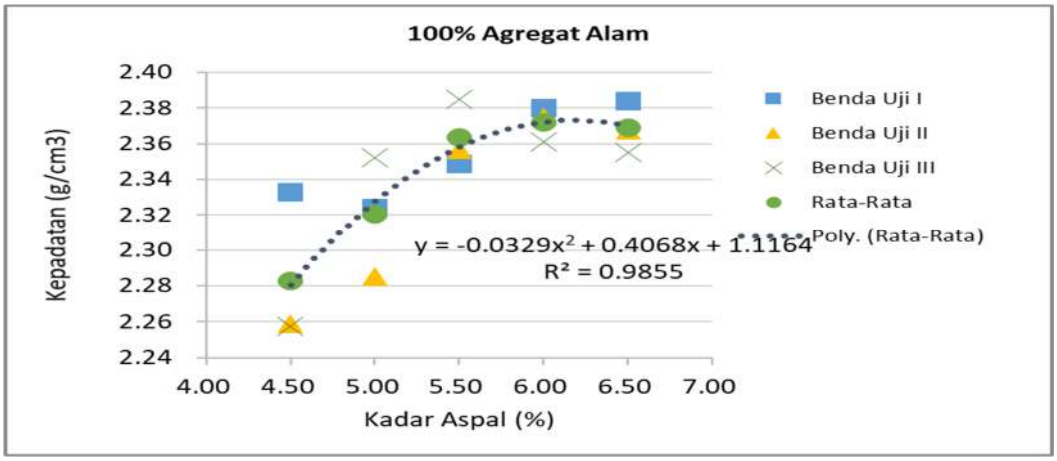
Tabel 4.16 Nilai Karakteristik *Marshall* 100% Agregat Slag.

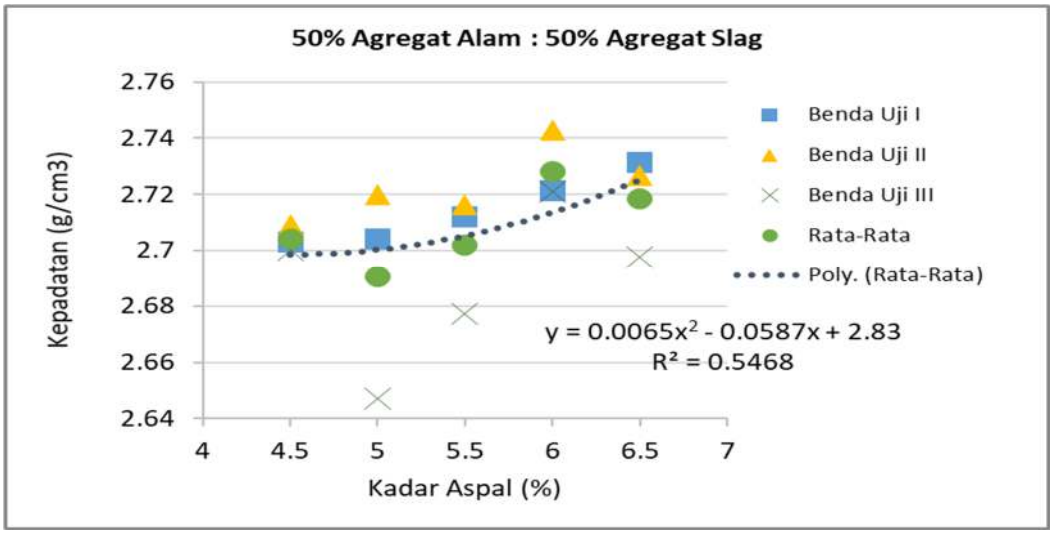
Karakteristik Campuran	Kadar Aspal (%)					Spesifikasi
	4.5	5	5.5	6	6.5	
Stabilitas (kg)	1028.48	1031.09	991.67	910.89	861.05	≥ 800kg
Flow (mm)	4.02	4.22	4.32	5.66	6.07	2-4
VIM (%)	20.30	19.91	19.63	19.24	17.98	3-5
VMA (%)	35.77	36.72	37.73	38.63	38.87	≥ 14
VFB (%)	43.27	45.84	47.99	50.21	53.74	≥ 65
MQ (kg/mm)	255.61	246.90	240.94	184.00	142.97	≥ 250
Kepadatan (g/cm3)	3.07	3.04	3.01	2.98	2.98	

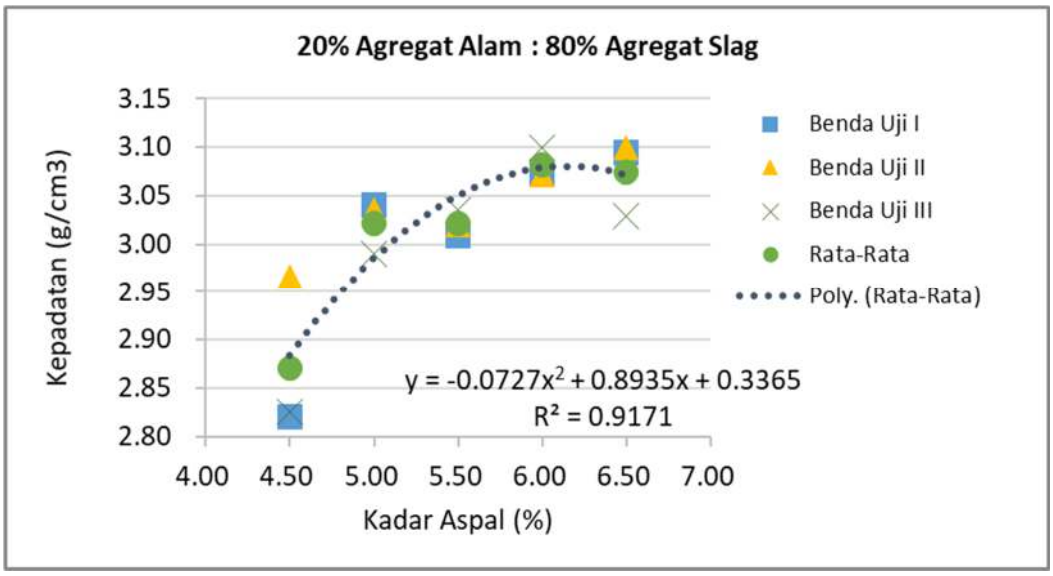
Nilai karakteristik Marshall tersebut merupakan parameter yang akan menentukan dalam pencarian kadar aspal optimum (KAO) pada campuran. Penggunaan gradasi, variasi agregat buatan, serta kadar aspal akan memberikan nilai volumetric yang berbeda-beda pada campuran aspal. Berikut adalah analisis terhadap nilai karakteristik Marshall pada tiap variasi agregat:

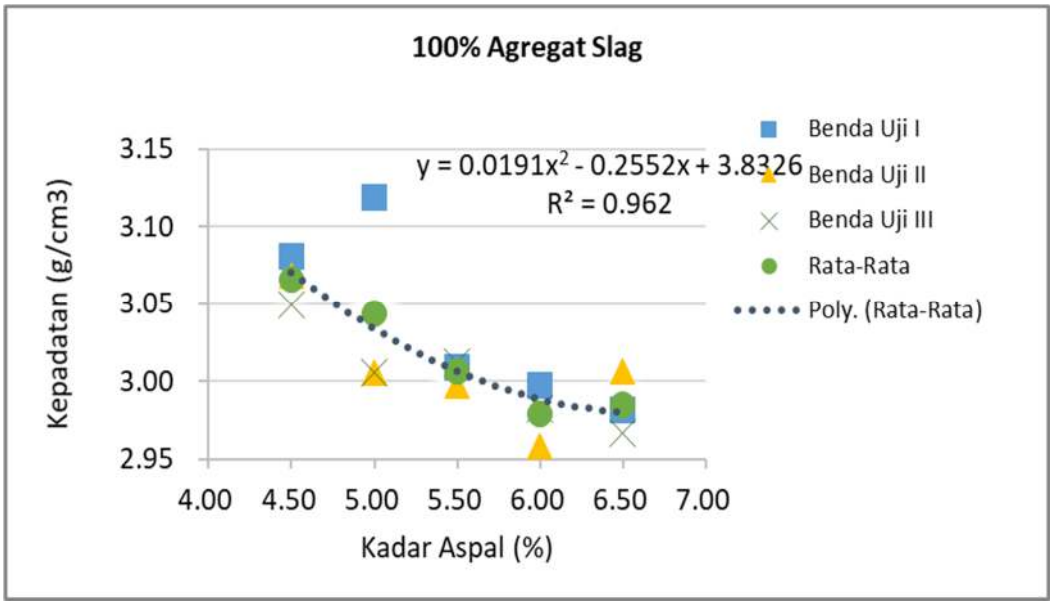
1. Kepadatan (Density)

Nilai density adalah perbandingan antara berat kering dengan volume benda uji campuran aspal beton. Gambar 4.1 adalah grafik nilai density di semua variasi campuran.







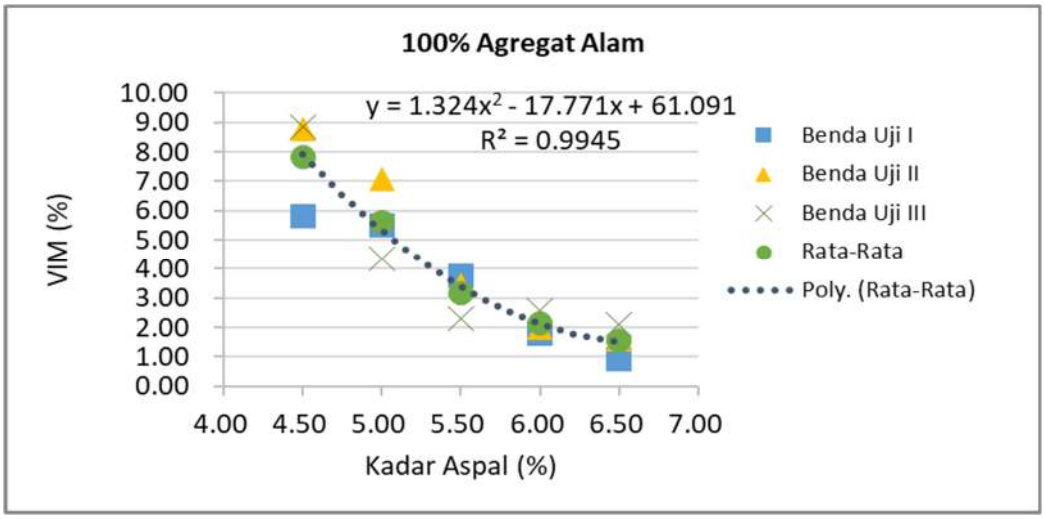


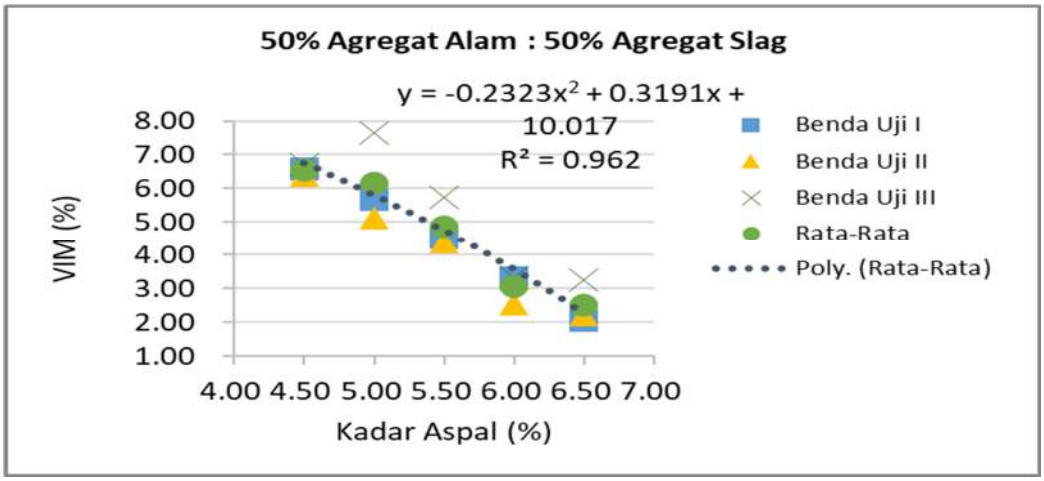
Gambar 4.1 Grafik Kepadatan (*Density*)

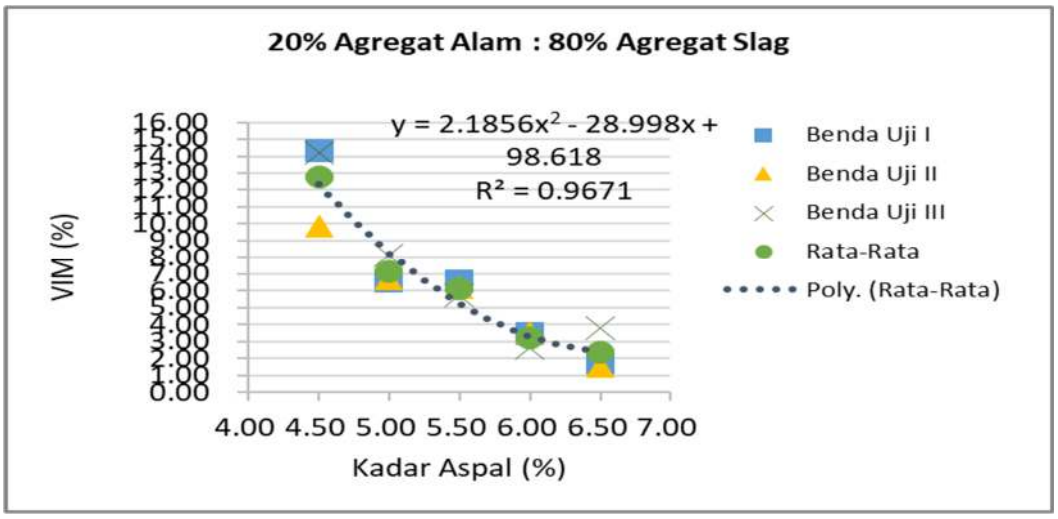
Berdasarkan grafik diatas, nilai kepadatan campuran yang didapatkan pada setiap penambahan kadar slag steel semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena nilai berat jenis steel slag lebih besar dari berat jenis agregat alam, sehingga semakin banyak steel slag yang digunakan, maka nilai kepadatan akan semakin meningkat. Nilai kepadatan Tertinggi terdapat pada variasi campuran 20% agregat alam : 80% agregat slag pada kadar aspal 6% dan nilai kepadatan terendah terdapat pada variasi 100% agregat alam pada kadar aspal 4,5%.

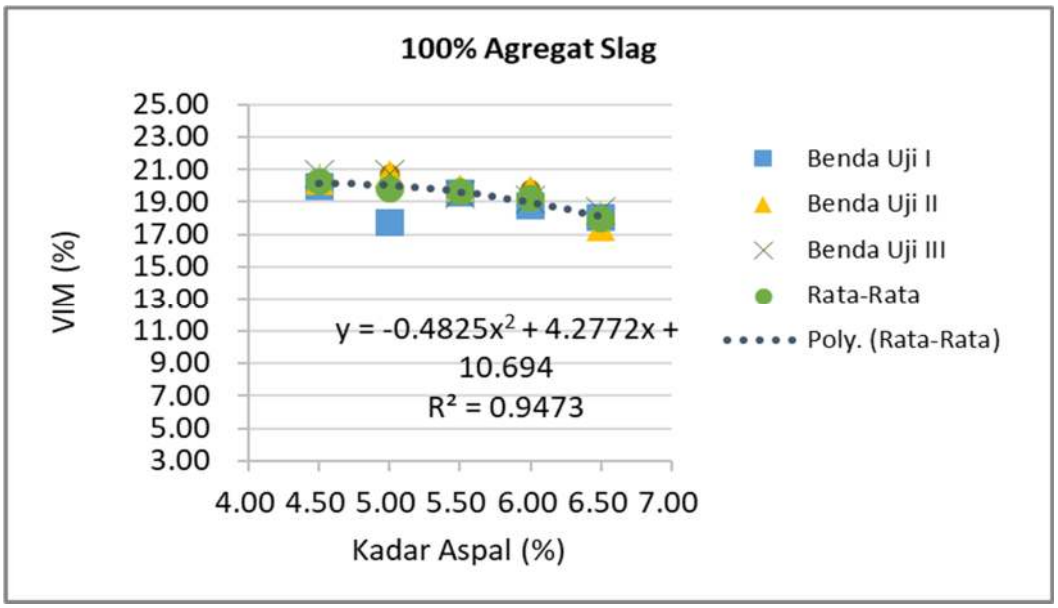
2. Rongga dalam Campuran (*Voids in Mixture*)

VIM adalah banyaknya rongga atau pori dalam campuran yang dinyatakan dalam persentase terhadap volume aspal padat. VIM yang dimaksud adalah banyaknya pori diantara butir-butir agregat yang diselimuti aspal. Hubungan kadar aspal dan VIM ditunjukkan pada Gambar 4.2 :









Gambar 4.2 Grafik Rongga dalam Campuran (VIM)

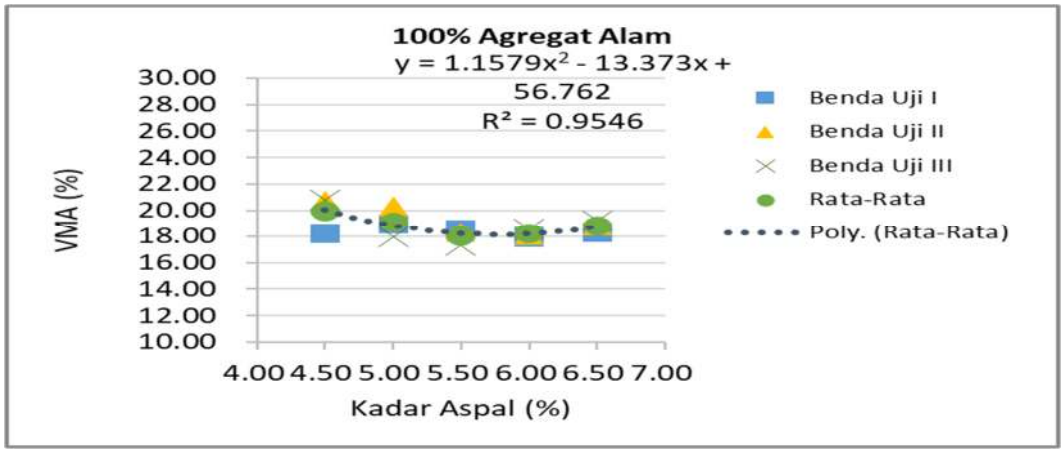
Berdasarkan Gambar 4.2 diatas, nilai VIM semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kadar *slag steel* pada campuran, hal ini dikarenakan karakteristik *slag steel* yang bersifat *porous* sehingga membuat volume rongga dalam campuran lebih banyak. Dapat dilihat bahwa seiring dengan bertambahnya kadar aspal, maka nilai VIM menjadi semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa seiring bertambahnya kadar aspal, maka aspal tersebut akan mengisi rongga-rongga yang tersisa sehingga jumlah rongga semakin berkurang.

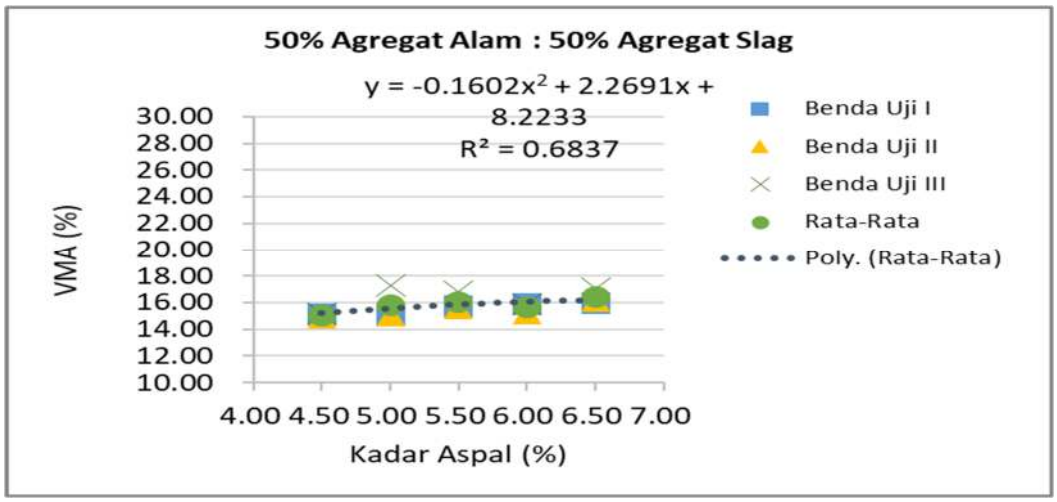
Nilai VIM tertinggi terdapat pada variasi campuran 100% *slag steel* dengan kadar aspal 4,5%, nilai VIM terendah terdapat pada campuran 100% agregat alam pada kadar aspal 6,5%. Nilai VIM yang tinggi akan berakibat pada keawetan

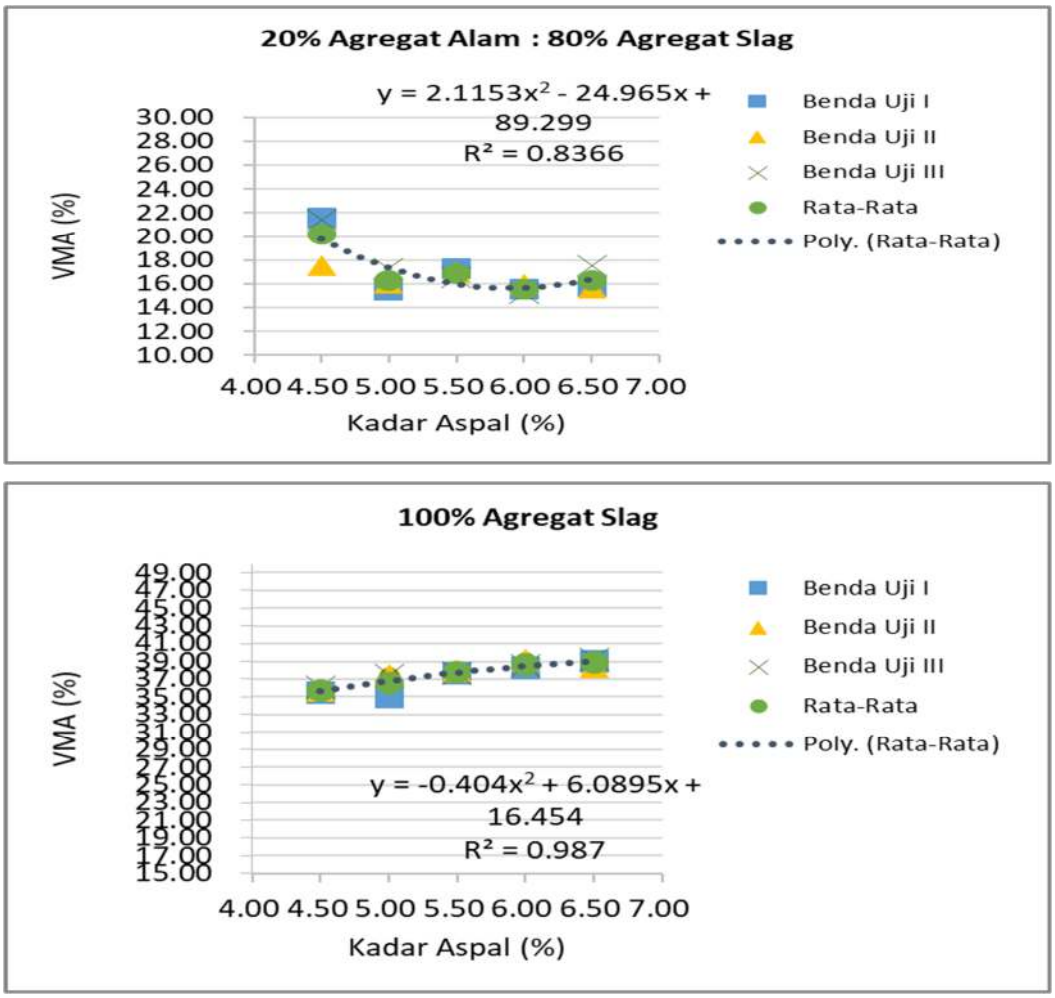
campuran, rongga yang terlalu besar akan lebih mudah di isi oleh air dan udara, jika hal ini terjadi maka agregat yang ada pada campuran akan mengalami pelepasan. Namun bila nilai VIM terlalu kecil memiliki potensi terjadinya *bleeding.* Hal ini disebabkan tidak tersedianya ruang yang cukup untuk menampung aspal akibat pemadatan lanjutan oleh lalu lintas dan peningkatan temperatur. Untuk itu diperlukan nilai standar dimana berdasarkan spesifikasi Bina Marga 2018 untuk rongga udara campuran adalah sebesar 3%-5%.

3. Rongga dalam Agregat (*Voids in Mineral Aggregate*)

VMA adalah rongga udara yang ada diantara mineral agregat di dalam campuran perkerasan, dengan kata lain VMA adalah banyaknya pori diantara butir-butir agregat didalam beton aspal padat. Menurut standar spesifikasi Bina Marga 2018 persyaratan nilai VMA adalah ≥14%. Hubungan kadar aspal dan VMA dapat dilihat pada Gambar 4.3 dibawah ini.







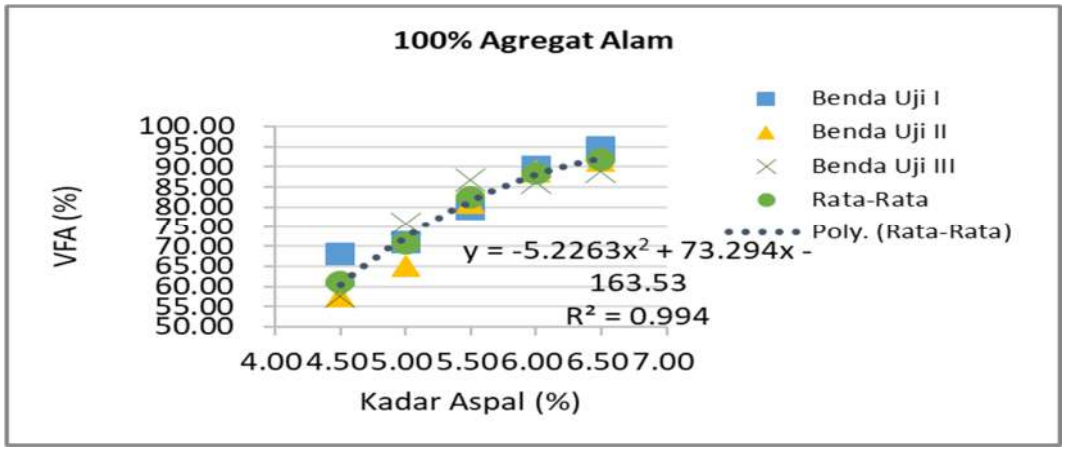
Gambar 4.3 Grafik Rongga dalam mineral agregat (VMA)

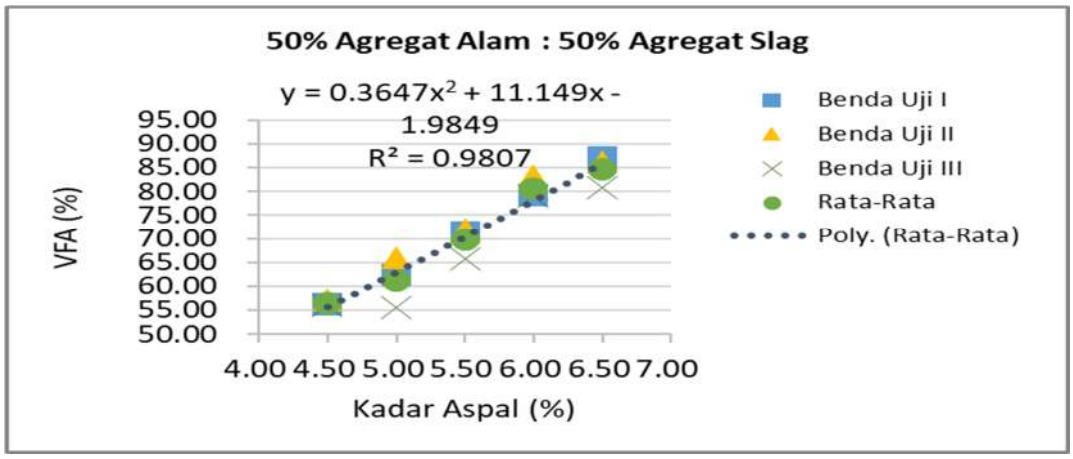
Berdasarkan Gambar 4.3 diatas ditunjukkan bahwa semua variasi campuran memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 dengan persentase minimum 14%. Namun, nilai VMA pada beberapa campuran cenderung fluktuatif, kenaikan nilai VMA berkaitan dengan sifat fisis *slag steel* yang *porous*, sehingga dengan penambahan *kadar slag steel* 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.

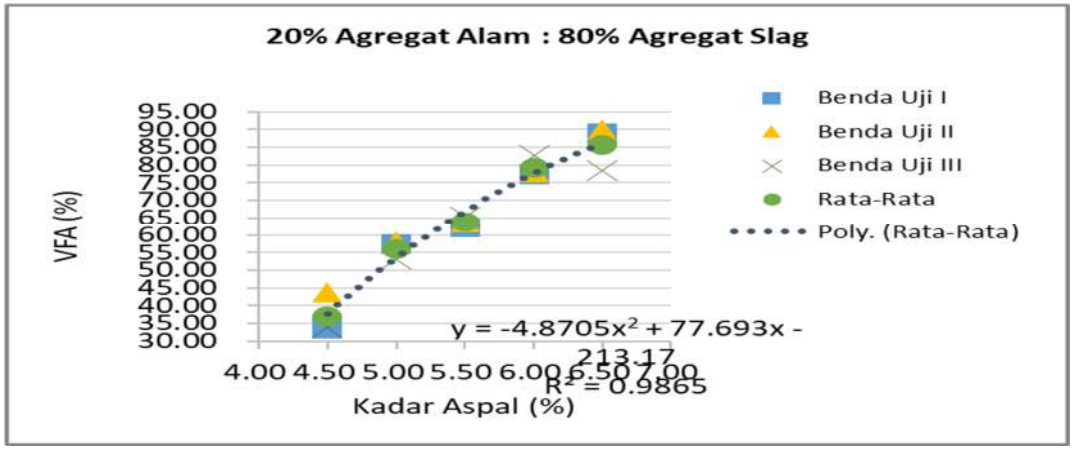
4. Rongga Terisi Aspal (*Voids Filled Asphalt*)

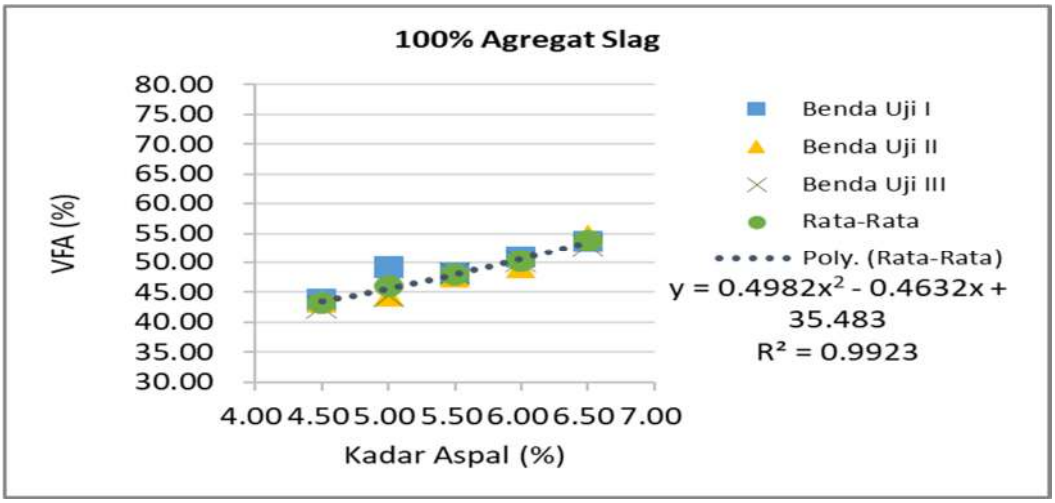
Banyaknya rongga antara butir agregat didalam beton aspal padat yang terisi aspal dinyatakan sebagai VFA. Rongga dalam campuran terjadi akibat adanya

ruang sisa antar butiran penyusun campuran. Menurut (Sukirman, 2007) nilai adalah bagian dari VMA yang terisi oleh aspal, tidak termasuk didalamnya aspal yang terabsorbsi oleh masing masing butir agregat. Dengan demikian aspal yang mengisi VFA adalah aspal yang berfungsi untuk menyelimuti butir butir agregat dalam beton aspal. Nilai VFA pada masing-masing variasi campuran dapat dilihat pada Gambar 4.4:









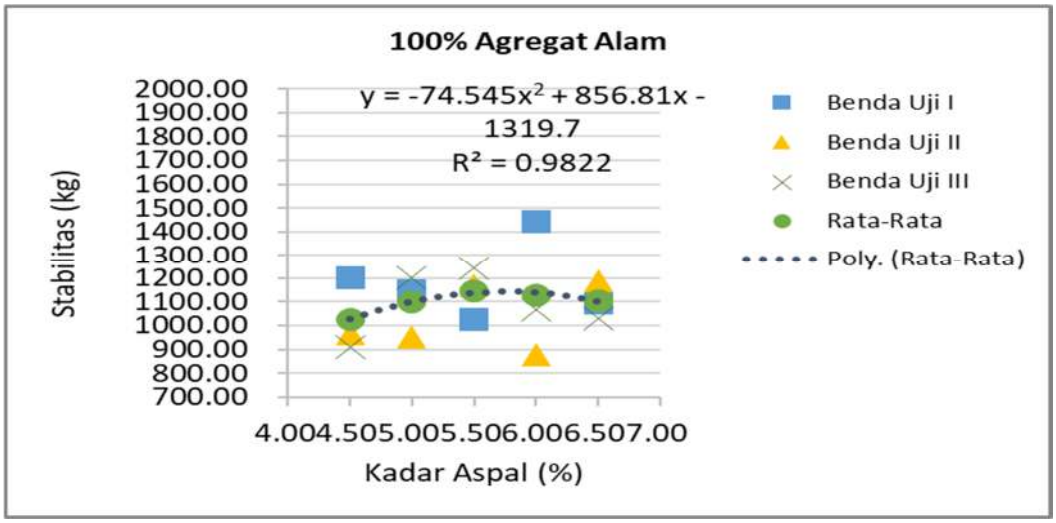
Gambar 4.4 Grafik rongga terisi aspal (VFA)

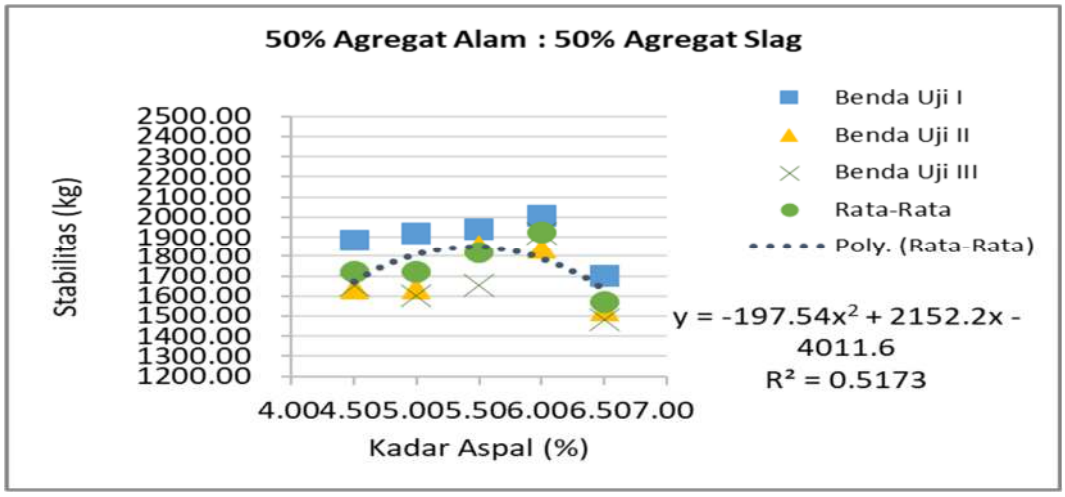
Pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa campuran mempunyai nilai VFA yang meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, hal ini disebabkan rongga dalam campuran mengecil karena bertambahnya kadar aspal yang meresap dan menyelimuti butiran agregat. Namun, nilai VFA mengalami penururan seiring bertambahnya kadar slag yang digunakan dalam campuran agregat. Hal ini dikarenakan semakin banyaknya agregat slag yang digunakan akan semakin banyak aspal yang terserap. Faktor lain yang mempengaruhi penurunan nilai VFA karena sifat *slag steel* yang berpori sehingga aspal mudah masuk kedalam rongga *slag steel*.

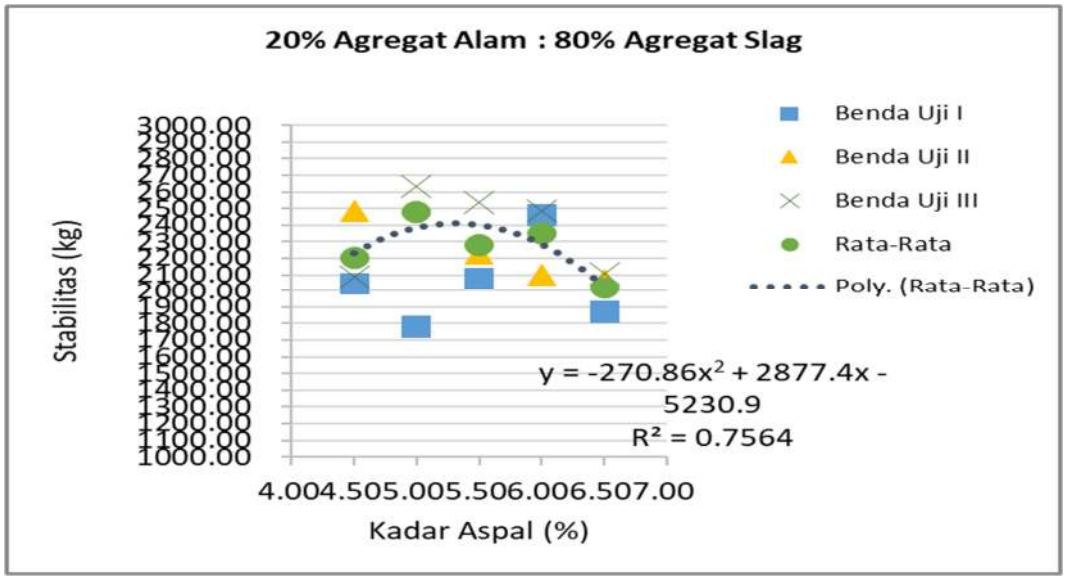
Pada variasi campuran 100% agregat slag nilai VFA tidak ada yang memenuhi standar Spesifikasi Bina Marga 2018 yaitu sebesar ≥65%, nilai VFA yang rendah akan mengurangi keawetan dalam campuran. Namun, bila nilai VFA terlalu tinggi akan menyebabkan terjadinya Bleeding karena rongga antar butiran terlalu kecil.

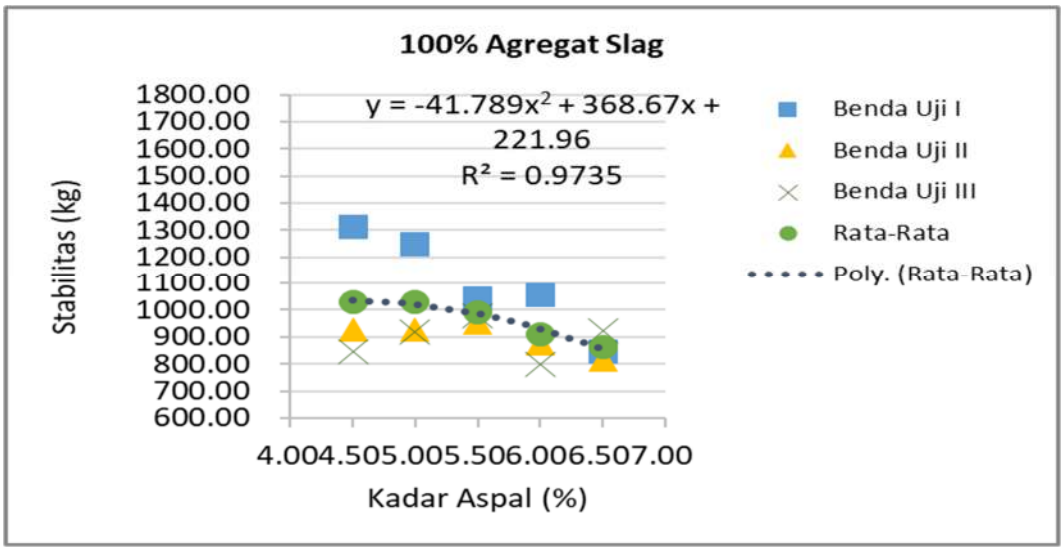
5. Stabilitas

Stabilitas campuran dalam pengujian *Marshall* ditujukan dengan pembacaan nilai stabilitas yang dikoreksi dengan angka tebal benda uji. Menurut Asphalt Institute (1989) Stabilitas merupakan kemampuan lapis perkerasan untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja di atasnya, tanpa mengalami perubahan bentuk seperti gelombang, alur, dan *bleeding.*


100% Agregat Alam
y = -74.545x² + 856.81x - 1319.7
R² = 0.9822
Stabilitas (kg)
2000.00
1900.00
1800.00
1700.00
1600.00
1500.00
1400.00
1300.00
1200.00
1100.00
1000.00
900.00
800.00
700.00
4.004.505.005.506.006.507.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)


50% Agregat Alam : 50% Agregat Slag
Stabilitas (kg)
2500.00
2400.00
2300.00
2200.00
2100.00
2000.00
1900.00
1800.00
1700.00
1600.00
1500.00
1400.00
1300.00
1200.00
4.004.505.005.506.006.507.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)
y = -197.54x² + 2152.2x - 4011.6
R² = 0.5173


20% Agregat Alam : 80% Agregat Slag
Stabilitas (kg)
3000.00
2900.00
2800.00
2700.00
2600.00
2500.00
2400.00
2300.00
2200.00
2100.00
2000.00
1900.00
1800.00
1700.00
1600.00
1500.00
1400.00
1300.00
1200.00
1100.00
1000.00
4.004.505.005.506.006.507.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)
y = -270.86x² + 2877.4x - 5230.9
R² = 0.7564

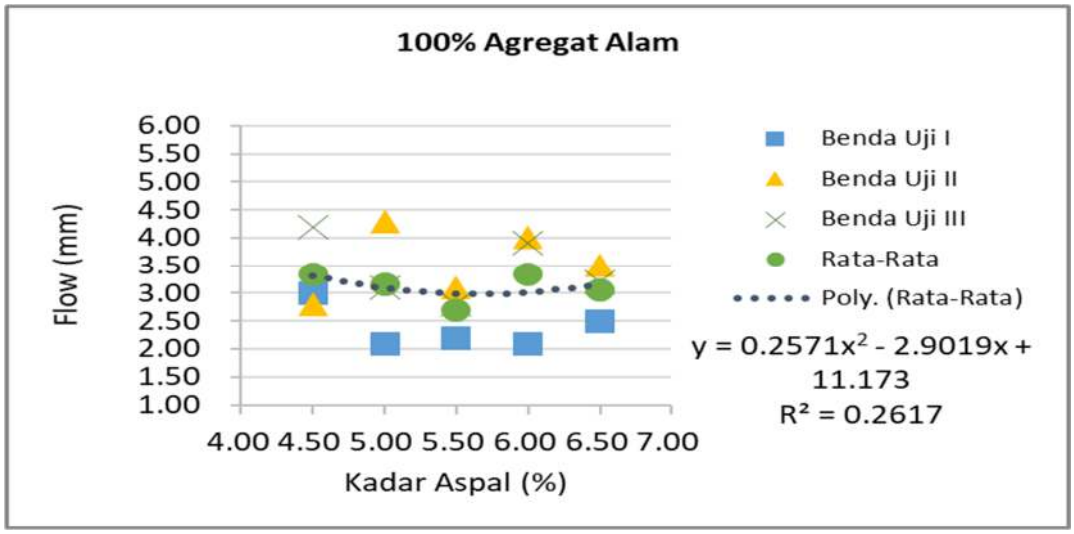


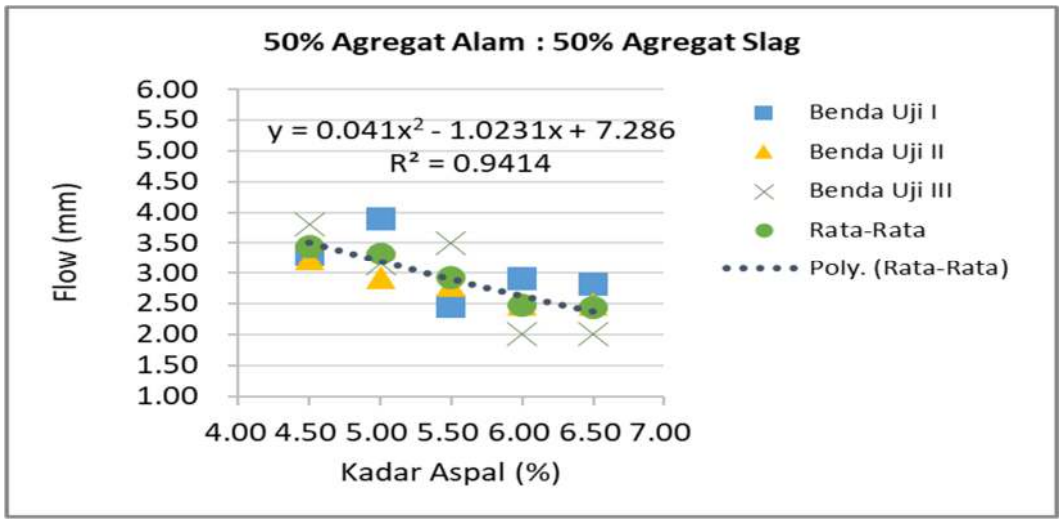
Gambar 4.5 Grafik Stabilitas pada setiap campuran

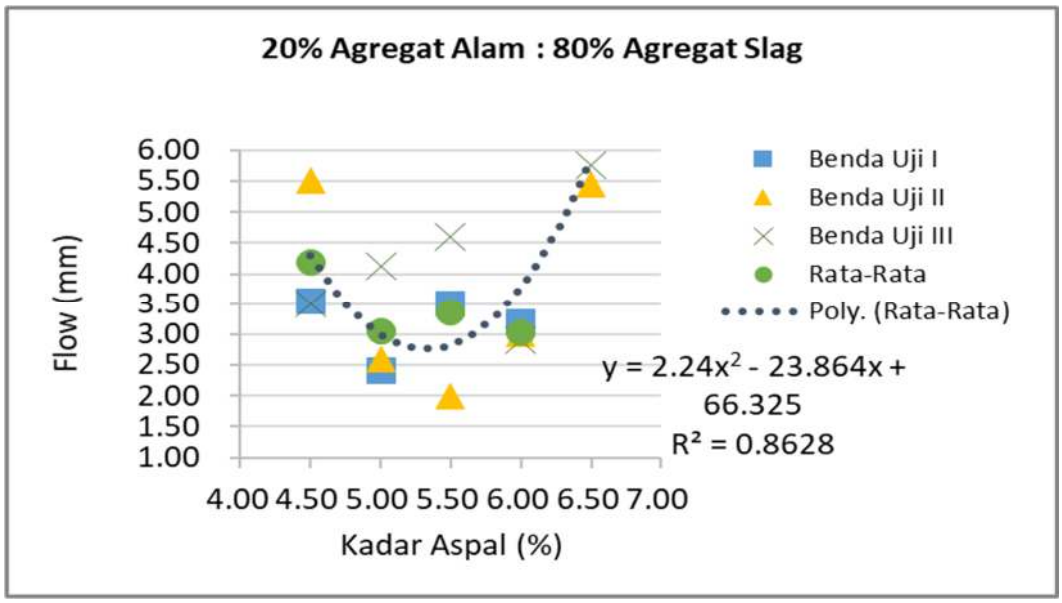
Penggunaan *Slag Steel* sebagai bahan campuran pada aspal mengalami peningkatan stabilitas sampai pada campuran 80% slag, dan mengalami penurunan pada campuran setelahnya. Stabilitas tertinggi terdapat pada variasi campuran 80% *Slag Steel* sebesar 2481,24 Kg, pada kadar aspal 5%. Stabilitas terendah terdapat pada campuran 100% slag sebesar 861,05 Kg pada kadar aspal 6,5%, berdasarkan standar Spesifikasi Bina Marga 2018 semua nilai stabilitas diatas memenuhi batas minimum yang ditetapkan yaitu sebesar 800 Kg. Stabilitas yang tinggi akan membuat perkerasan lebih mampu menahan deformasi diatasnya.

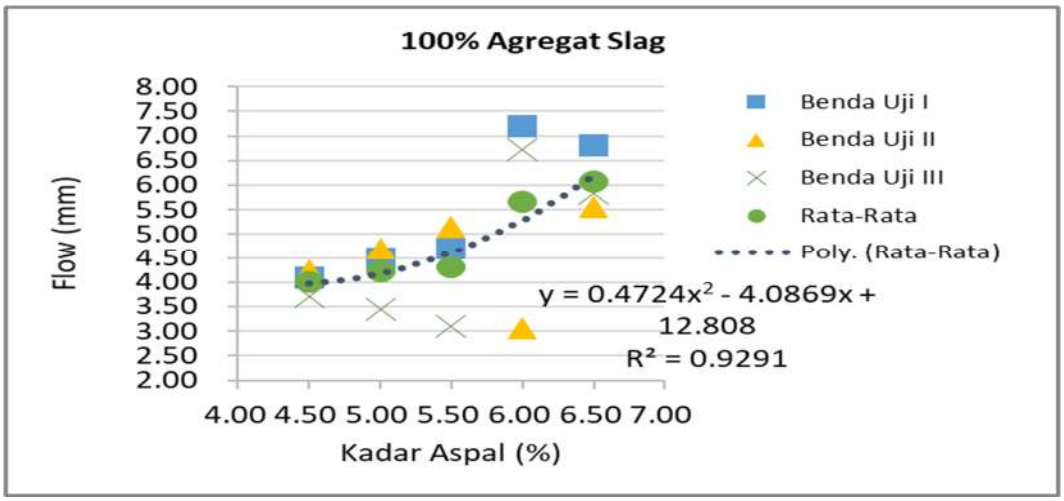
6. Kelelehan (Flow)

Kelelehan (*flow)* adalah fungsi dari kekakuan aspal pengikat dan kadar aspal campuran. Kelelehan 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.. Dari hasil pengujian didapatkan hubungan kadar aspal dengan kelelahan yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 dibawah ini.


100% Agregat Alam
Flow (mm)
6.00
5.50
5.00
4.50
4.00
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
4.00 4.50 5.00 5.50 6.00 6.50 7.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)
y = 0.2571x² - 2.9019x + 11.173
R² = 0.2617


50% Agregat Alam : 50% Agregat Slag
Flow (mm)
6.00
5.50
5.00
4.50
4.00
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
y = 0.041x² - 1.0231x + 7.286
R² = 0.9414
4.00 4.50 5.00 5.50 6.00 6.50 7.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)


20% Agregat Alam : 80% Agregat Slag
Flow (mm)
6.00
5.50
5.00
4.50
4.00
3.50
3.00
2.50
2.00
1.50
1.00
4.00 4.50 5.00 5.50 6.00 6.50 7.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)
y = 2.24x² - 23.864x + 66.325
R² = 0.8628

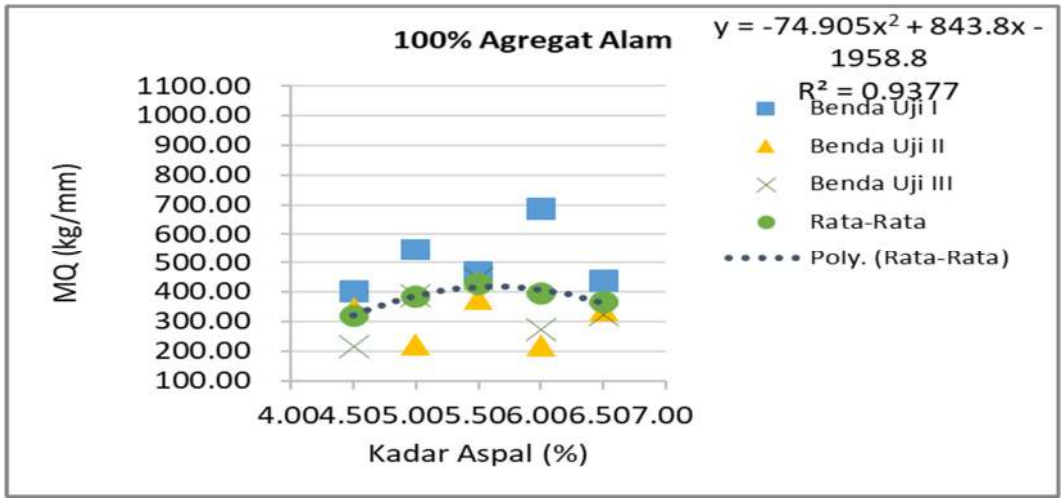


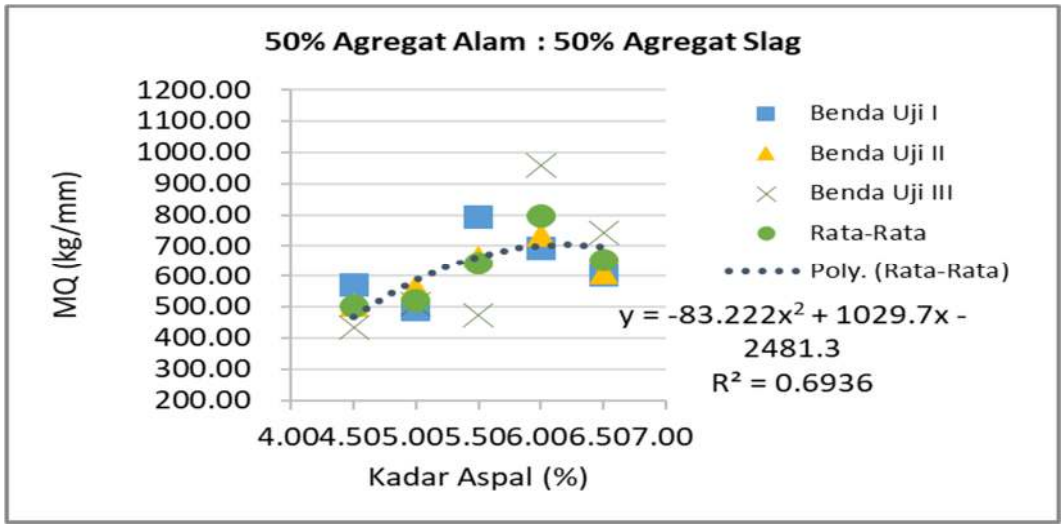
Gambar 4.6 Grafik Kelelehan (*Flow*) pada setiap campuran

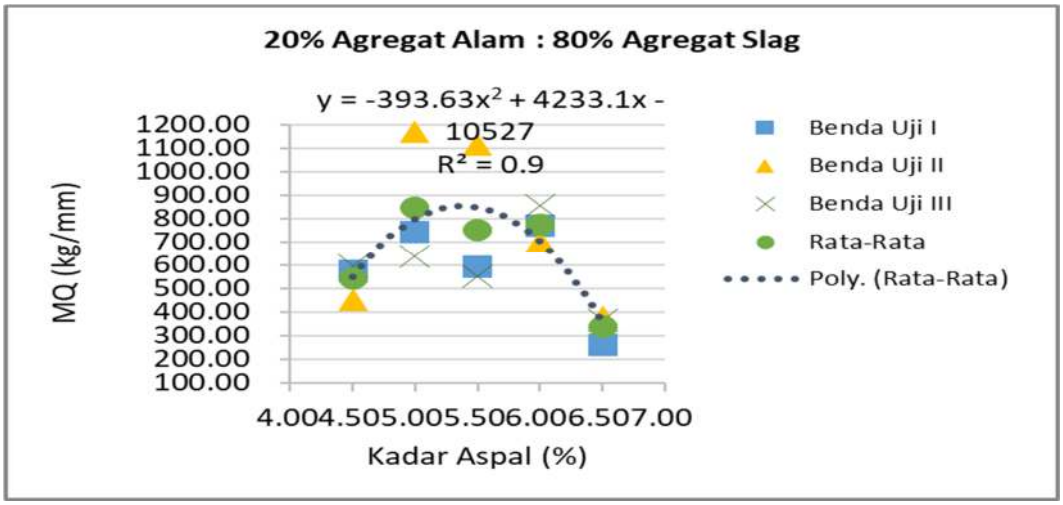
Dari grafik Flow diatas dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya kadar aspal pada campuran maka nilai kelelehan semakin meningkat, hal ini disebabkan karena dengan bertambahnya kadar aspal campuran menjadi semakin plastis. Sesuai sifat aspal sebagai bahan pengikat, semakin banyak kadar aspal yang meyelimuti agregat maka semakin baik ikatan antar agregat. Dalam hal ini campuran masih memenuhi standar yang ditetapkan Bina Marga 2018 yaitu berkisar antara 2 mm – 4 mm. Suatu campuran dengan *Flow* yang tinggi akan cenderung labih lembek, sehingga mudah berubah bentuk jika menerima beban diatasnya. Sebaliknya jika *Flow* rendah maka campuran semakin kaku dan mudah retak jika meneriam beban melampaui daya dukungnya.

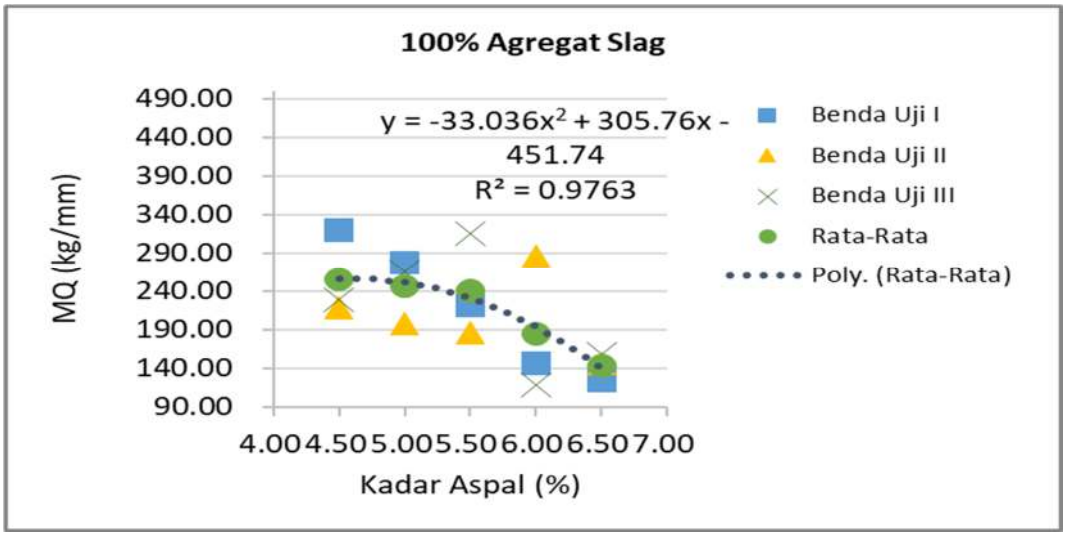
7. *Marshall Quotient* (*MQ*)

Nilai *Marshall Quotient* (*MQ*) merupakan hasil bagi antara stabilitas dengan kelelehan (*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 perkerasnnya semakin lentur. Grafik nilai MQ pada gradasi rapat dapat dilihat pada Gambar 4.7:


100% Agregat Alam
y = -74.905x² + 843.8x - 1958.8
R² = 0.9377
MQ (kg/mm)
1100.00
1000.00
900.00
800.00
700.00
600.00
500.00
400.00
300.00
200.00
100.00
4.004.505.005.506.006.507.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)


50% Agregat Alam : 50% Agregat Slag
MQ (kg/mm)
1200.00
1100.00
1000.00
900.00
800.00
700.00
600.00
500.00
400.00
300.00
200.00
4.004.505.005.506.006.507.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)
y = -83.222x² + 1029.7x - 2481.3
R² = 0.6936


20% Agregat Alam : 80% Agregat Slag
y = -393.63x² + 4233.1x - 10527
R² = 0.9
MQ (kg/mm)
1200.00
1100.00
1000.00
900.00
800.00
700.00
600.00
500.00
400.00
300.00
200.00
100.00
4.004.505.005.506.006.507.00
Kadar Aspal (%)
Benda Uji I
Benda Uji II
Benda Uji III
Rata-Rata
Poly. (Rata-Rata)

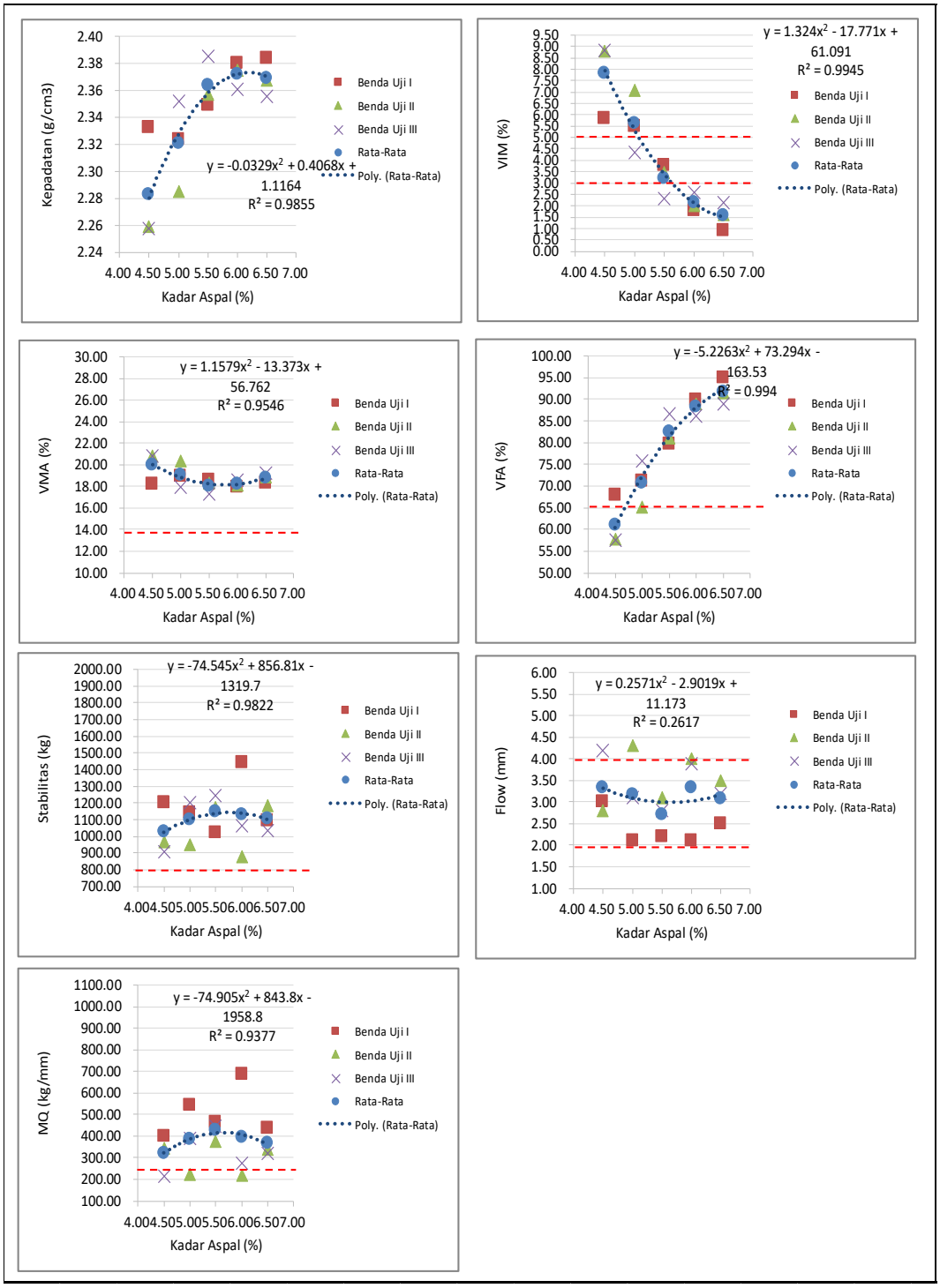


Gambar 4.7 Grafik *Marshall Quotient* (MQ)

Pada Grafik diatas dapat dilihat nilai MQ yang tidak memenuhi persyaratan hanya pada campuran 100% slag, spesifikasi Bina Marga 2018 menetapkan batasan minimum nilai MQ adalah sebesar ≥250 Kg/mm. Campuran yang memiliki nilai MQ yang rendah cenderung plastis dan lentur sehingga mudah mengalami perubahan bentuk pada saat menerima beban diatasnya. Sedangkan campuran yang memiliki nilai MQ yang tinggi cenderung bersifat kaku.

4.4.2 Penentuan Kadar Aspal Optimum dengan Metode *Marshall*

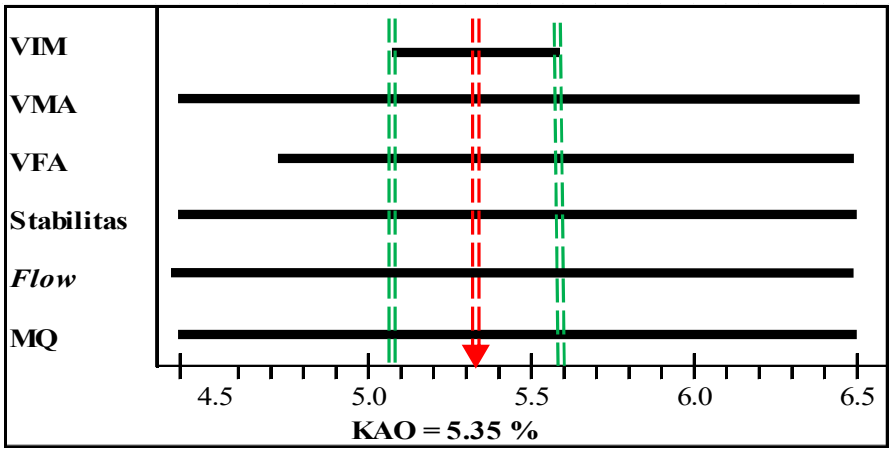
Berdasarkan hasil spesifikasi campuran, telah diperoleh data-data untuk menentukan kadar aspal optimum suatu campuran. Kadar aspal optimum dilihat dari grafik tiap parameter Marshall yang memberikan hasil terbaik, meliputi nilai kepadatan, VIM, VMA, VFA, stabilitas, flow dan MQ. Berikut adalah rekapitulasi grafik parameter pada setiap variasi agregat:



Gambar 4.8 Grafik Parameter Marshall 100% Agregat Alam

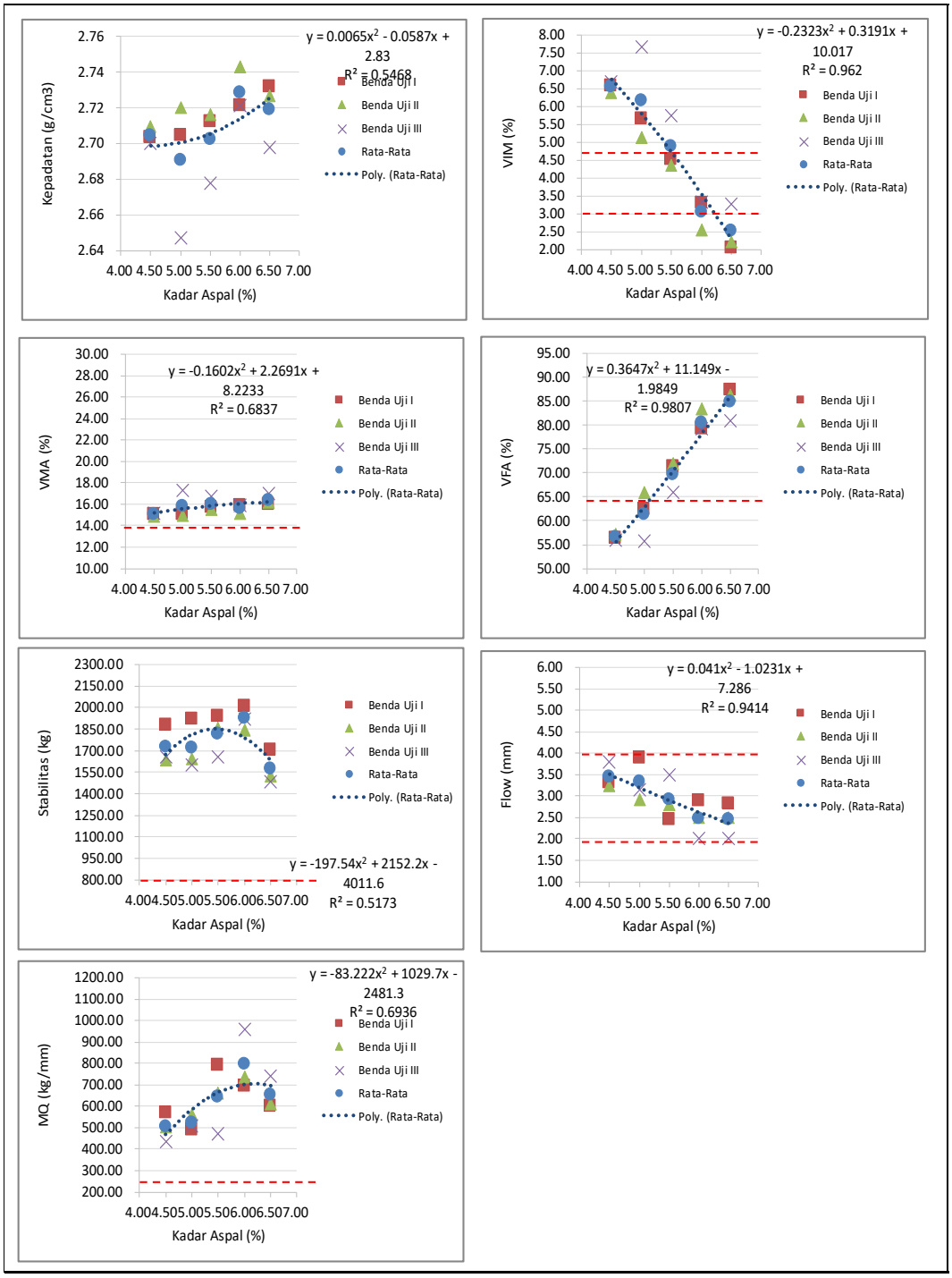
Pada Gambar 4.8 dapat dilihat nilai Kepadatan, Stabilitas, VMA, Flow dan MQ memenuhi standar spesifikasi. Hanya nilai VIM dan VFA tidak memenuhi spesifikasi pada kadar aspal tertentu, nilai VIM yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 berada pada kadar aspal 5,1% - 5,6% dan nilai VFA yang memenuhi

spesifikasi berada pada kadar aspal 4,7% - 6,5%. Dapat dilihat bahwa yang memenuhi seluruh parameter Marshall berada pada kadar aspal 5,1% - 5,6%. Sehingga diperoleh kadar aspal optimum dari rata-rata kedua kadar aspal tersebut sebesar 5,35%



Gambar 4.9 Penentuan Kadar Aspal Optimum 100% Agregat Alam

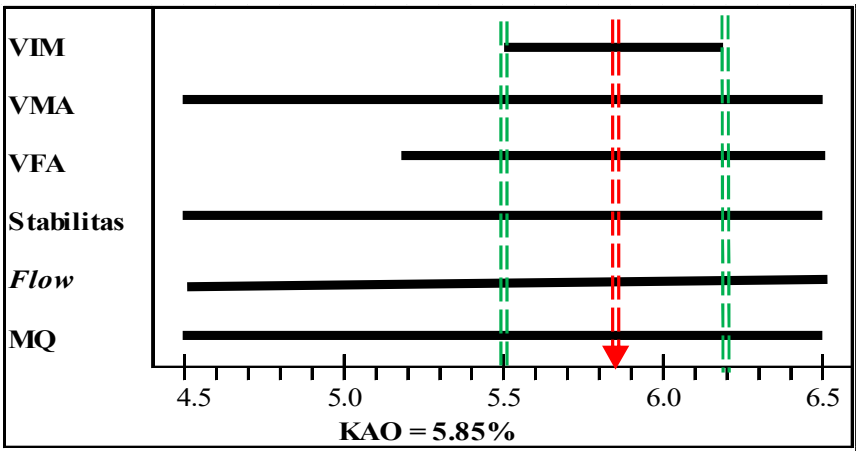
Untuk kadar aspal optimum pada variasi campuran 50% agregat slag : 50% agregat alam, dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Parameter Marshall 50% Slag : 50% Agregat Alam

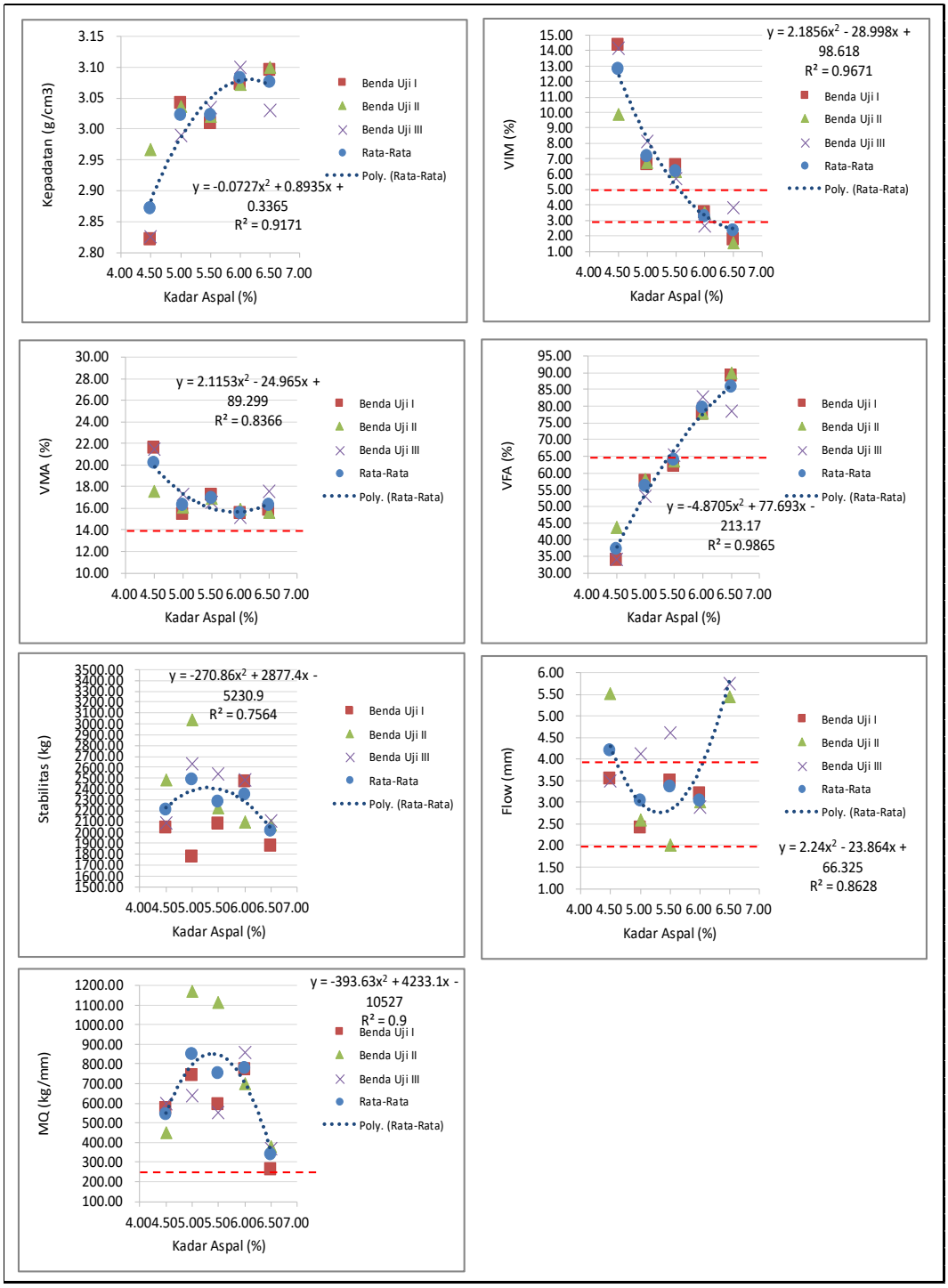
Pada Gambar 4.10 diatas dapat dilihat nilai VIM dan VFA hanya memenuhi persyaratan pada kadar apal tertentu. Namun nilai VMA, Stabilitas, Flow dan MQ pada semua variasi kadar aspal telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Nilai VIM yang memenuhi persyaratan berkisar pad kadar aspal 5,5% - 6,2%, sedangkan

untuk Nilai VFA yang memenuhi persyaratan berkisar pada kadar aspal 5,2% - 6,5%. Oleh karena itu diperoleh kadar aspal optimum pada campuran ini sebesar 5,85%. Untuk penentuan KAO dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



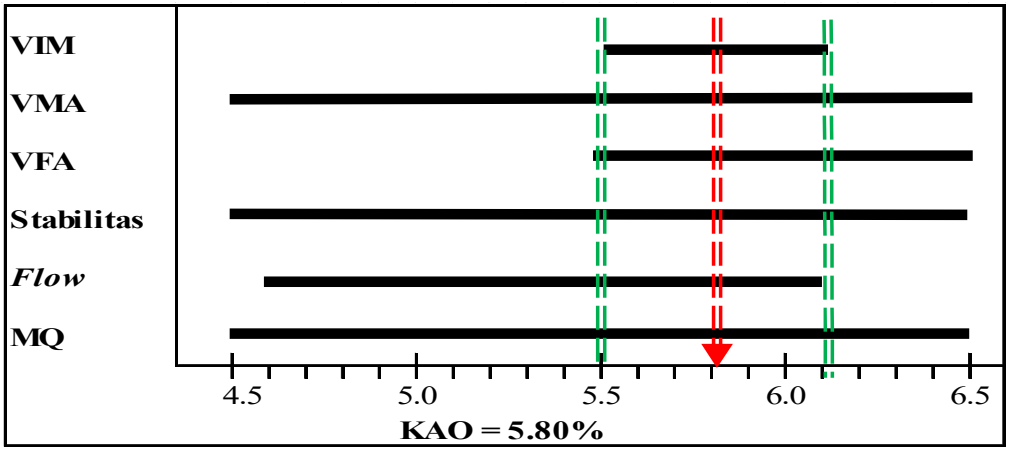
Gambar 4.11 Penentuan Kadar Aspal Optimum 50% Agregat Slag

Untuk penentuan kadar aspal optimum pada variasi campuran 80% agregat slag : 20% agregat alam ditunjukan pada Gambar 4.12. Dapat dilihat bahwa nilai VMA, Stabilitas, Flow, dan MQ cenderung memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Sedangkan untuk nilai VIM dan VFA memenuhi persyaratan hanya pada kadar aspal tertentu. Nilai VIM berkisar antara 5,5% - 6,1% dan nilai VFA yang memenuhi persyaratan berada pada kadar aspal 5,5 – 6,5%.



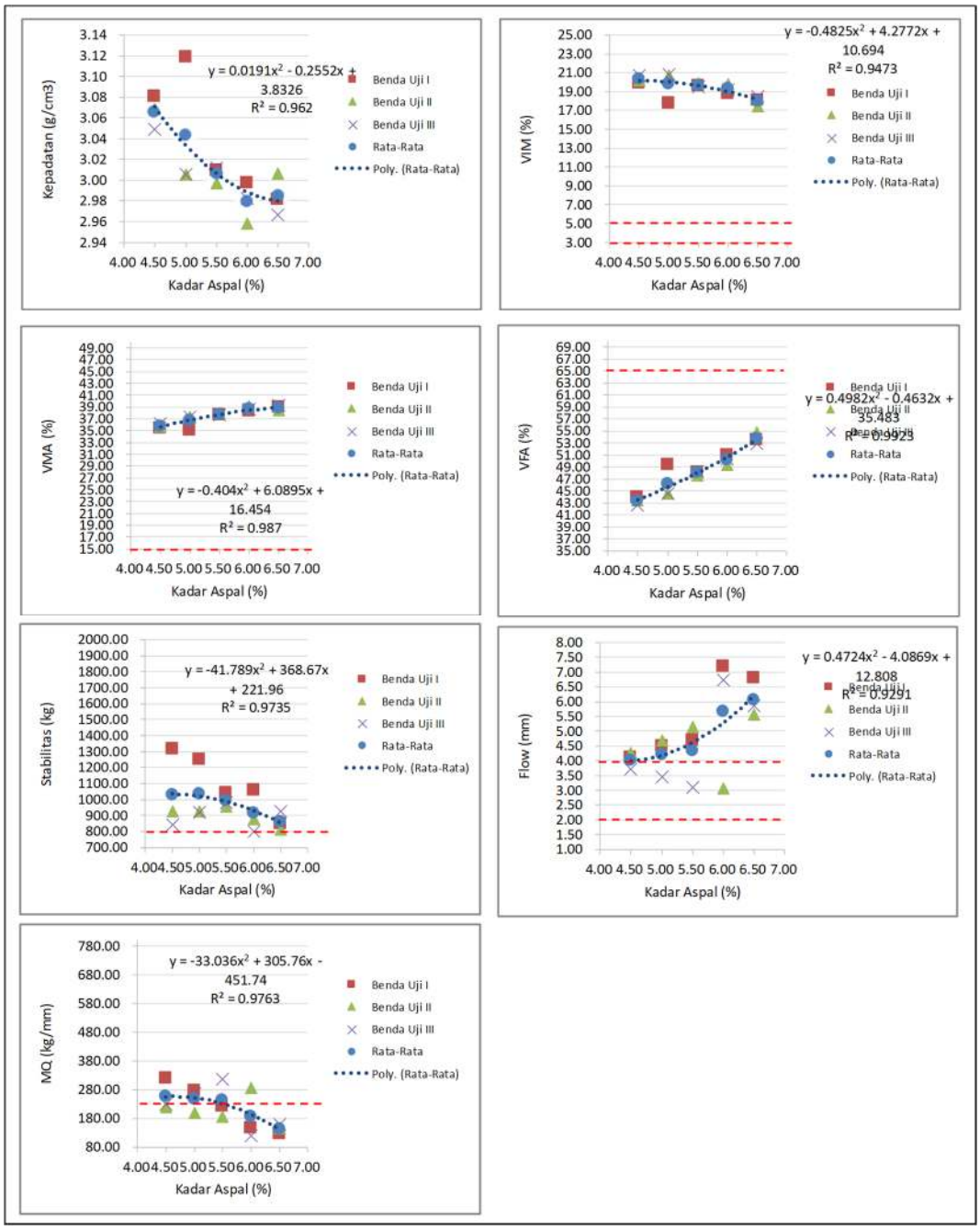
Gambar 4.12 Grafik Parameter Marshall 80% Slag : 20% Agregat Alam

Kadar aspal yang memenuhi semua parameter marshall berkisar antara 5,5% - 6,1%. Oleh karena itu diambil nilai rata-rata pada rentang kadar aspal tersebut dan didapat nilai kadar aspal optimum sebesar 5,80%. Penentuan KAO dapat dilihat pada Gambar 4.13



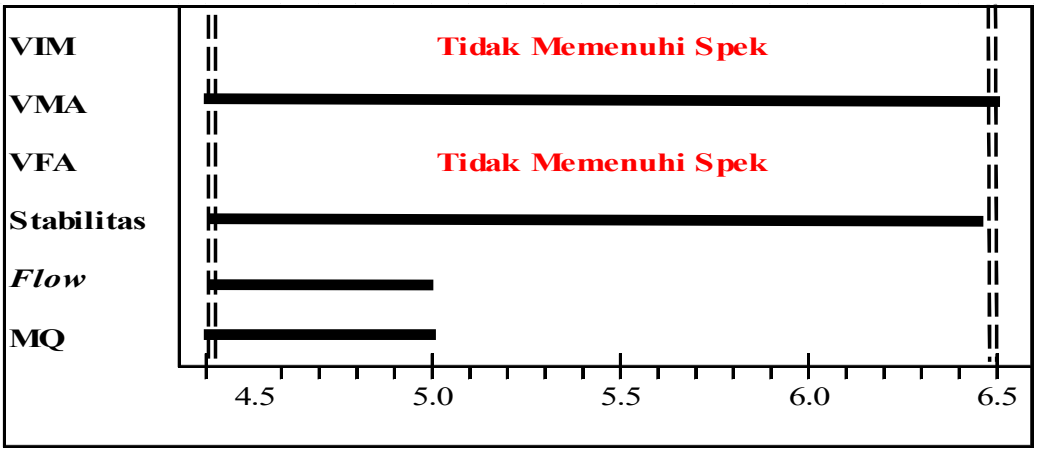
Gambar 4.13 Penentuan Kadar Aspal Optimum 80% Agregat Slag

Untuk penentuan kadar aspal optimum pada variasi campuran 100% agregat slag ditunjukan pada gambar 4.14. Dapat dilihat bahwa nilai VMA, Stabilitas, Flow, dan MQ cenderung masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Namun untuk nilai VIM dan VFA tidak ada yang memenuhi persyaratan yang ditetapkan Bina Marga 2018. Rekapitulasi grafik Marshall untuk variasi 100% slag steel dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik Parameter Marshall 100% Slag Steel

Dapat dilihat pada Gambar 4.14 Nilai VIM dan VFA tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan Bina Marga 2018. Persyaratan nilai VIM ada pada rentang 3% - 5%, nilai VIM pada semua kadar aspal melampaui batas atas yang ditetapkan. Sedangkan persyaratan yang ditetapkan untuk nilai VFA ≥65%. Oleh karena itu pada Variasi 100% slag steel, KAO tidak dapat didefenisikan karena nilai VIM >5 dan nilai VFA <65%.



Gambar 4.15 Penentuan Kadar Aspal Optimum 100% Agregat Slag

4.4.3 Pengujian Perendaman Marshall (KAO)

Pengujian Marshall pada kadar aspal optimum (KAO) dilakukan untuk mengetahui karakteristik Marshall terbaik pada tiap variasi campuran. Pengujian Marshall KAO hanya pada variasi yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018. Prosedur pengerjaanya sama dengan *Marshall Test,* namun campuran aspal yang digunakan hanya pada kadar aspal optimum. Dari hasil pengujian ini akan diperoleh campuran variasi agregat buatan yang layak digunakan pada perkerasan lentur lapisan AC-BC. Berikut ini adalah rekapitulasi data–data parameter Marshall pada rendaman 30 menit.

Tabel 4.17 Rekapitulasi Marshall Perendaman 30 menit (100% Agregat Alam)

No	Karakteristik Campuran	Hasil	Spesifikasi
1	Kadar Aspal Optimum (%)	5.350	-
2	Kepadatan (g/cm3)	2.37	-
3	Flow (mm)	3.85	2-4
4	VIM (%)	3.1	3-5
5	VMA (%)	17.62	≥ 14
6	VFA (%)	82.42	≥ 65
7	Stabilitas (Kg)	1245.21	≥ 800Kg
8	MQ (kg/mm)	323.66	≥ 250

Tabel 4.18 Rekapitulasi Marshall Perendaman 30 menit (50% Agregat Slag)

No	Karakteristik Campuran	Hasil	Spesifikasi
1	Kadar Aspal Optimum (%)	5.850	-
2	Kepadatan (g/cm3)	2.7	-
3	Flow (mm)	3.22	2-4
4	VIM (%)	4.06	3-5
5	VMA (%)	21.63	≥ 14
6	VFA (%)	81.26	≥ 65
7	Stabilitas (Kg)	1937.06	≥ 800Kg
8	MQ (kg/mm)	603.38	≥ 250

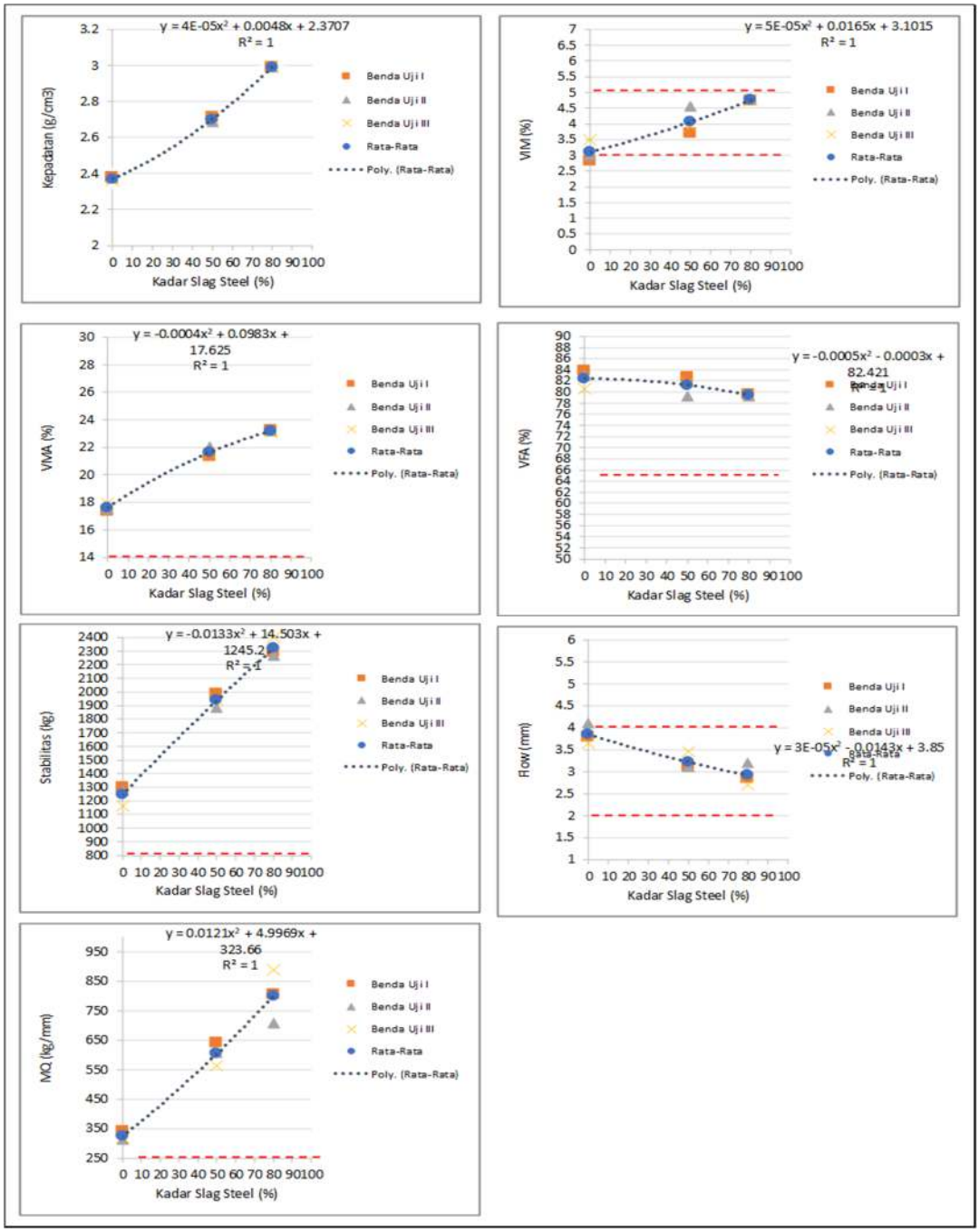
Tabel 4.19 Rekapitulasi Marshall Perendaman 30 menit (80% Agregat Slag)

No	Karakteristik Campuran	Hasil	Spesifikasi
1	Kadar Aspal Optimum (%)	5.800	-
2	Kepadatan (g/cm3)	2.99	-
3	Flow (mm)	2.92	2-4
4	VIM (%)	4.76	3-5
5	VMA (%)	23.16	≥ 14
6	VFA (%)	79.47	≥ 65
7	Stabilitas (Kg)	2320.19	≥ 800Kg
8	MQ (kg/mm)	800.66	≥ 250

Dapat dilihat Pada Tabel 4.17 - 4.19 nilai karakteristik marshall yang dihasilkan pada masing-masing kadar aspal optimum. Pengaruh slag memberikan hasil yang berbeda pada setiap variasi campuran, hasil pengujian dengan menggunakan kadar aspal optimum menunjukan semua variasi campuran telah memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan Bina Marga 2018.

4.4.4 Pengaruh Slag Steel Terhadap Karakteristik Campuran

Berikut ini adalah analisa pengaruh penambahan agregat slag steel terhadap campuran:



Gambar 4.16 Pengaruh Slag Steel Terhadap Karakteristik Marshall

1. Pengaruh penggunaan Slag Steel terhadap nilai Kepadatan.

Pada Gambar 4.16 dapat dilihat perbandingan nilai kepadatan pada setiap variasi campuran. Nilai kepadatan terus mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar slag steel dalam campuran. Kepadatan tertinggi terdapat pada penambahan campuran 80% slag steel sebesar 2.99 gram/cm^3. Hal ini disebabkan karena berat jenis dari slag steel lebih besar dari berat jenis agregat alam, sehingga semakin banyak kadar slag steel yang digunakan maka nilai kepadatan dalam campuran akan semakin meningkat.

2. Pengaruh penggunaan Slag Steel terhadap nilai VIM

Pada Gambar 4.16 dapat dilihat nilai rongga dalam campuran (VIM) pada ketiga variasi campuran memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Pada variasi 100% agregat alam nilai VIM sebesar 3.10%. Sedangkan nilai VIM pada penambahan 50% slag steel sebesar 4.06% dan nilai tertinggi terdapat pada variasi penambahan 80% slag steel sebesar 4.76%. Nilai VIM terus mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar slag steel didalam campuran, hal ini disebabkan karena slag steel bersifat *porous* sehingga menyebabkan volume rongga didalam campuran lebih banyak. Nilai VIM berpengaruh terhadap nilai durabilitas pada campuran serta diperlukan agar memberikan cukup ruang untuk proses pemadatan yang disebabkan oleh beban lalu lintas. Maka dari itu nilai VIM sangat menentukan karakteristik campuran.

3. Pengaruh penggunaan Slag Steel terhadap nilai VMA

Dari gambar diatas dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan slag steel terhadap campuran AC-BC memberikan nilai VMA lebih tinggi dari pada natural agregat. Nilai VMA tertinggi yaitu pada variasai 80% slag steel sebesar 23.16% dan nilai teredah terdapat pada variasi 100% agregat alam sebesar 17.62%. Nilai VMA terus mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar slag steel, hal ini disebabakan karena sifat slag steel yang memiliki rongga (*porous*) sehingga fraksi agregat halus pada campuran tidak mengisi rongga yang kosong antar agregat.

Nilai VMA yang mendekati batas minimum menunjukan bahwa campuran lebih memiliki keawetan, sedangkan nilai VMA yang terlalu tinggi akan mengakibatkan campuran mengalami deformasi yang besar. Namun dalam hal ini nilai VMA pada masing-masing variasi campuran masih memenuhi spesifikasi yang ditetapkan Bina Marga 2018 sebesar ≥14%.

4. Pengaruh penggunaan Slag Steel terhadap nilai VFA

Dari grafik diatas menunjukan perbandingan nilai VFA pada masing-masing variasi campuran telah memenuhi batas minimum Bina Marga 2018 sebesar ≥65%. Nilai VFA tertinggi terdapat pada variasi 100% agregat alam sebesar 82,42%, dan nilai VFA terendah terdapat pada variasi campuran dengan penambahan 80% gregat slag steel yaitu sebesar 79,47%. Penggunaan agregat slag steel pada campuran cenderung mengalami penurunan pada nilai VFA, penurunan ini disebabkan karena sifat slag steel yang memiliki banyak rongga, sehingga partikel yang lebih kecil mengisi rongga pada agregat dan menyebabkan agregat tidak terselimuti oleh aspal dengan maksimal. Oleh karena itu penambahan agregat slag steel pada agregat kasar bisa digunakan pada perkerasan jalan.

5. Pengaruh penggunaan Slag Steel terhadap nilai Stabilitas

Penggunaan *slag steel* sebagai bahan campuran perkerasan cenderung mengalami peningkatan. Pada gambar 4.20 dapat dilihat stabilitas tertinggi terdapat pada campuran slag steel 80% sebesar 2320,19 Kg. Nilai stabilitas pada variasi 50% slag steel sebesar 1937,06 Kg dan nilai stabilitas terendah terdapat pada variasi 100% agregat alam yaitu sebesar 1245,21 Kg. Dapat dilihat nilai stabilitas pada masing-masing variasi masih memenuhi batas minimum yang ditetapkan sebesar ≥800 Kg.

Semakin banyak persentase agregat slag steel yang digunakan di dalam campuran, nilai stabilitas terus mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan karena sifat fisis agregat *slag steel* yang berongga dan berbentuk tidak beraturan sehingga menyebabkan terjadinya ikatan *(interlocking*) yang baik. Sehingga dengan penambahan kadar slag steel yang lebih tinggi akan mengakibatkan jalan lebih mampu menahan deformasi akibat beban lalu lintas yang bekerja diatasnya tanpa mengalami perubahan bentuk atau cenderung kaku.

6. Pengaruh penggunaan Slag Steel terhadap nilai kelelehan (*Flow*)

Pada gambar diatas menunjukan perbandingan nilai flow antar variasi campuran. Nilai flow yang dihasilkan masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan, pada variasi 100% agregat alam menghasilkan nilai flow tertinggi sebesar 3,85 mm. Flow terendah terdapat pada campuran variasi 80% slag steel yaitu sebesar 2,92 mm. Nilai flow terus mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar slag steel dalam campuran, penurunan nilai flow disebabkan karena dengan penambahan persentase slag steel mengakibat stabilitas yang dihasilkan semakin meningkat sehingga nilai kelelehan akan semakin menurun.

Campuran yang memiliki nilai flow yang rendah dan stabilitas yang tinggi cenderung menjadi kaku, getas dan rentan terhadap retak, sedangkan campuran yang memiliki nilai flow yang tinggi dan stabilitas yang rendah cenderung plastis dan mudah mengalami perubahan bentuk yang disebabkan oleh beban lalu lintas diatasnya.

7. Pengaruh penggunaan Slag Steel terhadap nilai *Marshall Quotient*

Marshall Quotient memiliki ketetapan syarat spesifikasi minimal sebesar 250 Kg/mm. Pada gambar diatas dapat dilihat semua variasi campuran memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Marshall Quotient merupakan hasil perbandingan antara nilai stabilitas dan flow, nilai MQ yang terlalu besar menunjukan sifat campuran yang cenderung kaku sehingga tidak mudah mengalami deformasi, dan begitu sebaliknya. Nilai MQ tertinggi terdapat pada variasi campuran 80% slag steel yaitu sebesar 800,66 Kg/mm. dan nilai MQ terendah terdapat pada variasi campuran 100% Natural agregat yaitu sebesar 323,66 Kg/mm.

4.4.5 Pengujian Perendaman *Marshall* 24 jam (Durabilitas)

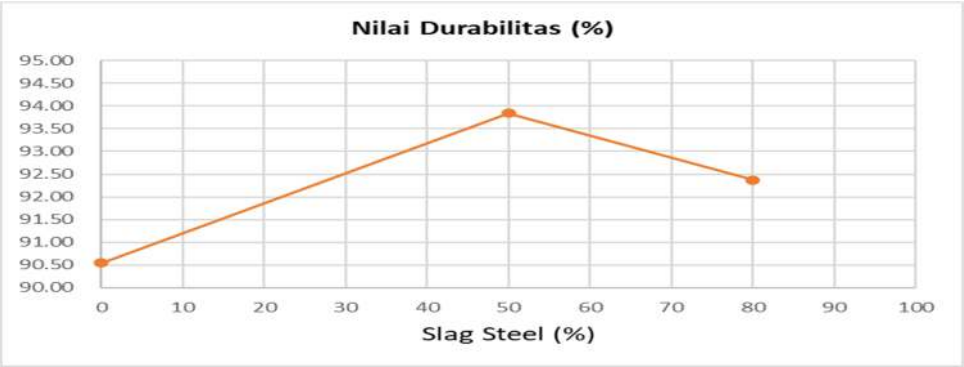
Nilai durabilitas diperoleh dari perbandingan antara stabilitas rendaman 24 jam dengan stabilitas rendaman 30 menit pada suhu 60 ºC. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap kerusakan oleh air atau yang disebut Indeks Kekuatan *Marshall* Sisa (IRS) atau *Marshall Index of Retained Strength*. Pada pengujian ini akan didapatkan nilai indeks perendaman yang dinyatakan dalam persen (%). Spesifikasi Bina Marga 2018 telah menetapkan batas

minimum untuk indeks perendaman campuran AC-BC yaitu ≥90%. Hasil pengujian dan perhitungan nilai durabilitas dapat dilihat pada Tabel 4.20:

Tabel 4. 20 Data Hasil Perhitungan Nilai Durabilitas

No	Jenis Campuran Aspal	Stablitas Rendaman 30 Menit	Stabilitas Rendaman 24 jam	Nilai Durabilitas (%)
a	b	c	d	e=d/c x100
1	100% Agregat Alam	1245.21	1127.44	90.54
2	50% Agregat Alam : 50% Slag Steel	1937.06	1817.82	93.84
3	20% Agregat Alam : 80% Slag Steel	2320.19	2143.17	92.37

Dapat dilihat pada tabel diatas nilai durabilitas pada setiap variasi campuran memenuhi ketetapan spesifikasi Bina Marga 2018. Nilai durabilitas sangat dipengaruhi oleh kepadatan, kadar aspal, kandungan rongga dan gradasi agregat yang digunakan. Perbandingan nilai durabilitas pada setiap variasi campuran dapat dilihat pada Gambar 4.17:



Gambar 4. 17 Perbandingan Nilai Durabilitas (%)

Dapat dilihat pada gambar diatas dengan penambahan kadar slag pada setiap variasi campuran, nilai durabilitas mengalami peningkatan. Durabilitas tertinggi terdapat pada variasi campuran 50% slag steel yaitu sebesar 93,84%. Kenaikan nilai durabilitas ini disebabkan karena dengan penambahan kadar steel slag nilai kepadatan yang dihasilkan campuran akan lebih tinggi, sehingga campuran

memiliki ketahanan yang lebih baik. Kenaikan ini juga disebabkan karena agregat slag lebih tahan terhadap pengaruh air dan perubahan suhu, sehingga meyebabkan perkerasan lebih awet dan tidak rentan terhadap pengelupasan.

4.5 Diskusi

1. Agregat Slag Steel Terhadap Karakteristik Marshalll

Penggunaan agregat slag dalam penelitian ini telah dilakukan sepenuhnya pada agregat kasar dan halus dengan persentasi 0%, 50%, 80% dan 100%. Penambahan agregat slag steel mampu meningkatkan nilai stabilitas pada campuran. Penambahan 80% agregat slag dalam campuran masih memberikan hasil yang sangat baik pada karakteristik Marshall. Penambahan 80% slag pada agregat kasar memberikan nilai stabilitas sebesar 2320,19 Kg, hasil ini melebihi batas spesifikasi yang ditetapkan yaitu sebesar 800 Kg. Stabilitas yang tinggi ini disebabkan karena rendahnya nilai abrasi pada agregat slag steel, misalnya ketika benda uji ditumbuk tidak menyebabkan adanya agregat slag yang pecah dan berubah bentuk sehingga stabilitas dalam campuran sangat baik. Selain itu stabilitas yang baik ini pula disebabkan karena bentuk dan tekstur agregat slag yang tidak beraturan sehingga menyebabkan terjadinya ikatan (*interlocking*) yang baik.

Pada penelitian sebelumnya, Devi (2017) melakukan penelitian yang berjudul "*Pengaruh penggunaan Penambahan Limbah Steel Slag Sebagai Pengganti Agregat Kasar NO.1/2 dan No.8 Terhadap Parameter Marshall*" Pada penelitian ini Steel Slag dipakai sebanyak 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dengan kadar aspal optimum (KAO) 6%. Hasil Penelitian ini menunjukan nilai stabilitas memenuhi persyaratan spesifikasi Marshall dengan hasil sebesar 2475,18 kg, 2279,345 kg, 2129,137 kg, 1707,024 kg, 1988,56 kg dan 1817,092 kg. Untuk nilai VIM, VFA, VMA, Flow, dan MQ menunjukkan besaran yang memenuhi spesifikasi.

Rahmawati (2018) melakukan penelitian tentang perbandingan penggunaan agregat slag ukuran 1/2 dan 3/8 sebagai pengganti agregat kasar dengan persentase 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%. Hasil penelitian menunjukan penambahan agregat slag ukuran 3/8 dengan persentase 100% menghasilkan nilai stabilitas tertinggi yaitu sebesar 2085 Kg. Hal ini disebabkan jumlah agregat yang diganti lebih banyak

dari ukuran 1/2, sehingga menyebabkan kenaikan stabilitas untuk setiap persentase yang digunakan.

Bethary *at al* (2019) melakukan penelitian yang berjudul "*Aging effect condition on hot asphalt mixtures marshall (AC-BC) performance by using slag"* didalam penelitiannya menunjukan Peningkatan Slag steel dalam campuran mempengaruhi nilai volumetrik VIM, VMA, VFA, MQ dan Stabilitas. Stabilitas Marshall pada variasi slag 10% yaitu sebesar 1568.15Kg, stabilitas marshall cenderung meningkat pada tingkat agregat 20% sebesar 1585,02 Kg, pada variasi 30% stabilitas marshall sebesar 1524.31 Kg.

Secara keseluruhan penggunaan slag steel dalam campuran telah memenuhi persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018. Agregat Slag Steel memberikan pengaruh yang signifikan baik terhadap nilai stabalitas Marshall. Oleh karena itu, penggunaan slag steel dapat diterapkan di indonesia khususnya pada jalan nasional dengan beban lalu lintas yang tinggi. Kerena campuran dengan penambahan slag steel lebih mampu menahan beban yang mengakibatkan deformasi. Apabila penggunaan slag steel dapat di implementasikan, tentu hal ini akan menjadi alternatif dalam penggunaan agregat alam. Hal ini juga akan menjadi solusi dalam pemanfaatan limbah pemurnian industri baja di indonesia yang terus menumpuk yang menyebabkan polusi dan pencemaran terhadap lingkungan.

2. Perbandingan Hasil Pemanfaatan Agregat Slag dari Penelitian Terdahulu

Berikut ini adalah beberapa perbandingan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu dalam pemanfaatan agregat slag steel sebagai agregat pengganti dalam campuran aspal.

Tabel 4.21 Perbandingan Hasil Pemanfaatan Agregat Slag dari Penelitian Terdahulu

Penulis	Tahun	Material Pengganti	Komposisi	Metode	Hasil
Michel Kasaf	2020	Pengganti Agregat Kasar N0. 3/4, 1/2, 3/8, 4, 8 dan Agregat Halus No. 16, 30, 50, 100, 200	0%,50%,80%, dan 100%	• Pengujian Karakteristik agregat • Pengujian KAO • Marshall test • Durability test • Spesifikasi Bina Marga 2018	• Agregat slag steel menghasilkan nilai karakteristik agregat yang memenuhi standar spesifikasi Bina Marga 2018 • Stabilitas tertinggi terdapat pada penambahan 80% slag steel yaitu sebesar 2320,19 Kg. Sedangkan stabilitas terendah adalah pada variasi 100% agregat alam yaitu sebesar 1245,21 Kg • Nilai durabilitas dengan penambahan kadar slag steel menghasilkan peningkatan, Durabilitas tertinggi terdapat pada penambahan 50% slag steel sebesar 93,84% dan durabilitas terendah terdapat pada variasi 100% agregat alam sebesar 90.54% tetapi dalam hal ini masih memenuhi standar spesifikasi yang ditetapkan.
Bethari, dkk	2019	Pengganti Agregat Kasar N0. 3/4, 1/2, 3/8, 4, 8 dan Agregat Halus No. 16, 30, 50, 100, 200	10%, 20%, dan 30%	• Pengujian Karakteristik agregat • Pengujian KAO • Marshall test • Test of Short- and Long-Term Aging /AASHTO R30 • Spesifikasi Bina Marga 2010	• Peningkatan Slag steel dalam campuran mempengaruhi nilai volumetrik VIM, VMA, VFA, MQ dan Stabilitas. • Stabilitas Marshall cenderung meningkat pada tingkat agregat 20% sebesar 1585,02 Kg. • Nilai stabilitas Penuaan jangka pendek dan penuaan jangka panjang campuran menurun dibandingkan dengan nilai stabilitas dalam kondisi normal. Ini karena sifat interlocking agregat menurun setelah penuaan.

Rahmawati	2018	Pengganti Agregar Kasar No 1/2 And 3/8	0%, 25%, 50%, 75%, 100%	• Pengujian karakteristik agregat • Pengujian KAO • Marshall test • Spesifikasi Bina Marga 2010	• Semakin banyak kadar steel slag yang digunakan dalam campuran perkerasan dapat meningkatkan nilai stabilitas. Meningkatnya nilai stabilitas campuran akan meningkatkan kemampuan campuran tersebut dalam memikul beban lalulintas. • Penambahan agregat slag ukuran 3/8 dengan persentase 100% menghasilkan nilai stabilitas tertinggi yaitu sebesar 2085 Kg. Hal ini disebabkan jumlah agregat yang diganti lebih banyak dari ukuran 1/2, sehingga menyebabkan kenaikan stabilitas untuk setiap persentase yang digunakan.
Sihtasari Devi	2017	Pengganti Agregat Kasar No.1/2 dan No.8	0%, 10%, 20%, 30%, 40%,50%	• Pengujian Karakteristik agregat • Pengujian KAO • Marshall test • Spesifikasi Bina Marga 2010	• Nilai stabilitas yang didapat dari penambahan Steel Slag pada campuran aspal untuk kadar 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% sudah memenuhi spesifikasi Marshall dengan hasil sebesar 2475,18 kg, 2279,345 kg, 2129,137 kg, 1707,024 kg, 1988,56 kg dan 1817,092 kg. Untuk nilai VIM,VFA, VMA, Flow, dan MQ menunjukkan besaran yang memenuhi spesifikasi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisa data yang telah dilakukan, maka diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Agregat slag steel menghasilkan nilai karakteristik agregat yang memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018. Untuk nilai abrasi pada agregat slag steel adalah sebesar 20,60%, berat jenis pada agregat kasar slag steel sebesar 5,405% dengan nilai penyerapan air sebesar 1%. Sedangkan berat jenis pada agregat halus slag steel yaitu sebesar 3,378%, dengan nilai penyerapan air sebesar 2,229%. Nilai karakteristik menunjukan slag steel memenuhi persyaratan sebagai campuran aspal.
2. Kadar Aspal Optimum pada setiap variasi campuran menghasilkan nilai yang berbeda. Nilai KAO pada variasi 100% agregat alam adalah sebesar 5,35%, variasi 50% agregat alam : 50% agregat slag steel adalah sebesar 5,85%, untuk variasi 20% agregat alam : 80% agregat slag steel adalah 5,80% dan untuk variasi 100% slag steel nilai kadar aspal optimum tidak dapat di identifikasi karena nilai Vim dan VFA tidak memenuhi standar spesifikasi Bina Marga 2018.
3. Nilai karakteristik yang dihasilkan pada semua variasi dengan kadar aspal optimum telah memenuhi standar spesifikasi yang ditetapkan. Penambahan agregat slag steel menghasilkan nilai stabilitas yang lebih tinggi, nilai stabilitas tertinggi terdapat pada penambahan 80% slag steel yaitu sebesar 2320,19 Kg. Sedangkan stabilitas terendah adalah pada variasi 100% agregat alam yaitu sebesar 1245,21 Kg.
4. Nilai durabilitas dengan penambahan kadar slag steel dalam campuran mengalami peningkatan. Durabilitas tertinggi terdapat pada penambahan 50% slag steel sebesar 93,84% dan durabilitas terendah terdapat pada variasi 100% agregat alam sebesar 90.54% tetapi dalam hal ini masih memenuhi standar spesifikasi yang ditetapkan.

5.2 Saran

Dari kesimpulan yang didapat ada beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dilakukan analisis ekonomi terkait pemanfaatan agregat slag steel, karena pemanfaatan limbah slag akan mudah didapatkan didaerah perkotaan namun akan sulit dijangkau untuk daerah terpencil.
2. Pada penelitian selanjutnya disarankan dilakukan analisis terkait polusi udara yang diakibatkan oleh limbah slag steel.
3. Pada penelitian selanjutnya sebaiknya bisa dikombinasikan dengan inovasi limbah yang berbeda agar penggunaan 100% limbah dapat diterapkan.
4. Pada saat perendaman benda uji digunakan lapisan paraffin agar nilai rongga pada benda uji yang sebenarnya dapat diketahui.
5. Perlu dilakukan penambahan jumlah benda uji dalam setiap variasi kadar aspal, agar menghasilkan nilai karakterisktik Marshall yang lebih konsisten.

DAFTAR PUSTAKA

Ali, Zulfiqar, Ramadhansyah Putra Jaya, Moetaz M El-sergany, and Haryati Yaacob. (2015). "*Steel Slag as A Road Construction Material*" 4 (January): 33–38.

Asphalt Institute, (1993). *Mix design Method Of for Asphalt Concrete And Other Hot Mix Manual series No. 2 (Ms-2*), March 1997 Printing

Balitbang, (2012). "Recycling Teknolgi Daur Ulang Perkerasan Jalan", *litbang.pu.go.id/ recycling-teknologi-daur-ulang-perkerasan jalan*.

Behiry, Ahmed Ebrahim Abu El Maaty. (2013). "Evaluation of Steel Slag and Crushed Limestone Mixtures as Subbase Material in Flexible Pavement." *Ain Shams Engineering Journal* 4 (1): 43–53. https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.07.006.

Behnood, A., and M. Ameri. (2012). "Experimental Investigation of Stone Matrix Asphalt Mixtures Containing Steel Slag." *Scientia Iranica* 19 (5): 1214–19. https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.007.

Bethary, R. T., B. S. Subagio, H. Rahman, and N. Suaryana. (2019). "Aging Effect Condition on Hot Asphalt Mixtures Marshall (AC-BC) Performance by Using Slag." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 673 (1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012028.

Bethary, Subagio and Rahman. (2018). "Campuran Aspal Dengan Menggunakan *Reclaimed asphalt Pavement* dan Agregat slag Baja". 18 (2): 117–26.

Cui, P., Xiao, Y., Yan, B., Li, M., & Wu, S. (2018). Morphological characteristics of aggregates and their influence on the performance of asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 186, 303–312.https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.124

Devi Sihtasari, (2017). "Pengaruh Penambahan Limbah Steel Slag Dalam Campuran AC-WC Sebagai Pengganti Agregat Kasar no.½ dan no.8 Terhadap Parameter Marshall, http://repository.umy.ac.id/handle/123456789/12298 (8), pp 1–11.

Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum (1991), SNI 06-2489-2002 Metode Pengujian Campuran Aspal Dengan Alat Marshall,Pusjatan Balitbang PU, Bandung.

Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum (2010), Spesifikasi Umum Edisi 2018, Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta.

Djakfar, Ludfi & Bowoputro, H. & Zaika, Yulvi. (2013). Evaluation of the use of steel slag and pyrophyllite materials in the porous asphaltmix. 18. 1524-1529. 10.5829/idosi.mejsr.2013.18.11.12423.

Gunawan G, (2011). "*Pemanfaatan slag baja untuk teknologi jalan yang ramah lingkungan"* Kementerian Pekerjaan umum, Bandung.

Guo, H., Zhao, Y., Zhang, D., & Shang, M. 2016. Study of movement of coarse aggregates in the formation process of asphalt mixture in the laboratory. *Construction and Building Materials*, *111*, 743–750. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.110

Ibrahim A, HY Qasrawi, FI Shalabi (2007). "Penggunaan agregat terak baja dalam campuran beton aspal" *Saya. J. Civ. Eng Archit*, 34, Vol. 902 - 911.

Jaskuła, Piotr, Marcin Stienss, and Cezary Szydłowski. 2017. "Effect of Polymer Fibres Reinforcement on Selected Properties of Asphalt Mixtures." *Procedia Engineering* 172: 441–48. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.026.

Jaya, R. P. *et al.* (2014) 'Effect of aggregate shape on the properties of asphaltic concrete AC14', *Jurnal Teknologi*, 71(3), pp. 69–73. doi: 10.11113/jt.v71.3762.

Kavussi, A., Qazizadeh, M.J., dan Hassani, A. (2015). Fatigue Behavior Analysis of Asphalt Mixes Containing Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 3 (1): 74-86.

Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat; Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Untuk Pekerjaan Jalan Dan Jembatan (General Specifications of Bina Marga 2018 for Road Works and Bridges)*.

Magadi, Kavyashree L., N. Anirudh, and K. M. Mallesh. (2016). "Evaluation of Bituminous Concrete Mixture Properties with Steel Slag." *Transportation Research Procedia* 17 (December): 174–83. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.11.073.

Masoudi, Sajjad, Sayyed Mahdi Abtahi, and Ahmad Goli. (2017). "Evaluation of Electric Arc Furnace Steel Slag Coarse Aggregate in Warm Mix Asphalt Subjected to Long-Term Aging." *Construction and Building Materials* 135: 260–66. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177.

Negara Republik Indonesia PP NO. 101 tahun 2014. Pengolahan *Limbah Berbahaya dan Beracun,* Jakarta. Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2014.

Rahmawati, Anita. (2018). "Pengaruh Penggunaan Limbah Steel Slag Sebagai Pengganti Agregat Kasar Ukuran ½" Dan 3/8" Pada Campuran HRS_WC." *Dinamika Rekayasa* 13 (1): 11. https://doi.org/10.20884/1.dr.2017.13.1.153.

Raposeiras, A.C., Cerón, A.V., Quesada, D.M., dan Fresno, D.C. (2016). Effect of Copper Slag Addition on Mechanical Behavior of Asphalt Mixes Containing Reclaimed Asphalt Pavement. C*onstruction and Building Materials*, 119: 268-276.

Roberts, F. L. *et al.* (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction*.

Saberi K, Farshad, Mansour Fakhri, and Ahmad Azami. 2017. "Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Crumb Rubber." *Journal of Cleaner Production* 165: 1125–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.079.

Sengoz, B., Onsori, A. and Topal, A. (2014) 'Effect of aggregate shape on the surface properties of flexible pavement', *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(5), pp. 1364–1371. doi: 10.1007/s12205-014-0516-0.

Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018. Direktorat Jenderal Bina Marga Kementrian Pekerjaan Umum. Jakarta..

Sukirman, S. (1992). *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Jalan*, NOVA, Bandung.

Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Penerbit Nova.

Sukirman, S. (2003). *Beton Aspal Campuran Panas*. Jakarta: Granit.

Sumiati and Sukarman (2014). "Pengaruh Gradasi Agregat Terhadap Nilai Karakteristik Aspal Beton" (AC-BC)", 10(1), pp. 85–91.

Suryadharma, H dan Susanto, B. (1999) *Teknik Jalan Raya*, Yogyakarta: Penerbit Universitas Atma Jaya

Tahir, A., & Setiawan, A. (2009). Kinerja durabilitas campuran beton aspal ditinjau dari faktor variasi suhu pemadatan dan lama perendaman. SMARTek, 7(1), 45– 61. https://doi.org/10.1128/mBio.00420-12

Theresia M dan Eka Susanti (2017). "Pemanfaatan Limbah Slag Baja Sebagai Pengganti Batu Pecah Untuk Perkersan jalan, Institut Teknologi Adhitama Surabaya" no. 1: 31–36.

Tokyay, M., & Akcaoglu, T. (2004). Determining Aggregate Size & Shape Effect On Concrete Microcracking Under Compression By Means of A Degree Of Reversibility Method, 2–7.

Wang, H., Bu, Y., Wang, Y., Yang, X., & You, Z. (2016). The Effect of Morphological Characteristic of Coarse Aggregates Measured with Fractal Dimension on Asphalt Mixture ' s High-Temperature Performance

Xie, X., Lu, G., Liu, P., Wang, D., Fan, Q., & Oeser, M. (2017). Evaluation of morphological characteristics of fine aggregate in asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 139, 1–8.https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.044

LAMPIRAN A

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

Lampiran A.1

Formulir Pemeriksaan Agregat Kasar

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pengujian :

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT KASAR

Tanggal Pengujian : 17 Februari 2020
Jenis Material : Agregat kasar

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II	Rata – Rata
A	Benda uji kering oven (Bk) (gram)	2003.2	2002.7	2002.95
B	Berat benda uji kering permukaan jenuh (Bj) (gram)	2048	2052	2050
C	Berat benda uji didalam air (Ba) (gram)	1264	1260	1262
D	Berat Jenis (bulk) $\frac{Bk}{Bj-Ba}$	2.555	2.529	2.542
E	Berat Jenis kering permukaan jenuh $\frac{Bj}{Bj-Ba}$	2.612	2.591	2.602
F	Berat Jenis Semu (apparent) $\frac{Bk}{Bk-Ba}$	2.710	2.697	2.703
G	Penyerapan $\frac{Bj-Bk}{Bk} \times 100\%$	2.236	2.462	2,349

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :
Pengujian :

KEAUSAN AGREGAT

Tanggal Pengujian : 17 Februari 2020

Jenis Material : Agregat kasar

Pengambilan Data

Saringan		Berat Benda Uji (gram)			
Lolos	Tertahan	Sebelum I	Sesudah I	Sebelum II	Sesudah II
		A	B	A	B
¾"	½"	2500	3531,5		
½"	3/8"	2500			
3/8"	¼"			2500	3390,5
¼''	4''			2500	
Jumlah Berat		5000	3531.5	5000	3390,5
Jumlah Bola Baja		11		8	
Lolos Saringan No.12		1467,7		1609,5	

Perhitungan		I	II	Rata – Rata
A	Berat sebelum di uji	5000	5000	5000
B	Berat sesudah di uji	3531,5	3390,5	3461
C	Lolos saringan No. 12	1467,7	1609,5	1538,60
D	Keausan (%)	29,37	32,2	30,8

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pengujian :

KELEKATAN AGREGAT TERHADAP ASPAL

Tanggal Pengujian : 18 Februari 2020
Jenis Material : Agregat kasar

Pengambilan Data

Pengamatan	Hasil Pengamatan/Kelekatan (%)
1	99
2	98
Rata – rata	98,5

Lampiran A.2

Formulir Pemeriksaan Agregat Halus

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :
Pengujian :

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT HALUS

Tanggal Pengujian : 18 Februari 2020
Jenis Material : Agregat halus

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II	Rata – Rata
A	Berat benda uji kering permukaan jenuh (gram)	500	487.9	493.95
B	Berat benda uji kering oven (**Bk**) (gram)	482.7	473	477.85
C	Berat Piknometer + air (gram)	679.8	626.4	653.1
E	Berat Piknometer + benda uji + air (**Bt**) (gram)	993.5	932.8	963.15
F	Berat Jenis (bulk) $\frac{Bk}{B+Bj-Bt}$	2,591	2,606	2,599
G	Berat Jenis kering permukaan jenuh $\frac{Bj}{B+Bj+Bt}$	2,684	2,688	2,686
H	Berat Jenis Semu (apparent) $\frac{Bk}{B+Bk+Bt}$	2,856	2,839	2,848
I	Penyerapan $\frac{Bj-Bk}{Bk} x\ 100\%$	2,937	2,993	2,965

Formulir Pemeriksaan Filler

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :
Pengujian :

BERAT JENIS DAN PENYERAPAN FILLER

Tanggal Pengujian : 18 Februari 2020
Jenis Material : Filler

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II	Rata – Rata
A	Berat benda uji kering permukaan jenuh (gram)	500	500	500
B	Berat benda uji kering oven (**Bk**) (gram)	490,5	494,1	492,3
C	Berat Piknometer + air (gram)	631,9	633,7	632,8
E	Berat Piknometer + benda uji + air (**Bt**) (gram)	940,9	948	944,45
F	Berat Jenis (bulk) $\frac{Bk}{B+Bj-Bt}$	2,568	2,661	2,614
G	Berat Jenis kering permukaan jenuh $\frac{Bj}{B+Bj+Bt}$	2,618	2,693	2,655
H	Berat Jenis Semu (apparent) $\frac{Bk}{B+Bk+Bt}$	2,702	2,748	2,725
I	Penyerapan $\frac{Bj-Bk}{Bk} x\ 100\%$	1,937	1,194	1,399

Lampiran A.3

Formulir Pemeriksaan Agregat Slag

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :

BERAT JENIS AGREGAT HALUS SLAG

Tanggal Pengujian : 19 Februari 2020
Sumber Material : PT. Isfatindo, Jawa Timur.

Pengambilan Data

Uraian		Agregat
Berat benda uji kering oven (Bk)	(gr)	489.1
Berat benda uji kering permukaan jenuh (Bj)	(gr)	500
Berat piknometer uji + air (B)	(gr)	691
Berat piknometer + Benda Uji + Air (Bt)		1046.2
Berat jenis (Bulk)	$= \frac{Bk}{B+Bj-Bt}$	3.378
Berat jenis kering permukaan jenuh	$= \frac{Bj}{B+Bj+Bt}$	3.453
Berat jenis semu (Apparent)	$= \frac{Bk}{B+Bk-Bt}$	3.653
Penyerapan (Absorption)	$= \frac{Bj-Bk}{Bk} \times 100\%$	2.229

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pemohon :

BERAT JENIS AGREGAT KASAR SLAG DAN PENYERAPAN

Uraian		Agregat
Berat benda uji kering oven (Bk)	(gr)	4000
Berat benda uji kering permukaan jenuh (Bj)	(gr)	4040
Berat benda uji dalam air (Ba)	(gr)	3300
Berat jenis (Bulk)	$= \frac{Bk}{Bj - Ba}$	5.405
Berat jenis kering permukaan jenuh	$= \frac{Bj}{Bj - Ba}$	5.459
Berat jenis semu (Apparent)	$= \frac{Bk}{Bk - Ba}$	5.714
Penyerapan (Absorption)	$= \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100$	1

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Tanggal Pengujian : 20 Februari 2020
Pemohon :

Pemeriksaan Keausan Agregat Slag

GRADASI PEMERIKSAAN		**BERAT SAMPEL (gr)**
lolos	tertahan	
19.1 mm	12.5 mm	2500
12.5 mm	9 mm	2500
Jumlah Berat	(a)	5000
Berat tertahan no.12	(b)	3970
Berat yang Aus (a-b)		1030
Nilai Keausan		**20.60**

Proyek : TESIS
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan, ITS
Pengujian :

KELEKATAN AGREGAT SLAG TERHADAP ASPAL

Tanggal Pengujian : 20 Februari 2020
Jenis Material : Agregat kasar

Pengambilan Data

Pengamatan	Hasil Pengamatan/Kelekatan (%)
1	96
2	98
Rata – rata	97

Lampiran A.4

Formulir Pemeriksaan Aspal

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

BERAT JENIS ASPAL

Tanggal Pengujian : 21 Februari 2020
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

Benda Uji		I	II
A	Berat Picnometer + Tutup (gram)	27.20	27.20
B	Berat Picnometer + Tutup + Air (gram)	52.20	52.20
C	Berat Picnometer + Tutup + Aspal (gram)	36.80	39.80
D	Berat Picnometer + Tutup + Aspal + Air (gram)	52.50	52.60
E	Berat Jenis Aspal = (C-A) / (B-A) – (D-C)	1.032	1.033
F	Rata – Rata	1.033	

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

PENETRASI ASPAL

SNI 06 – 2456 – 1991

Tanggal Pengujian : 24 Februari 2020
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
Pembukaan Benda Uji	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	09.15	
	selesai	09.30	
Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		
	Mulai	09.33	
	Selesai	10.33	
Perendaman Benda Uji	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu waterbath temperatur 25°C
	Mulai	10.33	
	Selesai	11.33	
Pemeriksaan Benda Uji	Penetrasi 25°C, 100 gr, 5 detik		Pembacaan suhu penetrometer temperatur 25°C
	Mulai	11.33	
	Selesai	11.38	

Penetrasi pada suhu 25°C, beban 100 gr, 5 detik	A	B
Pengamatan		
1	66	63
2	63	63
3	65	61
4	65	64
5	64	62
Rata-rata	65	65
Rata-rata (A,B)	65	

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

DAKTILITAS

SNI 06 – 2432 – 1991

Tanggal Pengujian : 24 Februari 2020
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
Pembukaan Benda Uji	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	13.37	
	selesai	13.49	
Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		
	Mulai	13.50	
	Selesai	14.50	
Perendaman Benda Uji	Suhu perendaman 25°C		Pembacaan suhu waterbath temperatur 25°C
	Mulai	14.50	
	Selesai	15.50	
Pengujian	Alat		Pembacaan suhu alat temperature 25°C
	Mulai	15.50	
	Selesai	16.10	

Daktilitas suhu 25°C 5 cm per menit		Pembacaan Alat cm
Pengamatan	1	110 cm
	2	120 cm
Rata-rata		115 cm

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

TITIK LEMBEK ASPAL

SNI 06 – 2434 – 1991

Tanggal Pengujian : 25 Februari 2020
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
Pembukaan Benda Uji	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	09.15	
	selesai	09.30	
Mendinginkan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		
	Mulai	09.39	
	Selesai	10.39	
Perendaman Benda Uji	Suhu perendaman 25°C		Pembacaan suhu waterbath temperatur 25°C
	Mulai	10.39	
	Selesai	11.39	
Pengujian	Alat		Pembacaan suhu penetrometer temperatur 25°C
	Mulai	11.39	
	Selesai	11.42	

No	Waktu	Suhu
I	2:32,22	55°C
II	2:34,37	56°C
Selisih	2,15	1°C

Proyek : Penelitian Tesis
Lokasi : Lab. Perhubungan Dan Bahan Konstruksi Jalan ITS
Pelaksana :
Pengujian :

TITIK NYALA DAN BAKAR

SNI 06 – 2433 – 1991

Tanggal Pengujian : 25 Februari 2020
Jenis Material : Aspal Pen. 60/70 ex. Pertamina

Pengambilan Data

	Perlakuan	Pembacaan Waktu	Pembacaan Suhu
Pembukaan Benda Uji	Benda Uji dipanaskan		Pembacaan suhu oven temperatur 110°C
	Mulai	14.37	
	selesai	14.48	
Penuangan Benda Uji	Didiamkan pada suhu ruang		Pembacaan suhu menuang temperatur 110°C
	Mulai	14.54	
	Selesai	14.56	
Pengujian	Alat		
	Mulai	14.58	
	Selesai	15.17	

Titik Nyala dan Titik Bakar	Pembacaan Pengukuran Pada Alat
Pengamatan I	331°C
Pengamatan II	329°C

LAMPIRAN B

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

Lampiran B.1 Formulir Perhitungan Karakteristik Marshall

B.1.1. Hasil Pengujian Campuran Beton Aspal Penentuan KAO 100% Agregat Alam

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal		Tebal Benda Uji	Berat Benda Uji			Isi Benda Uji	Kepadatan (Berat Isi) (Gmb)	BJ Campuran Maksimum (Gmm)	VIM	VMA	VFA	Stabilitas ≥ 800		Kelelehan	MQ
	Terhadap Campuran	Terhadap Agregat		Kering	SSD	Dalam Air				3 - 5	≥ 14	≥ 65	Bacaan Alat	Setelah Koreksi	2 - 4	≥ 250
	%	%	cm	gram	gram	gram	cm3	g/cm3	(teoritis)	%	%	%	kg	kg	mm	kg/mm
a	b	c	d	e	f	g	h = (f - g)	i = (e / h)	j	k	l	m	n	o	p	q
BU.1.1	4.50	4.71	6.99	1174.20	1193.40	690.00	503.40	2.33	2.48	5.82	18.20	68.02	350.00	1203.06	3.00	401.02
BU.1.2	4.50	4.71	6.90	1169.00	1185.50	668.00	517.50	2.26	2.48	8.79	20.78	57.70	292.00	965.10	2.80	344.68
BU.1.3	4.50	4.71	6.96	1170.70	1188.60	670.00	518.60	2.26	2.48	8.85	20.84	57.51	275.00	908.91	4.20	216.41
Rata-rata	**4.50**	**4.71**	**6.95**	**1171.30**	**1189.17**	**676.00**	**513.17**	**2.28**	**2.48**	**7.82**	**19.94**	**61.08**	**305.67**	**1025.69**	**3.33**	**320.70**
BU.2.1	5.00	5.26	6.91	1173.30	1191.90	687.00	504.90	2.32	2.46	5.49	18.96	71.07	333.00	1144.63	2.10	545.06
BU.2.2	5.00	5.26	6.99	1168.80	1196.50	685.00	511.50	2.29	2.46	7.06	20.31	65.23	288.00	951.87	4.30	221.37
BU.2.3	5.00	5.26	6.98	1168.70	1171.90	675.00	496.90	2.35	2.46	4.34	17.98	75.86	350.00	1203.06	3.10	388.09
Rata-rata	**5.00**	**5.26**	**6.96**	**1170.27**	**1186.77**	**682.33**	**504.43**	**2.32**	**2.46**	**5.63**	**19.09**	**70.72**	**323.67**	**1099.86**	**3.17**	**384.84**
BU.3.1	5.50	5.82	6.79	1186.10	1203.00	698.00	505.00	2.35	2.44	3.78	18.55	79.63	298.00	1024.32	2.20	465.60
BU.3.2	5.50	5.82	6.83	1189.90	1204.90	700.00	504.90	2.36	2.44	3.45	18.28	81.11	340.00	1168.69	3.10	377.00
BU.3.3	5.50	5.82	6.72	1174.50	1191.50	699.00	492.50	2.38	2.44	2.30	17.30	86.70	345.00	1242.89	2.80	443.89
Rata-rata	**5.50**	**5.82**	**6.78**	**1183.50**	**1199.80**	**699.00**	**500.80**	**2.36**	**2.44**	**3.18**	**18.04**	**82.48**	**327.67**	**1145.30**	**2.70**	**428.83**
BU4.1	6.00	6.38	6.72	1182.50	1200.90	704.00	496.90	2.38	2.42	1.80	17.94	89.95	420.00	1443.68	2.10	687.46
BU.4.2	6.00	6.38	6.98	1182.70	1203.00	705.00	498.00	2.37	2.42	2.00	18.11	88.93	255.00	876.52	4.00	219.13
BU.4.3	6.00	6.38	6.92	1181.40	1200.40	700.00	500.40	2.36	2.42	2.58	18.59	86.11	310.00	1065.57	3.90	273.22
Rata-rata	**6.00**	**6.38**	**6.87**	**1182.20**	**1201.43**	**703.00**	**498.43**	**2.37**	**2.42**	**2.13**	**18.22**	**88.33**	**328.33**	**1128.59**	**3.33**	**393.27**
BU5.1	6.50	6.95	6.72	1184.80	1197.00	700.00	497.00	2.38	2.41	0.93	18.27	94.92	318.00	1093.07	2.50	437.23
BU.5.2	6.50	6.95	6.72	1188.50	1202.00	700.00	502.00	2.37	2.41	1.61	18.83	91.45	345.00	1185.88	3.50	338.82
BU.5.3	6.50	6.95	6.54	1182.80	1192.20	690.00	502.20	2.36	2.41	2.12	19.25	88.99	300.00	1031.20	3.20	322.25
Rata-rata	**6.50**	6.95	**6.66**	**1185.37**	**1197.07**	**696.67**	**500.40**	**2.37**	**2.41**	**1.55**	**18.78**	**91.79**	**321.00**	**1103.38**	**3.07**	**366.10**

B.1.2. Tabel Hasil Pengujian Campuran Beton Aspal Penentuan KAO 50% Agregat Slag : 50% Agregat Alam

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal		Tebal Benda Uji	Berat Benda Uji			Isi Benda Uji	Kepadatan (Berat Isi) (Gmb)	BJ Campuran Maksimum (Gmm)	VIM	VMA	VFA	Stabilitas ≥ 800		Kelelehan	MQ
	Terhadap Campuran	Terhadap Agregat		Kering	SSD	Dalam Air				3 - 5	≥ 14	≥ 65	Bacaan Alat	Setelah Koreksi	2 - 4	≥ 250
	%	%	cm	gram	gram	gram	cm3	g/cm3	(teoritis)	%	%	%	kg	kg	mm	kg/mm
a	b	c	d	e	f	g	h = (f - g)	i = (e / h)	j	k	l	m	n	o	p	q
BU.1.1	4.50	4.71	6.07	1188.60	1198.70	759.00	439.70	2.70	2.89	6.58	15.08	56.34	431.00	1880.35	3.30	569.80
BU.1.2	4.50	4.71	6.13	1178.20	1189.90	755.00	434.90	2.71	2.89	6.38	14.90	57.17	375.00	1636.03	3.23	506.51
BU.1.3	4.50	4.71	6.10	1189.90	1200.70	760.00	440.70	2.70	2.89	6.69	15.18	55.91	379.00	1653.49	3.80	435.13
Rata-rata	**4.50**	**4.71**	**6.10**	**1185.57**	**1196.43**	**758.00**	**438.43**	**2.70**	**2.89**	**6.55**	**15.06**	**56.48**	**395.00**	**1723.29**	**3.44**	**503.81**
BU.2.1	5.00	5.26	6.01	1189.60	1199.90	760.00	439.90	2.70	2.87	5.67	15.05	62.35	440.00	1919.61	3.90	492.21
BU.2.2	5.00	5.26	5.90	1151.00	1163.20	740.00	423.20	2.72	2.87	5.13	15.01	65.85	357.00	1640.10	2.92	561.68
BU.2.3	5.00	5.26	5.82	1111.00	1119.70	700.00	419.70	2.65	2.87	7.66	17.28	55.67	330.00	1603.31	3.15	508.99
Rata-rata	**5.00**	**5.26**	**5.91**	**1150.53**	**1160.93**	**733.33**	**427.60**	**2.69**	**2.87**	**6.15**	**15.78**	**61.29**	**375.67**	**1721.01**	**3.32**	**520.96**
BU.3.1	5.50	5.82	5.93	1187.10	1197.70	760.00	437.70	2.71	2.84	4.51	15.70	71.27	445.00	1941.43	2.45	792.42
BU.3.2	5.50	5.82	6.00	1181.80	1193.10	758.00	435.10	2.72	2.84	4.37	15.57	71.95	426.00	1858.54	2.80	663.76
BU.3.3	5.50	5.82	5.96	1178.30	1190.10	750.00	440.10	2.68	2.84	5.73	16.78	65.83	379.00	1653.49	3.50	472.42
Rata-rata	**5.50**	**5.82**	**5.96**	**1182.40**	**1193.63**	**756.00**	**437.63**	**2.70**	**2.84**	**4.87**	**16.01**	**69.68**	**416.67**	**1817.82**	**2.92**	**642.87**
BU4.1	6.00	6.38	5.85	1186.70	1196.10	760.00	436.10	2.72	2.81	3.30	15.86	79.17	460.00	2006.87	2.90	692.02
BU.4.2	6.00	6.38	5.84	1189.50	1198.70	765.00	433.70	2.74	2.81	2.54	15.20	83.29	422.00	1841.08	2.50	736.43
BU.4.3	6.00	6.38	5.95	1184.40	1194.30	759.00	435.30	2.72	2.81	3.31	15.87	79.12	440.00	1919.61	2.00	959.81
Rata-rata	**6.00**	**6.38**	**5.88**	**1186.87**	**1196.37**	**761.33**	**435.03**	**2.73**	**2.81**	**3.05**	**15.64**	**80.53**	**440.67**	**1922.52**	**2.47**	**796.09**
BU5.1	6.50	6.94	5.72	1187.10	1192.60	758.00	434.60	2.73	2.79	2.05	15.99	87.20	390.00	1701.48	2.82	603.36
BU.5.2	6.50	5.82	5.86	1192.60	1199.40	762.00	437.40	2.73	2.79	2.22	16.14	86.23	350.00	1526.97	2.50	610.79
BU.5.3	6.50	5.82	5.96	1191.50	1201.70	760.00	441.70	2.70	2.79	3.26	17.04	80.84	340.00	1483.34	2.00	741.67
Rata-rata	**6.50**	5.82	**5.85**	**1190.40**	**1197.90**	**760.00**	**437.90**	**2.72**	**2.79**	**2.51**	**16.39**	**84.76**	**460.00**	**1570.59**	**2.44**	**651.94**

Lampiran B.1 Formulir Perhitungan Karakteristik Marshall

B.1.3. Tabel Hasil Pengujian Campuran Beton Aspal Penentuan KAO 80% Agregat Slag : 20% Agregat Alam

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal		Tebal Benda Uji	Berat Benda Uji			Isi Benda Uji	Kepadatan (Berat Isi) (Gmb)	BJ Campuran Maksimum (Gmm) (teoritis)	VIM 3 - 5	VMA ≥ 14	VFA ≥ 65	Stabilitas ≥ 800		Kelelehan 2 - 4	MQ ≥ 250
	Terhadap Campuran	Terhadap Agregat		Kering	SSD	Dalam Air							Bacaan Alat	Setelah Koreksi		
	%	%	cm	gram	gram	gram	cm3	g/cm3		%	%	%	kg	kg	mm	kg/mm
a	b	c	d	e	f	g	h = (f - g)	i = (e / h)	j	k	l	m	n	o	p	q
BU.1.1	4.50	4.71	5.71	1192.50	1202.80	780.00	422.80	2.82	3.29	14.32	21.59	33.65	444.00	2039.79	3.55	574.59
BU.1.2	4.50	4.71	5.43	1148.10	1157.00	770.00	387.00	2.97	3.29	9.88	17.52	43.61	450.00	2483.80	5.52	449.96
BU.1.3	4.50	4.71	5.71	1195.50	1205.10	782.00	423.10	2.83	3.29	14.17	21.45	33.94	455.00	2090.32	3.50	597.24
Rata-rata	**4.50**	**4.71**	**5.62**	**1178.70**	**1188.30**	**777.33**	**410.97**	**2.87**	**3.29**	**12.79**	**20.19**	**37.07**	**449.67**	**2204.64**	**4.19**	**540.60**
BU.2.1	5.00	5.26	5.57	1179.40	1187.90	800.00	387.90	3.04	3.26	6.59	15.47	57.39	322.00	1777.30	2.40	740.54
BU.2.2	5.00	5.26	5.70	1202.20	1211.00	815.00	396.00	3.04	3.26	6.73	16.04	58.02	589.00	3036.88	2.60	1168.03
BU.2.3	5.00	5.26	5.72	1187.00	1197.00	800.00	397.00	2.99	3.26	8.15	17.31	52.95	510.00	2629.55	4.12	638.24
Rata-rata	**5.00**	**5.26**	**5.66**	**1189.53**	**1198.63**	**805.00**	**393.63**	**3.02**	**3.26**	**7.16**	**16.27**	**56.12**	**473.67**	**2481.24**	**3.04**	**848.94**
BU.3.1	5.50	5.82	5.53	1189.80	1195.50	800.00	395.50	3.01	3.22	6.54	17.24	62.04	403.00	2077.86	3.50	593.68
BU.3.2	5.50	5.82	5.64	1193.60	1200.20	805.00	395.20	3.02	3.22	6.17	16.91	63.49	432.00	2227.39	2.00	1113.69
BU.3.3	5.50	5.82	5.60	1196.70	1204.30	810.00	394.30	3.03	3.22	5.72	16.51	65.37	492.00	2536.75	4.60	551.47
Rata-rata	**5.50**	**5.82**	**5.59**	**1193.37**	**1200.00**	**805.00**	**395.00**	**3.02**	**3.22**	**6.15**	**16.89**	**63.63**	**442.33**	**2280.67**	**3.37**	**752.94**
BU4.1	6.00	6.38	5.64	1192.40	1200.10	812.00	388.10	3.07	3.18	3.50	15.50	77.44	446.00	2461.72	3.20	769.29
BU.4.2	6.00	6.38	5.58	1198.90	1205.30	815.00	390.30	3.07	3.18	3.52	15.94	77.93	380.00	2097.43	3.00	699.14
BU.4.3	6.00	6.38	5.57	1186.20	1192.70	810.00	382.70	3.10	3.18	2.64	15.18	82.58	450.00	2483.80	2.90	856.48
Rata-rata	**6.00**	**6.38**	**5.60**	**1192.50**	**1199.37**	**812.33**	**387.03**	**3.08**	**3.18**	**3.22**	**15.54**	**79.32**	**425.33**	**2347.65**	**3.03**	**774.97**
BU5.1	6.50	6.94	5.55	1193.20	1197.60	812.00	385.60	3.09	3.15	1.74	15.77	88.96	339.00	1871.13	7.20	259.88
BU.5.2	6.50	5.82	5.46	1191.30	1194.30	810.00	384.30	3.10	3.15	1.57	15.62	89.98	375.00	2069.83	5.45	379.79
BU.5.3	6.50	5.82	5.52	1187.30	1191.90	800.00	391.90	3.03	3.15	3.80	17.54	78.34	382.00	2108.47	5.75	366.69
Rata-rata	**6.50**	5.82	**5.51**	**1190.60**	**1194.60**	**807.33**	**387.27**	**3.07**	**3.15**	**2.37**	**16.31**	**85.76**	**365.33**	**2016.48**	**6.13**	**335.45**

B.1.4. Tabel Hasil Pengujian Campuran Beton Aspal Penentuan KAO 100% Agregat Slag

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal		Tebal Benda Uji	Berat Benda Uji			Isi Benda Uji	Kepadatan (Berat Isi) (Gmb)	BJ Campuran Maksimum (Gmm)	VIM	VMA	VFA	Stabilitas ≥ 800		Kelelehan	MQ
	Terhadap Campuran	Terhadap Agregat		Kering	SSD	Dalam Air				3 - 5	≥ 14	≥ 65	Bacaan Alat	Setelah Koreksi	2 - 4	≥ 250
	%	%	cm	gram	gram	gram	cm3	g/cm3	(teoritis)	%	%	%	kg	kg	mm	kg/mm
a	b	c	d	e	f	g	h = (f - g)	i = (e / h)	j	k	l	m	n	o	p	q
BU.1.1	4.50	4.71	6.99	1174.20	1193.40	690.00	503.40	2.33	2.48	5.82	18.20	68.02	350.00	1203.06	3.00	401.02
BU.1.2	4.50	4.71	6.90	1169.00	1185.50	668.00	517.50	2.26	2.48	8.79	20.78	57.70	292.00	965.10	2.80	344.68
BU.1.3	4.50	4.71	6.96	1170.70	1188.60	670.00	518.60	2.26	2.48	8.85	20.84	57.51	275.00	908.91	4.20	216.41
Rata-rata	**4.50**	**4.71**	**6.95**	**1171.30**	**1189.17**	**676.00**	**513.17**	**2.28**	**2.48**	**7.82**	**19.94**	**61.08**	**305.67**	**1025.69**	**3.33**	**320.70**
BU.2.1	5.00	5.26	6.91	1173.30	1191.90	687.00	504.90	2.32	2.46	5.49	18.96	71.07	333.00	1144.63	2.10	545.06
BU.2.2	5.00	5.26	6.99	1168.80	1196.50	685.00	511.50	2.29	2.46	7.06	20.31	65.23	288.00	951.87	4.30	221.37
BU.2.3	5.00	5.26	6.98	1168.70	1171.90	675.00	496.90	2.35	2.46	4.34	17.98	75.86	350.00	1203.06	3.10	388.09
Rata-rata	**5.00**	**5.26**	**6.96**	**1170.27**	**1186.77**	**682.33**	**504.43**	**2.32**	**2.46**	**5.63**	**19.09**	**70.72**	**323.67**	**1099.86**	**3.17**	**384.84**
BU.3.1	5.50	5.82	6.79	1186.10	1203.00	698.00	505.00	2.35	2.44	3.78	18.55	79.63	298.00	1024.32	2.20	465.60
BU.3.2	5.50	5.82	6.83	1189.90	1204.90	700.00	504.90	2.36	2.44	3.45	18.28	81.11	340.00	1168.69	3.10	377.00
BU.3.3	5.50	5.82	6.72	1174.50	1191.50	699.00	492.50	2.38	2.44	2.30	17.30	86.70	345.00	1242.89	2.80	443.89
Rata-rata	**5.50**	**5.82**	**6.78**	**1183.50**	**1199.80**	**699.00**	**500.80**	**2.36**	**2.44**	**3.18**	**18.04**	**82.48**	**327.67**	**1145.30**	**2.70**	**428.83**
BU4.1	6.00	6.38	6.72	1182.50	1200.90	704.00	496.90	2.38	2.42	1.80	17.94	89.95	420.00	1443.68	2.10	687.46
BU.4.2	6.00	6.38	6.98	1182.70	1203.00	705.00	498.00	2.37	2.42	2.00	18.11	88.93	255.00	876.52	4.00	219.13
BU.4.3	6.00	6.38	6.92	1181.40	1200.40	700.00	500.40	2.36	2.42	2.58	18.59	86.11	310.00	1065.57	3.90	273.22
Rata-rata	**6.00**	**6.38**	**6.87**	**1182.20**	**1201.43**	**703.00**	**498.43**	**2.37**	**2.42**	**2.13**	**18.22**	**88.33**	**328.33**	**1128.59**	**3.33**	**393.27**
BU5.1	6.50	6.95	6.72	1184.80	1197.00	700.00	497.00	2.38	2.41	0.93	18.27	94.92	318.00	1093.07	2.50	437.23
BU.5.2	6.50	6.95	6.72	1188.50	1202.00	700.00	502.00	2.37	2.41	1.61	18.83	91.45	345.00	1185.88	3.50	338.82
BU.5.3	6.50	6.95	6.54	1182.80	1192.20	690.00	502.20	2.36	2.41	2.12	19.25	88.99	300.00	1031.20	3.20	322.25
Rata-rata	**6.50**	6.95	**6.66**	**1185.37**	**1197.07**	**696.67**	**500.40**	**2.37**	**2.41**	**1.55**	**18.78**	**91.79**	**321.00**	**1103.38**	**3.07**	**366.10**

B.1.5. Perhitungan pengujian perendaman KAO 100% Agregat Alam

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal Terhadap Campuran	Kadar Aspal Terhadap Agregat	Tebal Benda Uji	Berat Benda Uji Kering	Berat Benda Uji SSD	Berat Benda Uji Dalam Air	Isi Benda Uji	Kepadatan (Berat Isi) (Gmb)	BJ Campuran Maksimum (Gmm)	VIM 3 - 5	VMA ≥ 14	VFA ≥ 65	Stabilitas Bacaan Alat	≥ 800 Setelah Koreksi	Kelelehan 2 - 4	MQ ≥ 250
	%	%	cm	gram	gram	gram	cm^3	g/cm^3	(teoritis)	%	%	%	kg	kg	mm	kg/mm
a	b	c	d	e	f	g	h = (f - g)	i = (e / h)	j	k	l	m	n	o	p	q
I	5.35	5.65	6.41	1173.40	1184.50	691.00	493.50	2.38	2.45	2.81	17.38	83.81	360.00	1296.93	3.80	341.30
II	5.35	5.65	6.50	1190.60	1194.70	693.00	501.70	2.37	2.45	3.00	17.54	82.89	372.00	1278.68	4.10	311.87
III	5.35	5.65	6.56	1175.60	1188.90	691.00	497.90	2.36	2.45	3.49	17.96	80.56	322.00	1160.03	3.65	317.82
Rata-rata	**5.35**	**5.65**	**6.49**	**1179.87**	**1189.37**	**691.67**	**497.70**	**2.37**	**2.45**	**3.10**	**17.62**	**82.42**	**351.33**	**1245.21**	**3.85**	**323.66**
Rendaman 24 Jam (Durabilitas)																
IV	5.35	5.65	6.48	1184.20	1194.30	690.00	504.30	2.35	2.45	4.02	18.40	78.16	330.00	1134.32	4.00	283.58
V	5.35	5.65	6.48	1184.40	1196.10	694.00	502.10	2.36	2.45	3.58	18.03	80.14	332.00	1141.19	3.70	308.43
VI	5.35	5.65	6.48	1190.20	1195.20	695.00	500.20	2.38	2.45	2.74	17.32	84.17	322.00	1106.82	3.90	283.80
Rata-rata	**5.35**	**5.65**	**6.48**	**1186.27**	**1195.20**	**693.00**	**502.20**	**2.36**	**2.45**	**3.45**	**17.92**	**80.82**	**328.00**	**1127.44**	**3.87**	**291.94**

B.1.6. Perhitungan pengujian perendaman KAO 50% Agregat Slag : 50% Agregat Alam

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal		Tebal Benda Uji	Berat Benda Uji			Isi Benda Uji	Kepadatan (Berat Isi) (Gmb)	BJ Campuran Maksimum (Gmm)	VIM	VMA	VFA	Stabilitas ≥ 800		Kelelehan	MQ
	Terhadap Campuran	Terhadap Agregat		Kering	SSD	Dalam Air				3 - 5	≥ 14	≥ 65	Bacaan Alat	Setelah Koreksi	2 - 4	≥ 250
	%	%	cm	gram	gram	gram	cm^3	g/cm^3	(teoritis)	%	%	%	kg	kg	mm	kg/mm
a	b	c	d	e	f	g	h = (f - g)	i = (e / h)	j	k	l	m	n	o	p	q
KAO 30"	5.85	6.21	5.82	1197.40	1201.40	760.00	441.40	2.71	2.82	3.70	21.34	82.64	455.00	1985.06	3.10	640.34
KAO 30"	5.85	6.21	5.75	1191.20	1196.00	753.00	443.00	2.69	2.82	4.55	22.03	79.35	432.00	1884.71	3.10	607.97
KAO 30"	5.85	6.21	5.80	1193.10	1196.80	756.00	440.80	2.71	2.82	3.92	21.52	81.79	445.00	1941.43	3.45	562.73
Rata-rata	**5.85**	6.21	**5.79**	**1193.90**	**1198.07**	**756.33**	**441.73**	**2.70**	**2.82**	**4.06**	**21.63**	**81.26**	**444.00**	**1937.06**	**3.22**	**603.68**
Rendaman 24 Jam (Durabilitas)																
KAO 24	5.85	6.21	5.76	1185.10	1186.50	752.00	434.50	2.73	2.82	3.18	20.91	84.79	435.00	1897.80	3.75	506.08
KAO 24	5.85	6.21	5.76	1172.70	1185.30	748.00	437.30	2.68	2.82	4.81	22.24	78.39	410.00	1788.73	3.20	558.98
KAO 24	5.85	6.21	5.68	1175.50	1182.00	750.00	432.00	2.72	2.82	3.41	21.10	83.85	405.00	1766.92	2.80	631.04
Rata-rata	**5.85**	**6.21**	**5.73**	**1177.77**	**1184.60**	**750.00**	**434.60**	**2.71**	**2.82**	**3.80**	**21.42**	**82.34**	**416.67**	**1817.82**	**3.25**	**565.37**

B.1.7. Perhitungan pengujian perendaman KAO 80% Agregat Slag : 20% Agregat Alam

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal		Tebal Benda Uji	Berat Benda Uji			Isi Benda Uji	Kepadatan (Berat Isi) (Gmb)	BJ Campuran Maksimum (Gmm)	VIM	VMA	VFA	Stabilitas	≥ 800	Kelelehan	MQ
	Terhadap Campuran	Terhadap Agregat		Kering	SSD	Dalam Air				3 - 5	≥ 14	≥ 65	Bacaan Alat	Setelah Koreksi	2 - 4	≥ 250
	%	%	cm	gram	gram	gram	cm^3	g/cm^3	(teoritis)	%	%	%	kg	kg	mm	kg/mm
a	b	c	d	e	f	g	h = (f - g)	i = (e / h)	j	k	l	m	n	o	p	q
KAO 30	5.80	6.16	5.54	1183.20	1187.60	792.00	395.60	2.99	3.14	4.75	23.21	79.54	445.00	2294.41	2.85	805.06
KAO 30	5.80	6.16	5.41	1200.00	1204.00	803.00	401.00	2.99	3.14	4.78	23.16	79.35	440.00	2268.63	3.20	708.95
KAO 30	5.80	6.16	5.52	1195.80	1199.40	800.00	399.40	2.99	3.14	4.74	23.13	79.52	465.00	2397.53	2.70	887.98
Rata-rata	**5.80**	6.16	**5.49**	**1193.00**	**1197.00**	**798.33**	**398.67**	**2.99**	**3.14**	**4.76**	**23.16**	**79.47**	**450.00**	**2320.19**	**2.92**	**800.66**
Rendaman 24 Jam (Durabilitas)																
KAO 24	5.80	6.16	5.41	1196.60	1199.10	800.00	399.10	3.00	3.14	4.51	23.02	80.39	440.00	2268.63	3.55	639.05
KAO 24	5.80	6.16	5.43	1192.10	1195.70	798.00	397.70	3.00	3.14	4.63	23.04	79.92	405.00	2088.17	3.17	658.73
KAO 24	5.80	6.16	5.44	1189.20	1193.40	797.00	396.40	3.00	3.14	4.55	22.97	80.21	402.00	2072.71	3.00	690.90
Rata-rata	**5.80**	**6.16**	**5.43**	**1192.63**	**1196.07**	**798.33**	**397.73**	**3.00**	**3.14**	**4.56**	**23.01**	**80.17**	**415.67**	**2143.17**	**3.24**	**662.89**

Lampiran B.2

B.2.1. Keterangan Pada Tabel Perhitungan Karakteristik *Marshall*

Notasi	Keterangan	
a	Nomor Briket	-
b	Tebal benda uji (mm)	-
c	Kadar aspal (%)	-
d	Kadar Agregat (%)	-
e	Berat kering (gr)	-
f	Berat dalam keadaan jenuh/SSD (gr)	-
g	Berat dalam air (gr)	-
h	Volume benda uji (ml)	f-g
i	Berat isi benda uji (Gmb)	e/h
j	Berat jenis efektif agregat campuran (Gsb)	$\frac{\%agregat\ 1\ +\ \%agregat2\ +\ \%agregat3\ +\ \%agregat4}{\frac{\%agregat1}{Bj\ agregat\ Eff1}+\frac{\%agregat2}{Bj\ agregat\ Eff2}+\frac{\%agregat3}{Bj\ agregat\ Eff3}+\frac{\%agregat4}{Bj\ agregat\ Eff4}}$
K	BJ Maksimum (Teoritis)	$\frac{100}{\frac{\%agregat}{bj.\ agregat}+\frac{\%aspal}{bj.\ aspal}}$
L	Volume total aspal (%)	(c x i) / bj. aspal
m	Volume total agregat (%)	((100 - c) / bj. efektif) x i
N	Rongga dalam campuran (%)	$100-100\ (\frac{i}{k})$
O	Ronggan dalam Agregat (%)	$100-\frac{i\ x\ d}{Gsb}$
P	Rongga terisi aspal (%)	$\frac{n\ -m}{n}x100$
Q	Stabilitas bacaan alat	pembacaan dial
R	Angka koreksi ketebalan	lihat tabel
S	Stabilitas terkoreksi kalibrasi alat	n x o x kalibrasi alat [7,28 (lbs) x 0,454 (kg)]
T	pelelehan (*flow*) (mm)	pembacaan dial
U	*Marshall quotient* (kg/mm)	r/s

B.2.2. Tabel Angka Koreksi Pada Perhitungan Stabilitas Marshall

Isi	Tebal Benda Uji	Angka Koreksi
200-213	25.4	5.56
214-225	27	5.00
226-237	28.6	4.55
238-250	30.2	4.17
251-264	31.8	3.85
265-276	33.3	3.57
277-289	34.9	3.33
290-301	35.5	3.03
302-316	38.1	2.78
317-328	39.7	2.5
329-340	41.3	2.27
341-353	42.9	2.08
354-367	44.4	1.92
368-379	46	1.79
380-392	47.6	1.67
393-405	49.2	1.56
406-420	50.8	1.47
421-431	52.4	1.39
432-443	54	1.32
444-456	55.6	1.25
457-470	57.2	1.19
471-482	58.7	1.14
483-495	60.3	1.09
496-508	61.9	1.04
509-522	63.5	1.00
523-535	65.1	0.96
536-546	66.7	0.93
547-559	68.3	0.89
560-573	69.9	0.86
574-585	71.4	0.83
586-598	73	0.81
599-610	74.6	0.78
611-625	76.2	0.76

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

LAMPIRAN C

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

C. DOKUMENTASI PENELITIAN

a. Proses persiapan agregat

b. Material yang digunakan

c. Pemeriksaan material

d. Pengujian *Marshall*

''Halaman ini sengaja dikosongkan''

BIODATA PENULIS

MICHEL KASAF

Penulis dilahirkan di Kutacane, 11 Maret 1995. Penulis dilahirkan dari pasangan Bapak Wahyuddin Pelis, S.Sos., M.AP dan Ibu Siti Khadijah yang merupakan anak ketiga dari empat bersaudara. Pada tahun 2001 Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN 4 Aceh Tenggara, dan lulus pada tahun 2007. Kemudian melanjutkan Sekolah Menengah Pertama pada tahun yang sama di SMPN Perisai Aceh Tenggara dan lulus pada tahun 2010. Kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN Perisai Aceh Tenggara dan lulus pada tahun 2013.

Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan jenjang Strata satu (S1) Pada program studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Selama menempuh gelar Sarjana penulis aktif diberbagai organisasi kampus dan non kampus. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada tahun 2018.

Setelah menyelesaikan Pendidikan S1, Pada tahun yang sama Penulis berkesempatan untuk melanjutkan pendidikan program Magister. Penulis mengambil program studi S2 pada bidang keahlian Manajemen Rekayasa Transportasi, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Dengan NRP 03111850060013. Penulis berharap Tesis ini mampu memberikan kontribusi positif dalam dunia pendidikan terutama untuk perkembangan penggunaan limbah sebagai agregat dalam kontruksi perkerasan jalan.

Michel Kasaf (Mr.)
Civil Engineering Student
Sepuluh Nopember Institute of Technology, Surabaya
Michelkasaf@gmail.com

''Halaman ini sengaja dikosongkan''