

LAPORAN AKHIR
PENELITIAN INTERNAL DOSEN
Progam Studi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknik



**KARAKTERISTIK LIMBAH *LIMESTONE* SEBAGAI PENGANTI
SEBAGIAN FILLER UNTUK CAMPURAN ASPAL *CONCRETE*
TERHADAP NILAI *MARSHALL***

Tim Peneliti:

**Ikko Bagus Ismanto., ST.,MT.
Herta Novianto., ST., SH., M.Si**

Dibiayai oleh:

Universitas Bojonegoro

Periode 1 Tahun Anggaran 2024/2025

Nomor Kontrak:

078 / LLPM – LIT / UB / XI / 2024

UNIVERSITAS BOJONEGORO

2024

HALAMAN PENGESAHAN
PENELITIAN PENDANAAN PERGURUAN TINGGI

1. Judul Penelitian : **Karakterisrik Subtitusi Limbah *Limestone* Sebagai Pengganti Sebagian *Filler* Untuk Campuran Aspal Concrete Terhadap Nilai Marshall**
2. Ketua Peneliti
 - a. Nama Peneliti : **Ikko Bagus Ismanto., ST.,MT.**
 - b. NIDN :
 - c. Program Studi : **Teknik Sipil**
 - d. E-mail : **ikkobagoesismanto@gmail.com**
 - e. Bidang Keilmuan : **Transportasi**
3. Anggota Peneliti 1
 - a. Nama (Dosen/ Mahasiswa) : **Herta Novianto., ST., SH., M.Si**
 - b. NIDN/NIM : **07.2711.6602**
 - c. Program Studi : **Teknik Sipil**
 - d. E-mail : **hertavia2@gmail.com**
 - e. Bidang Keilmuan : **Transportasi**Anggota Peneliti 2
 - a. Nama (Dosen/ Mahasiswa) : **Dwi Nur rosyid**
 - b. NIDN/NIM : **21222011104**
 - c. Program Studi : **Teknik Sipil**
 - d. E-mail : **Dwinurrosyid427@Gmail.com**
 - e. Bidang Keilmuan
4. Jangka Waktu : **6 Bulan Penelitian**
6. Lokasi Penelitian : **Laboratorium Teknik Sipil Universitas Bojonegoro**
7. Dana Diusulkan : **3.500.000,00**

Bojonegoro, 7 Februari 2025

Mengetahui,
Ketua LPPM Universitas Bojonegoro

Pengusul,

Dr. Laily Agustina Rahmawati, S.Si.,
M.Sc.
NIDN 07 2108 8601

Ikko Bagus Ismanto, S.T., M.T.
NIDN.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur senantiasa kami panjatkan kehadiran Allah SWT karena dengan berkat dan rahmat-Nya, kami dapat menyelesaikan Laporan penelitian ini dengan sebaik-baiknya. Laporan penelitian ini berjudul “ ***Karakterisrik Limbah Limestone Sebagai Pengganti Sebagian Filler Untuk Campuran Aspal Concrete Terhadap Nilai Marshall.***” Proposal ini disusun untuk memenuhi salah satu tridarma perguruan tinggi yaitu penelitian. Kami menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak maka sangat sulit bagi kami untuk menyelesaikan proposal ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam pembuatan proposal penelitian ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga nantinya penelitian ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu Teknik Sipil ke depan khususnya dalam bidang infrastruktur jalan.

Bojonegoro, 7 Februari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR NOTASI.....	ix
ABSTRAK	xi
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan dan Manfaat	3
BAB II.....	5
2.1 Aspal	5
2.2 Lapis Aspal Beton (Laston)	5
2.2.1 <i>Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC)</i>	6
2.2.2 <i>Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC)</i>	6
2.2.3 <i>Asphalt Concrete – Base (AC-Base)</i>	6
2.3 Karakteristik Aspal Beton	7
2.4 Agregat.....	9
2.4.1 Agregat Kasar.....	10
2.4.2 Agregat Halus.....	11
2.5 Filler	11
2.6 Limbah <i>Limestone</i>	12
2.7 Marshall.....	13
2.8 Penentuan KAO	17
2.9 JMF (Job Mix Formula).....	17

2.10	Trial And Error.....	18
2.11	Penelitian Terdahulu	19
BAB III		25
3.1	Jenis Penelitian.....	25
3.2	Lokasi Penelitian.....	25
3.3	Populasi, Sampel dan Teknik Pengambilan Sampel	26
3.4	Teknik Pengumpulan Data	26
3.5	Analisis Data	26
BAB IV		30
4.1	Hasil Penelitian	30
4.1.1	Pengujian Material	30
4.1.2	Pengujian Sifat Fisik Pen 60/70	33
4.1.3	Pengujian Titik Lembek Aspal	34
4.2	Rancangan Gradasi Campuran untuk Campuran AC-WC.....	35
4.3	Pembuatan Amplop Gradasi Lapisan AC-WC	37
4.4	Penentuan Kadar Aspal Rencana	39
4.5	Pembuatan Benda Uji AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course) 40	
4.6	Uji Marshall Kadar Aspal Variasi AC-WC	48
4.6.1	Analisis Terhadap Nilai VIM	48
4.6.2	Analisis Terhadap Nilai VMA.....	49
4.6.3	Analisis Terhadap VFA	50
4.6.4	Analisis Terhadap Nilai Stabilitas	51
4.6.5	Analisis Terhadap Nilai Flow	52
4.6.6	Analisis Terhadap Nilai Marshall Quotient (MQ).....	53
4.7	Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO).....	53
4.8	Pembuatan Benda Uji AC-WC Campuran Limestone	54
4.9	Hasil Uji KAO Penambahan Limbah Limestone	61
4.9.1	Stabilitas	61
4.9.2	Kelelehan (Flow).....	62

4.9.3	VMA (Voids in the Mineral Agregate).....	63
4.9.4	VIM (Void In Mix).....	64
4.9.5	VFA (Void Filled with Asphalt.....	64
4.9.6	MQ (Marshall Quotient)	65
4.10	Menentukan KPO Penambahan Limbah Limestone	66
BAB V		68
5.1	Kesimpulan	68
5.2	Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA		70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Konstruksi laston AC-WC, AC-BC, dan AC-Base	5
Gambar 3. 2	Lokasi Penelitian	25
Gambar 4. 1	Grafik Gradasi Gabungan	38
Gambar 4. 2	Grafik Analisis Nilai V.I.M.	48
Gambar 4. 3	Grafik Analisis Nilai V.M.A.	49
Gambar 4. 4	Grafik Analisis Nilai V.F.A.	50
Gambar 4. 5	Grafik Analisis Nilai Stabilitas.	51
Gambar 4. 6	Grafik Analisis Nilai Flow.....	52
Gambar 4. 7	Grafik Analisis Nilai MQ.....	53
Gambar 4. 8	Kadar Aspal Optimum Normal.	54
Gambar 4. 9	Grafik Analisi Nilai Stabilitas.....	61
Gambar 4. 10	Grafik Analisi Nilai Stabilitas.....	62
Gambar 4. 11	Grafik Analisi Nilai VMA.....	63
Gambar 4. 12	Grafik Analisi Nilai VIM.....	64
Gambar 4. 13	Grafik Analisi Nilai VFA	65
Gambar 4. 14	Grafik Analisi Nilai MQ	66
Gambar 4. 15	Grafik LSO	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Ketentuan Sifat – sifat Campuran Laston AC.....	7
Tabel 2. 2	Analisis Saringan Pada Agregat Kasar, Sedang, Halus dan Filler	10
Tabel 2. 3	Persyaratan Agregat Kasar.....	10
Tabel 2. 4	Persyaratan Agregat Halus.....	11
Tabel 2. 5	Ketentuan Filler	12
Tabel 2. 6	Faktor Koreksi Stabilitas	14
Tabel 4. 1	Hasil Pengujian Berat jenis dan penyerapan air agregat halus	31
Tabel 4. 2	Hasil Pengujian Berat jenis dan penyerapan air agregat (0,5).....	32
Tabel 4. 3	Hasil Pengujian Berat jenis dan penyerapan air agregat (1”).....	33
Tabel 4. 4	Hasil Pengujian Sifat Fisik Aspal	34
Tabel 4. 5	Hasil Pengujian Sifat Fisik Aspal	35
Tabel 4. 6	Grading Agregat Halus	36
Tabel 4. 7	Grading Agregat Kasar (0,5).....	36
Tabel 4. 8	Grading Agregat Kasar (1).....	37
Tabel 4. 9	Gradasi Gabungan	38
Tabel 4. 10	Pembuatan Benda Uji Laston AC - WC	40
Tabel 4. 11	Proporsi Agregat Benda Uji	40
Tabel 4. 12	Uji Density Kadar Aspal Gradasi Normal	42
Tabel 4. 13	Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 5% (Normal)	43
Tabel 4. 14	Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 5,5% (Normal)	44
Tabel 4. 15	Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 6% (Normal)	45
Tabel 4. 16	Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 6,5% (Normal)	46
Tabel 4. 17	Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 7% (Normal)	47
Tabel 4. 18	Analisis Terhadap Nilai VIM	48
Tabel 4. 19	Analisis Terhadap Nilai VMA	49
Tabel 4. 20	Analisis Terhadap Nilai VFA	50
Tabel 4. 21	Analisis Terhadap Nilai Stabilitas.....	51
Tabel 4. 22	Analisis Terhadap Nilai Flow.	52
Tabel 4. 23	Analisis Terhadap Nilai MQ	53
Tabel 4. 24	Proporsi Agregat Benda Uji.....	54
Tabel 4. 25	Pembuatan Benda Uji Laston AC – WC (variasi)	55
Tabel 4. 26	Uji Density Kadar Aspal Gradasi Campuran Limestone	56
Tabel 4. 27	Marshall Test 0% (campuran).....	57
Tabel 4. 28	Marshall Test 5% (Campuran).....	57
Tabel 4. 29	Marshall Test 10% (Campuran).....	59
Tabel 4. 30	Marshall Test 15% (Campuran).....	60

DAFTAR NOTASI

Laston	: Lapisan Aspal Beton
AC-WC	: Asphalt Concrete – Wearing Course
AMP	: Asphalt Mixing Plant
MQ	: Nilai Marshall Quotient
S	: Stabilitas
Flow	: Pembacaan dial flow
Gmb	: Berat Volume Campuran Kering
W	: Berat Benda Uji di Udara
B	: Ukuran Benda Uji Volume
VIM	: Volume Pori dalam beton aspal padat
Gmm	: Berat jenis beton aspal maksimum yang tidak dipadatkan
VFA	: Presentase rongga terisi aspal pada campuran setelah pemadatan
a	: Presentase aspal pada batuan
b	: Presentase aspal pada campuran
i dan j	: Rumus Substitusi
O	: Pembacaan dial stabilitas pada alat marshall test
E'	: Angka korelasi volume benda uji
Q	: Kalibrasi alat Marshall
c	: Berat yang sudah kering atau direndam terlebih dahulu
d	: Berat benda uji jenuh air
e	: Volume benda uji
KAO	: Kadar Aspal Optimum
SSD	: Berat jenis kering permukaan jenuh
Pb	: Presentase berat aspal terhadap berat campuran
CA	: Agregat kasar
FA	: Agregat halus
MA	: Agregat sedang
FF	: Agregat halus lolos ayakan No.200 (filler)
K	: Nilai Konstanta

Bk : Berat kering oven
Bj : Berat benda uji kering permukaan jenuh
Bt : Berat piknometer + benda uji + air
Ba : Berat benda dalam air

ABSTRAK

Penelitian ini mengeksplorasi pemanfaatan limbah limestone sebagai pengganti filler dalam campuran aspal AC-WC di Indonesia, seiring dengan meningkatnya permintaan material konstruksi. Metode yang digunakan adalah eksperimen laboratorium, di mana campuran aspal dibuat dengan variasi komposisi limbah limestone dan kadar aspal cair. Pengujian dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI).

Hasil pengujian Marshall menunjukkan kadar aspal optimum (KAO) sebesar 6,4% dengan variasi kadar aspal 5% hingga 7%. Penambahan limbah limestone sebesar 5%, 10%, dan 15% pada kadar aspal 6,4% menghasilkan KPO yang memenuhi karakteristik Marshall, dengan stabilitas tertinggi pada penambahan 10% limestone sebesar 2641,13 kg. Nilai VMA untuk campuran dengan limbah limestone berkisar antara 18,72% – 15,97%, sedangkan untuk benda uji normal antara 15,91% – 17,18%. Semua nilai VMA memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018, yang menetapkan syarat lebih dari 15%.

Kata Kunci : Perkerasan Jalan, Limbah Limestone, Marshall Test.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan infrastruktur yang pesat di berbagai negara, termasuk Indonesia, telah meningkatkan permintaan akan material konstruksi, khususnya aspal concrete. Aspal concrete, yang sering digunakan dalam pembangunan jalan, memerlukan komponen *filler* yang berkualitas untuk meningkatkan kinerja dan daya tahan campuran. Namun, penggunaan material konvensional sebagai *filler* sering kali berdampak negatif terhadap lingkungan, baik dari segi eksploitasi sumber daya alam maupun pengelolaan limbah.

Limbah *limestone*, yang dihasilkan dari berbagai industri, memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengganti filler dalam campuran aspal AC-WC (Asphalt Concrete Wearing Course). Penggunaan limbah ini tidak hanya dapat mengurangi volume limbah yang dihasilkan, tetapi juga dapat mengurangi ketergantungan pada bahan baku konvensional. Selain itu, pemanfaatan limbah *limestone* sebagai *filler* diharapkan dapat memberikan karakteristik yang baik pada campuran aspal, termasuk stabilitas, kekuatan, dan daya tahan terhadap deformasi.

Nilai Marshall merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi kualitas campuran aspal. Parameter ini mencakup stabilitas, flow, dan nilai VMA (Void in Mineral Aggregate), yang semuanya berkontribusi pada kinerja perkerasan jalan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi karakteristik substitusi limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler dalam campuran aspal AC-WC dan dampaknya terhadap nilai Marshall. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan material konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan, serta meningkatkan kualitas infrastruktur jalan di Indonesia.

Dalam konteks pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan, penting untuk mencari alternatif material yang tidak hanya memenuhi standar teknis

tetapi juga ramah lingkungan. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah penggunaan limbah *limestone* sebagai substitusi *filler* dalam campuran aspal AC-WC. Limbah ini, yang sering kali terabaikan, dapat dimanfaatkan untuk mengurangi dampak negatif dari limbah industri serta mengurangi penggunaan bahan baku konvensional yang semakin menipis.

Penggunaan limbah *limestone* sebagai *filler* diharapkan dapat memberikan kontribusi positif terhadap karakteristik fisik dan mekanik campuran aspal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa limbah *limestone* dapat meningkatkan stabilitas campuran, mengurangi deformasi, dan meningkatkan daya tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan. Dengan memanfaatkan limbah ini, diharapkan dapat tercipta campuran aspal yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Selain itu, analisis nilai Marshall menjadi penting dalam penelitian ini untuk menilai kinerja campuran aspal yang menggunakan limbah *limestone*. Parameter yang diukur dalam nilai Marshall, seperti stabilitas dan flow, akan memberikan gambaran yang jelas tentang seberapa baik campuran tersebut dapat berfungsi dalam aplikasi nyata. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh substitusi limbah *limestone* terhadap nilai Marshall, sehingga dapat memberikan rekomendasi yang bermanfaat bagi industri konstruksi dalam upaya menciptakan material yang lebih ramah lingkungan dan berkualitas tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka timbul rumusan masalah yang akan diteliti yaitu :

1. Bagaimana karakteristik limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler pada campuran laston AC – WC.
2. Bagaimana nilai marshall terhadap perkerasan jalan menggunakan campuran limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler campuran laston AC-WC.

3. Berapakah nilai kadar aspal optimum pada pencampuran limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler campuran laston AC – WC.

1.3 Batasan Masalah

1. Penelitian ini akan membahas karakteristik fisik dan kimia dari limbah *limestone* yang digunakan sebagai pengganti sebagian filler dalam campuran aspal AC-WC.
2. Penelitian ini akan mengevaluasi nilai Marshall dari campuran aspal AC-WC yang menggunakan limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler.
3. Penelitian ini juga akan menentukan kadar aspal optimum dalam campuran aspal AC-WC yang menggunakan limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler.

1.4 Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Untuk mengetahui karakteristik limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler dalam campuran laston AC – WC.
2. Untuk mengetahui nilai marshall terhadap perkerasan jalan menggunakan campuran limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler dalam campuran laston AC-WC.
3. Untuk mengetahui nilai kadar aspal optimum pada campuran limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler dalam campuran laston AC – WC.

Adapun manfaat penelitian ini adalah :

1. Mengurangi masalah mengenai limbah *limestone* yang ada disekitar kita sebagai pengganti filler pada campuran laston (AC-WC) untuk perkerasan jalan raya.
2. Dapat menjadi referensi ataupun acuan dalam penelitian-penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pengaruh limbah *limestone*

sebagai pengganti filler pada campuran laston (AC-WC) untuk perkerasan jalan raya.

3. Mengetahui nilai karakteristik marshal yang memiliki nilai stabilitas dan marshall quotient yang baik sehingga bisa dimanfaatkan sebagai campuran laston (AC-WC) untuk perkerasan jalan raya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

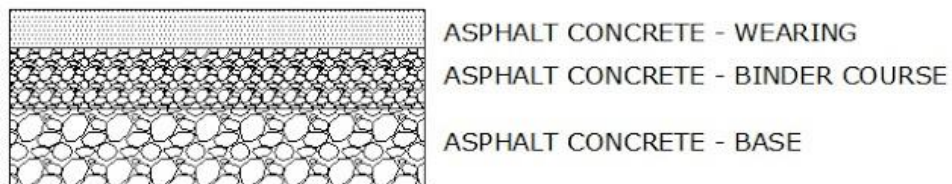
2.1 Aspal

Aspal adalah bahan yang memiliki warna hitam hingga coklat tua, dan pada suhu ruangan, ia berada dalam bentuk padat hingga semi padat. Ketika suhu meningkat, aspal akan meleleh, dan saat suhu menurun, ia akan kembali mengeras (padat). Oleh karena itu, aspal termasuk dalam kategori material termoplastis.

Aspal adalah salah satu jenis material yang paling dikenal, sering terlihat saat kita melewati jalan raya di sekitar kita. Secara definisi, aspal adalah senyawa hidrokarbon yang mengandung sulfur, oksigen, dan klor, yang dihasilkan dan dikelola dari sumber alam berupa minyak bumi. Fungsi utama aspal adalah sebagai bahan pengikat dan pelapis permukaan tanah, yang biasanya dicampur dengan senyawa lain seperti bitumen dan mineral. Dalam praktiknya, aspal berperan untuk mengikat batuan dan komponen lainnya agar tetap melekat pada permukaan jalan. Jenis aspal ini sangat dominan karena sifat alaminya yang dapat mencair saat dipanaskan dan mengeras ketika suhunya menurun.

2.2 Lapis Aspal Beton (Laston)

Merupakan campuran aspal yang terdiri dari kombinasi agregat dan aspal. Dalam campuran ini, aspal berfungsi sebagai pengikat atau lem yang menghubungkan partikel agregat, sementara agregat berperan sebagai penguat. Di Indonesia, aspal beton (Asphalt Concrete atau AC), yang juga dikenal



Gambar 2. 2 Konstruksi laston AC-WC, AC-BC, dan Ac-Base

sebagai Laston (Lapisan Aspal Beton), berfungsi sebagai lapisan permukaan struktural atau lapisan pondasi atas. Aspal beton terdiri dari tiga jenis lapisan,

yaitu Laston Lapis Aus (Asphalt Concrete-Wearing Course atau AC-WC), Laston Lapis Permukaan Antara (Asphalt Concrete - Binder Course atau AC-BC), dan Laston Lapis Pondasi (Asphalt Concrete-Base atau AC-Base) (Sumber: Wab Site KitaSipil.com).

2.2.1 Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC)

Asphalt Concrete - Wearing Course (AC-WC) adalah lapisan perkerasan yang berada di bagian paling atas dan berfungsi sebagai lapisan aus. Meskipun bersifat non-struktural, AC-WC dapat meningkatkan daya tahan perkerasan terhadap penurunan kualitas, sehingga secara keseluruhan memperpanjang masa layanan konstruksi perkerasan. AC-WC memiliki tekstur yang paling halus jika dibandingkan dengan jenis laston lainnya.

2.2.2 Asphalt Concrete – Binder Course (AC-BC)

Lapisan ini adalah lapisan perkerasan yang berada di bawah lapisan aus (wearing course) dan di atas lapisan pondasi (base course). Meskipun tidak terpengaruh langsung oleh cuaca, lapisan ini harus memiliki ketebalan dan kekuatan yang memadai untuk mengurangi tegangan dan regangan akibat beban lalu lintas yang diteruskan ke lapisan di bawahnya, yaitu base dan subgrade (tanah dasar). Salah satu karakteristik terpenting dari campuran ini adalah stabilitas.

2.2.3 Asphalt Concrete – Base (AC-Base)

Lapisan pondasi atas (AC-Base) adalah pondasi perkerasan yang terdiri dari campuran agregat dan aspal dengan perbandingan tertentu, yang dicampur dan dipadatkan dalam kondisi panas. Lapisan ini terletak di bawah lapisan pengikat (AC-BC) dan tidak terpengaruh langsung oleh cuaca, namun harus memiliki stabilitas yang cukup untuk menahan beban lalu lintas yang diteruskan melalui roda kendaraan. Fungsi dari lapis pondasi (AC-Base) adalah untuk memberikan dukungan pada lapisan permukaan, mengurangi regangan dan tegangan, serta menyebarkan dan meneruskan beban konstruksi jalan ke lapisan di bawahnya (subgrade). (Indonesia, 2020)

Berikut ketentuan tentang sifat – sifat campuran laston AC dapat dilihat pada tabel 2.1 dibawah ini :

Tabel 2. 1 Ketentuan Sifat – sifat Campuran Laston AC

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

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga Bidang Jalan dan Jembatan (2018)

2.3 Karakteristik Aspal Beton

Menurut Silvia Sukirman (2003), ada tujuh karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh beton aspal, yaitu stabilitas, daya tahan, kelenturan atau fleksibilitas, ketahanan terhadap kelelahan (fatigue resistance), kekasaran permukaan atau ketahanan geser, kedap air, dan kemudahan dalam pelaksanaan (workability). Berikut adalah penjelasan mengenai ketujuh karakteristik tersebut :

1. Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk, seperti gelombang, alur, atau bleeding. Kebutuhan akan stabilitas berkaitan langsung dengan fungsi jalan dan beban lalu lintas yang dilayani. Jalan yang melayani volume lalu lintas yang tinggi, terutama dengan banyak kendaraan berat, memerlukan perkerasan yang memiliki stabilitas tinggi. Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai stabilitas beton aspal adalah :

- a. Gesekan internal yang dapat berasal dari kekasaran permukaan butir-butir agregat, luas bidang kontak antar butir atau bentuk butir, gradasi agregat, kepadatan campuran dan tebal film aspal.
 - b. Kohesi yang merupakan gaya ikat aspal yang berasal dari daya lekatnya, sehingga mampu memelihara tekanan kontak antar butir agregat.
2. Keawetan atau durabilitas adalah kemampuan beton aspal untuk menahan repetisi beban lalu lintas, seperti berat kendaraan dan gesekan antara roda kendaraan dengan permukaan jalan, serta mengatasi keausan yang disebabkan oleh kondisi cuaca dan iklim, seperti udara, air, atau perubahan suhu. Durabilitas aspal dipengaruhi oleh ketebalan film atau selimut aspal, jumlah pori dalam campuran, serta kepadatan dan kedap air dari campuran tersebut.
3. Kelenturan atau fleksibilitas adalah kemampuan beton aspal untuk menyesuaikan diri akibat penurunan (konsolidasi/*settlement*) dan pergerakan dari pondasi atau tanah dasar, tanpa terjadi retak. Penurunan terjadi akibat dari repetisi beban lalu lintas ataupun akibat beban sendiri tanah timbunan yang dibuat di atas tanah asli.
4. Ketahanan terhadap kelelahan (*Fatigue Resistance*) adalah kemampuan beton aspal untuk menerima lendutan berulang akibat repetisi beban, tanpa terjadinya kelelahan berupa alur dan retak. Hal ini dapat tercapai jika menggunakan kadar aspal yang tinggi.
5. Kekesatan/tahanan geser adalah kemampuan permukaan beton aspal terutama pada kondisi basah, memberikan gaya esek pada roda kendaraan sehingga kendaraan tidak tergelincir ataupun slip. Faktor-faktor untuk mendapatkan kekesatan jalan sama dengan untuk mendapatkan stabilitas yang tinggi, yaitu kekasaran permukaan dari butir-butir agregat, luas bidang

kontak antar butir atau bentuk butir, gradasi agregat, kepadatan campuran dan tebal film aspal.

6. Kedap air adalah kemampuan beton aspal untuk tidak dapat dimasuki air ataupun udara lapisan beton aspal. Air dan udara dapat mengakibatkan percepatan proses penuaan aspal dan pengelupasan selimut aspal dari permukaan agregat.
7. *Workability* adalah kemampuan campuran beton aspal untuk mudah dihamparkan dan dipadatkan. Kemudahan pelaksanaan menentukan tingkat *effisiensi* pekerjaan. Faktor kemudahan dalam proses penghamparan dan pemadatan adalah viskositas aspal, kepekatan aspal terhadap perubahan temperatur dan gradasi serta kondisi agregat.

Ketujuh sifat campuran beton aspal ini tidak mungkin dapat dipenuhi sekaligus oleh satu campuran. Sifat-sifat beton aspal mana yang dominan lebih diinginkan akan menentukan jenis beton aspal yang dipilih. Hal ini sangat perlu diperhatikan ketika merancang tebal perkerasan jalan. Jalan yang melayani lalu lintas ringan seperti mobil penumpang sepantasnya lebih memilih jenis beton aspal yang mempunyai sifat durabilitas dan fleksibilitas yang tinggi daripada memilih jenis beton aspal dengan stabilitas tinggi.

2.4 Agregat

Agregat atau batu atau granular material adalah material berbutir yang keras dan kompak. Istilah agregat mencakup antara lain :

- a. Batu bulat
- b. Batu pecah
- c. Abu batu, dan
- d. Pasir atau mineral lainnya berupa hasil alam atau buatan.

Tabel 2. 2 Analisis Saringan Pada Agregat Kasar, Sedang, Halus dan Filler

Ukuran ayakan		Gradasi Agregat (kumulatif lolos saringan) (%)			
milimeter	inch	Kasar	Sedang	Halus	Filler
19	2/4"	100	100	100	100
12,5	1/2"	89,3	100	100	100
9,5	3/8"	33,5	93,5	100	100
4,75	No. 4	3,0	15,9	96,4	100
2,36	No. 8	2,5	4,6	55,7	100
1,18	No. 16	2,5	4,3	35	100
0,6	No. 30	2,4	4,1	26,8	100
0,3	No. 50	2,4	3,9	19,7	100
0,15	No. 100	2,3	3,5	13,9	100
0,075	No. 200	2,2	3,1	10,6	98

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga Bidang Jalan dan Jembatan (2018)

2.4.1 Agregat Kasar

Agregat kasar adalah agregat yang tertahan saringan No 8 (2,36mm), sedangkan menurut SNI 1969:2008, agregat kasar adalah agregat yang mempunyai ukuran butir antara No 4 (4,75) sampai 40mm (1,5 inch).

Tabel 2. 3 Persyaratan Agregat Kasar

Pengujian			Metode Pengujian	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan		natrium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12%
		magnesium sulfat		Maks. 18%
Abrasi dengan mesin Los Angeles	Campuran AC Modifikasi SMA	100 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 6%
		500 putaran		Maks. 30%
	Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya	100 putaran		Maks. 8%
		500 putaran		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal			SNI 2439:2011	Min. 95%
Butir pecah pada agregat kasar		SMA	SNI 7619:2012	100/90 *)
		Lainya		95/90 **)
Partikel pipih dan lonjong		SMA	ASTM D4791-10 Perbandingan 1 : 5	Maks. 5%
		Lainya		Maks. 10%
Material lolos ayakan No. 200			SNI ASTM C117: 2012	Maks. 1%

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga Bidang Jalan dan Jembatan (2018)

2.4.2 Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat yang lolos saringan No. 8 (2,36mm)

Tabel 2. 4 Persyaratan Agregat Halus

Penguji	Metode Pengujian	Nilai
Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50%
Uji Kadar Rongga Tanpa Pemadatan	SNI 03-6877-202	Min. 45
Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat	SNI 03-4141-1996	Maks. 1%
Agregat Lolos Ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10%

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga Bidang Jalan dan Jembatan (2018)

2.5 Filler

Bahan pengisi (*filler*) adalah material yang harus dalam keadaan kering dan bebas dari gumpalan, serta memiliki 75% partikel yang lolos ayakan No. 200 dan bersifat non-plastis. *Filler* yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen portland.

Adapun ketentuan *filler* pada campuran aspal menurut Bina Marga 2018 adalah:

1. Bahan pengisi yang ditam bahkan (*filler added*) dapat berupa debu batu kapur (*limestone dust*), atau debu kapur padam atau debu kapur magnesium atau dolomit yang sesuai dengan AASHTO M 303-89(2014), atau semen atau abu terbang tipe C dan F yang sumbernya disetujui oleh Pengawas Pekerjaan. Bahan pengisi jenis semen hanya diizinkan untuk campuran beraspal panas dengan bahan pengikat jenis aspal keras Pen.60-70.
2. Bahan pengisi yang ditam bahkan harus kering dan bebas dari gumpalangumpalan dan bila diuji dengan pengayakan sesuai SNI ASTM C136: 2012 harus mengandung bahan yang lolos ayakan No.200 (75 micron) tidak kurang dari 75 % terhadap beratnya.
3. Bahan pengisi yang ditambahkan (*filler added*), untuk semen harus dalam rentang 1% sampai dengan 2% terhadap berat total agregat dan untuk bahan pengisi lainnya harus dalam rentang 1% sam pai dengan

3% terhadap berat total agregat. Khusus untuk SMA tidak dibatasi kadarnya tetapi tidak boleh menggunakan semen.

Tabel 2. 5 Ketentuan Filler

Pengujian	Standart	Nilai
Material Lolos Saringan No. 200	SNI 03-6723-2002	Min. 70%

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga Bidang Jalan dan Jembatan (2018)

2.6 Limbah *Limestone*

Limbah adalah benda yang dibuang baik berasal dari alam maupun dari hasil proses teknologi yang kehadirannya pada suatu saat dan tempat tertentu tidak dikehendaki karena tidak memiliki nilai ekonomis. Batu kapur (*limestone*) adalah material yang diperoleh dari penambangan batu kapur digunakan sebagai bahan tambahan (*filler*) dalam campuran aspal. Batu kapur merupakan batuan sedimen yang sebagian besar terdiri dari kalsium karbonat (CaCO_3) dan terbentuk dari akumulasi sisa-sisa organisme laut yang mengalami proses pengendapan selama ribuan tahun.

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan batu kapur yang berasal dari tambang lokal di Kabupaten Tuban. Penggunaan batu kapur sebagai *filler* dalam campuran aspal dapat meningkatkan sifat mekanik dan kinerja perkerasan jalan serta mengurangi penggunaan bahan baku alam lainnya yang lebih terbatas (Gani et al., 2023). Penggunaan batu kapur sebagai *filler* dalam aspal menjadi sangat penting karena material ini diambil dari sisa penambangan batu kapur. Sisa penambangan ini perlu dikelola secara berkelanjutan, sebab jika dibiarkan akan menimbulkan dampak negatif pada lingkungan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, peneliti memilih limbah batu kapur sebagai campuran aspal untuk mengurangi penggunaan bahan baku alam yang lebih terbatas dan menjaga keseimbangan lingkungan.

Untuk memanfaatkan batu kapur sebagai filler dalam campuran aspal, batu kapur dihancurkan hingga menjadi serbuk halus yang lolos saringan No. 200 atau setara dengan ukuran 0,075 mm sesuai spesifikasi filler perkerasan jalan aspal menurut Bina Marga tahun 2018.

2.7 Marshall

Pengujian Marshall dilakukan untuk menentukan nilai stabilitas dan nilai keelehan (flow). Pengujian ini menggunakan alat Marshall test, yang merupakan alat tekan yang dilengkapi dengan proving ring (cincin penguji) dengan kapasitas 2700 kg. Proving ring digunakan untuk mengukur nilai stabilitas, sedangkan flowmeter digunakan untuk mengukur keelehan plastik atau flow. Dalam pengujian Marshall test, benda uji harus memiliki suhu 60°C atau lebih, yang dicapai dengan merendamnya dalam water bath selama sekitar 45 menit.

Alat uji Marshall memiliki bentuk silinder dengan diameter 10,2 cm dan tinggi 6,35 cm, serta digunakan untuk menganalisis kepadatan dan pori dari campuran padat yang terbentuk. Pengujian Marshall pada campuran aspal concrete bertujuan untuk mengumpulkan data terkait persyaratan campuran dan mendapatkan hasil perhitungan akhir dari sifat-sifat Marshall, seperti :

1. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk, seperti gelombang, alur, atau bleeding. Kebutuhan akan stabilitas berkaitan langsung dengan fungsi jalan dan beban lalu lintas yang akan dilayani.

Stabilitas campuran dipengaruhi oleh gaya gesek internal dan kohesitas. Gaya gesek antara butiran agregat berkaitan dengan sifat agregat, seperti gradasi, bentuk, dan tekstur permukaan. Sementara itu, kohesitas adalah gaya ikat yang dimiliki oleh aspal, yang dipengaruhi oleh jenis dan jumlah bahan pengisi yang ditambahkan. Gaya ikat dan gaya gesek ini berfungsi untuk menahan perpindahan antar butiran agregat akibat beban lalu lintas.

Nilai stabilitas diperoleh dari pembacaan arloji atau yang ditunjukkan oleh jarum dial pada masing-masing benda uji. Untuk menentukan nilai stabilitas, angka yang ditunjukkan oleh jarum dial perlu dikonversi sesuai dengan alat Marshall. Selanjutnya, nilai tersebut juga harus

disesuaikan dengan angka koreksi yang berkaitan dengan ketebalan atau volume benda uji.

Berikut rumus yang digunakan untuk mencari nilai stabilitas sebagai berikut :

$$S = p \times q$$

Keterangan :

S : Nilai stabilitas (kg)

p : Pembacaan arloji tekan x angka korelasi beban

q : Angka koreksi tebal benda uji.

Tabel 2. 6 Faktor Koreksi Stabilitas

Isi Benda Uji (cm ³)	Tebal Benda Uji (mm)	Angka Koreksi
265-276	33,3	3,57
277-289	34,9	3,33
290-301	36,5	3,03
302-316	38,1	2,78
317-328	39,7	2,50
329-340	41,3	2,27
341-353	42,9	2,08
354-367	44,4	1,92
368-379	46,0	1,79
380-392	47,6	1,67
392-405	49,2	1,56
406-420	50,8	1,47
421-431	52,4	1,39
432-443	54,0	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	0,81
599-610	74,6	0,78
611-625	76,2	0,76

Sumber : SNI 06-2489-1991

2. Kelelehan (Flow)

Kelelehan (flow) adalah ketahanan beton aspal terhadap deformasi berulang akibat repetisi beban, tanpa mengalami kerusakan yang ditandai dengan alur dan retak. Kemampuan ini dapat dicapai dengan menggunakan kadar aspal yang optimal.

3. *Voids in Mineral Aggregate* (VMA)

Voids In Mineral Aggregate (VMA) adalah rongga udara yang terdapat di antara mineral agregat dalam campuran aspal yang telah dipadatkan. VMA dihitung berdasarkan berat jenis bulk (G_{sb}) agregat dan dinyatakan sebagai persentase volume bulk (V_{bulk}) dari campuran yang dipadatkan. VMA juga dapat dihitung berdasarkan berat total campuran atau berat total agregat. Nilai VMA dinyatakan dalam persen (%).

a. Terhadap Berat Campuran Total

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

Keterangan :

VMA = Volume pori antar agregat didalam campuran (%)

G_{mb} = Berat jenis *Bulk* campuran (gr/cc)

P_s = Kadar agregat (%)

G_{sb} = Berat jenis *Bulk* dari agregat (gr/cc)

b. Terhadap Berat Agregat Total

$$VMA = 100 - \left[\frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{(100 + P_b)} \times 100 \right]$$

Keterangan:

VMA = Rongga udara pada mineral agregat, prosentase dari volume total, (%)

G_{mb} = Berat jenis campuran setelah pemadatan (gr/cc)

G_{sb} = Berat jenis *bulk* agregat, (gr/cc)

P_b = Kadar aspal, persen total campuran, (%)

4. *Void filled White Bitumen* (VFB)

Void Filled Bitumen (VFB), menyatakan prosentase rongga udara yang terisi aspal pada campuran yang sudah mengalami pemadatan.

$$VFB = 100 - \frac{VMA - VIM}{VMA}$$

Keterangan :

VFB = Volume pori antar butir agregat, prosentase dari VMA (%)

VMA = Volume pori antar agregat didalam campuran (%)

VIM = Rongga udara pada campuran setelah pemadatan (%)

5. *Void in Mix* (VIM)

Void In Mix (VIM) merupakan banyaknya rongga di antara butir – butir agregat yang doselimuti aspal. VIM dinyatakan dalam presentase terhadap volume beton aspal.

$$VIM = 100 - \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Keterangan :

VIM = Rongga udara pada campuran setelah pemadatan (%)

Gmm = Berat jenis maximum campuran (gr/cc)

Gmb = Berat jenis aspal (gr/cc)

6. *Marshall Quotient* (MQ)

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) merupakan hasil bagi antara stabilitas dengan kelelahan (*flow*) dan merupakan pendekatan terhadap tingkat kekakuan dan *fleksibilitas* campuran.

Sifat Marshall tersebut dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$MQ = \frac{MS}{MF}$$

keterangan:

MQ = Marshall Quotient, (kg/mm)

MS = Marshall Stability, (kg)

MF = Flow Marshall, (mm)

2.8 Penentuan KAO

Untuk menentukan kadar aspal optimum yang digunakan, diambil berdasarkan enam karakteristik Marshall, yaitu: Stabilitas, Kelelehan, dan hasil uji Marshall. Kadar aspal optimum kemudian ditentukan dari nilai tengah antara rentang kadar aspal maksimum dan minimum yang memenuhi persyaratan spesifikasi.

2.9 JMF (Job Mix Formula)

Proses merancang dan memilih bahan yang sesuai serta menentukan proporsi relatif bertujuan untuk mencapai kekuatan dan daya tahan tertentu dengan biaya yang seefisien mungkin. Job Mix Formula atau komposisi campuran didasarkan pada fraksi agregat kasar $\frac{3}{4}$ ", agregat sedang $\frac{1}{2}$ ", pasir, dan filler. Dari analisis komposisi gradasi, diperoleh komposisi campuran agregat yang akan digunakan sebagai benda uji. Untuk mengetahui kadar aspal optimum dalam suatu campuran aspal, dilakukan pembuatan variasi aspal (Yudhi Pratama, 2018).

Untuk memperoleh campuran aspal beton yang berkualitas, penting untuk memperhatikan pencampuran agregat. Pencampuran agregat ini sangat mempengaruhi komposisi campuran, sehingga diharapkan dapat menghasilkan campuran yang homogen dengan butir agregat yang memenuhi standar spesifikasi. Salah satu metode yang digunakan adalah Cara Analitis. Prinsip kerja dari metode ini adalah :

1. Tentukan gradasi agregat yang digunakan.
2. Tentukan campuran agregat dan filler. Hitung butiran agregat yang lewat saringan sesuai gradasi lapisan dengan mengalikan presentase agregat.
3. Tentukan spesifikasi ideal terhadap butiran yang lewat saringan nomor 200. Hitung kekurangan butiran yang lewat saringan nomor 200 dengan mengurangkan spesifikasi ideal dengan total butiran lewat saringan nomor 200.
4. Tentukan komposisi campuran

Dalam perencanaan suatu campuran, kadar aspal ditentukan dengan rumus berdasarkan spesifikasi Depkimpraswil 2002 seperti berikut ini:

$$P = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\text{filler}) + K$$

Keterangan :

P = Kadar aspal tengah/ideal, persen terhadap berat campuran

Ca = Persen agregat tertahan saringan No 8

FA = Persen agregat lolos saringan No 8 dan tertahan saringan No.200

Filler = Persen agregat minimal 75% lolos No 200

K = Konstanta; 0,5-1,0 untuk laston; 2,0 – 3,0 untuk lataston.

2.10 Trial And Error

Trial and error (metode coba - coba) merujuk pada upaya atau metode untuk mencapai sebuah tujuan melalui berbagai cara. *Trial and error* juga merupakan metode pemecah masalah, perbaikan, penyetelan, atau memperoleh pengetahuan. Upaya yang dilakukan beberapa kali hingga akhirnya mendapatkan hasil yang di butuhkan. Pendekatan ini dapat dilihat sebagai salah satu dari dua pendekatan dasar untuk pemecahan masalah, dikontraskan dengan pendekatan yang menggunakan wawasan dan teori. Hubungan fungsional antara pengalaman dan teori pada metode ini di tunjukkan untuk mencari solusi yang tepat atau hasil yang diinginkan. Sebab dengan metode *trial and error* kita juga melibatkan eksperimen dan pengalaman dari pada teori. Berbagai macam cara digunakan demi mengetahui cara – cara yang dianggap keliru dan kurang tepat dihilangkan agar mendapatkan hasil atau mencapai tujuan yang diinginkan

Metode *trial and error* digunakan paling berhasil dengan masalah sederhana dan sering kali merupakan pilihan terakhir ketika tidak ada aturan yang jelas berlaku. Namun metode ini tidak berarti bahwa pendekatan tersebut pada dasarnya ceroboh, karena seorang individu dapat dengan leluasa dalam memanipulasi variabel dalam upaya untuk memilah – milah

kemungkinan yang dapat menghasilkan kesuksesan. Namun demikian, metode ini sering digunakan oleh orang – orang yang memiliki sedikit pengetahuan di bidang masalah tersebut.

Tujuan metode trial and error adalah sebagai berikut :

1. Berfokus pada solusi, metode ini tidak berusaha untuk menemukan mengapa solusi bekerja, namun hanya bahwa solusi atau hasil itu ditemukan atau diketahui.
2. Solusi yang dihasilkan atau ditemukan tidak untuk menggeneralisasi solusi untuk masalah lain.
3. Metode ini umumnya adalah upaya untuk menemukan sebuah solusi, namun bukan semua Solusi.
4. Metode ini umumnya adalah upaya untuk menemukan sebuah solusi, namun bukan semua Solusi.

Dimungkinkan untuk menggunakan metode *trial and error* untuk menemukan semua solusi atau solusi yang terbaik, ketika ada sejumlah solusi yang memungkinkan dan dapat diuji. Untuk menemukan semua solusi, peneliti cukup membuat catatan dan melanjutkan, dari pada berhenti di tengah proses, dan ketika solusi di temukan dan telah diuji semua, untuk menemukan yang terbaik.

2.11 Penelitian Terdahulu

No.	Nama dan Tahun Penelitian	Metode Penelitian	Variabel atau Instrumen	Hasil Penelitian
1	(DWI BUDI WINARNO, 2020)	Metode penelitian dalam studi ini dilakukan di Laboratorium PT. Aneka Dharma Persada Sedayu, Bantul, D.I. Yogyakarta. Penelitian ini mengevaluasi penggunaan batu kapur sebagai	Dalam penelitian ini, variabel yang diidentifikasi meliputi variabel bebas, terikat, dan kontrol. Variabel bebas adalah persentase penggunaan batu kapur sebagai substitusi agregat, yang	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan batu kapur sebagai substitusi agregat berpengaruh signifikan terhadap kualitas campuran aspal yang diuji melalui parameter

		substitusi agregat halus dan kasar	bervariasi dari 0%, 25%, 50%, 75%, hingga 100%. Variabel terikat mencakup kualitas campuran aspal yang diukur melalui parameter Marshall, termasuk stabilitas, flow, density, void in mineral aggregate (VMA), void in the mix (VIM), void filled with asphalt (VFA), Marshall Quotient (QM), dan kadar aspal optimum (KAO). Selain itu, variabel kontrol dalam penelitian ini adalah kadar aspal, yang digunakan dalam campuran sebesar 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%	Marshall. Penambahan batu kapur meningkatkan nilai stabilitas, kepadatan, dan kekakuan campuran, terutama pada kadar substitusi 25% hingga 50%. Namun, kadar 100% batu kapur mencatat stabilitas tertinggi, tetapi tidak disarankan karena rongga antar agregat menjadi terlalu rapat dan tidak memenuhi kriteria spesifikasi Bina Marga tahun 2018. Kadar aspal optimum yang diperlukan untuk variasi substitusi batu kapur adalah 6,25% untuk 0% batu kapur, 6,5% untuk 25%, 6,25% untuk 50%, dan 6% untuk 75%, sementara kadar 100% tidak memenuhi syarat yang ditentukan. Nilai flow campuran menurun seiring dengan meningkatnya kadar batu kapur, menunjukkan
--	--	------------------------------------	--	--

				peningkatan stabilitas campuran. Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa batu kapur dapat digunakan sebagai substitusi agregat normal hingga maksimum 75% dari berat agregat total, dengan potensi memberikan kualitas lapisan beton aspal yang baik dan ekonomis.
2	(Memenuhi & Persyaratan, 2023)	Metode penelitian dalam artikel ini terdiri dari beberapa tahapan sistematis, dimulai dengan persiapan bahan dan peralatan. Setelah pemeriksaan bahan untuk merencanakan benda uji, dilakukan pembasahan awal (pre-wetting) agregat untuk memastikan konsistensi campuran slurry seal. Pembuatan benda uji untuk pengujian setting time dan uji Marshall dilakukan setelah mencapai kadar air	Dalam penelitian ini, variabel yang diuji mencakup perbandingan filler, yaitu variasi penggunaan filler fly ash dan mastik asbuton dengan rasio dari 100%:0% hingga 0%:100%. Kadar aspal emulsi yang digunakan adalah 13% dari berat total agregat.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengujian slurry seal dengan variasi campuran filler menghasilkan kinerja yang berbeda. Dengan kadar air 9%, konsistensi optimum tercapai pada semua variasi filler. Waktu pemantapan meningkat seiring bertambahnya penggunaan filler mastik asbuton, karena filler fly ash memiliki kapasitas penyerapan air

		optimum. Selanjutnya, pengujian untuk menentukan waktu pematangan dan karakteristik campuran dilakukan, diikuti dengan analisis data untuk memahami hubungan antar variabel yang diuji. Akhirnya, kesimpulan ditarik berdasarkan analisis tersebut.		yang lebih tinggi. Nilai-nilai karakteristik mekanis Marshall, seperti stabilitas, flow, VMA, dan VIM, mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar filler mastik asbuton, sementara nilai VFA meningkat. Meskipun pengujian menunjukkan penyebaran slurry seal memenuhi spesifikasi Bina Marga, secara keseluruhan, campuran slurry seal tidak memenuhi spesifikasi yang diperlukan untuk diaplikasikan sebagai perkerasan jalan.
3	(et al., 2023)	Metode penelitian ini meliputi langkah-langkah pengujian material campuran aspal sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, pembuatan 45 sampel campuran AC-WC dengan variasi kadar aspal dan filler, serta uji Marshall untuk menentukan Kadar Aspal	Dalam penelitian ini, beberapa variabel diukur dan dianalisis, termasuk kadar aspal yang bervariasi antara 5% hingga 6,2%, dengan spesifikasi seperti 5%, 5,5%, 6%, 6,1%, dan 6,2% pada campuran. Selain itu, penggunaan filler juga diuji	Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar aspal optimum (KAO) ditemukan pada penggunaan filler tertentu dengan variasi aspal yang berbeda. Campuran dengan filler 4% dan aspal 6% menghasilkan nilai densitas

		Optimum (KAO) dan evaluasi karakteristik campuran seperti kepadatan dan stabilitas. Hasil analisis bertujuan untuk meningkatkan efisiensi biaya produksi dengan memanfaatkan material lokal dan limbah.	dengan persentase yang beragam, yaitu 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10%.	2.287, stabilitas 917 kg, flow 3.467 mm, Marshall Quotient 250.09 kg/mm, VIM 3.67%, VMA 15.18%, dan VFB 77.68%. Selain itu, penggunaan filler 10% dengan aspal 6.2% menghasilkan nilai densitas 2.285, stabilitas 1.061 kg, flow 4.00 mm, Marshall Quotient 365.28 kg/mm, VIM 3.31%, VMA 15.64%, dan VFB 78.84%.
4	(Mahli, 2017)	Metode penelitian dalam artikel ini terdiri dari beberapa langkah penting yang melibatkan desain percobaan, pengujian variasi kadar aspal, persiapan benda uji, pengujian metode Marshall, dan analisis data.	Dalam penelitian ini, variabel yang diukur terdiri dari variabel bebas, terikat, dan kontrol. Variabel bebas adalah kombinasi filler limestone dan abu batu, dengan variasi LAB01 (0% limestone), LAB02 (25% limestone), LAB03 (50% limestone), LAB04 (75% limestone), dan LAB05 (100% limestone). Variabel terikat mencakup nilai	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limestone sebagai filler dalam campuran AC-WC berpengaruh signifikan terhadap berbagai parameter pengujian. Nilai VIM dan VMA meningkat hingga kombinasi 50% limestone : 50% abu batu, namun mengalami penurunan pada proporsi lebih

			pengujian volumetrik seperti VIM, VMA, dan VFB, serta kinerja mekanik seperti stabilitas Marshall, flow, Marshall Quotient (MQ), kuat tarik tidak langsung (ITS), dan kekakuan. Variabel kontrol meliputi kadar aspal yang ditetapkan sebesar 6,75% dan metode pengujian menggunakan metode Marshall sesuai standar SNI.	tinggi. Pengujian stabilitas Marshall menunjukkan semua kombinasi filler memenuhi syarat, kecuali flow pada kombinasi 75% limestone : 25% abu batu dan 100% limestone : 0% abu batu yang melebihi batas maksimum. Terdapat penurunan nilai kuat tarik tidak langsung (ITS) dan kekakuan seiring dengan peningkatan persentase limestone, dengan kombinasi 50% limestone : 50% abu batu memberikan kinerja yang optimal. Kesimpulannya, penambahan limestone mempengaruhi sifat mekanik dan fisik campuran, sehingga disarankan menggunakan kombinasi tersebut untuk hasil terbaik.
--	--	--	---	---

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah metode eksperimen di laboratorium. Campuran aspal diproduksi dengan menggunakan limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian filler dengan variasi dan komposisi dan aspal cair sebagai bahan pengikatnya. Pengujian dilakukan dengan menggunakan Standar Nasional Indonesia (SNI).

Tahap awal dilakukan pengujian terhadap material yang akan digunakan. Kemudian setelah sampel briket telah dibuat, dilakukan pengujian untuk mendapatkan nilai permeabilitas, stabilitas, dan kelelahan melalui Pengujian Marshall. Dari pengujian ini diharapkan akan diperoleh komponen penyusun dan persentase komposisi yang terdapat dalam material dan briket aspal AC-WC.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Teknik Sipil Universitas Bojonegoro



Gambar 3. 1 Lokasi Penelitian

Sumber : Goggle Earth

3.3 Populasi, Sampel dan Teknik Pengambilan Sampel

Pada penelitian ini menggunakan metode cara basah, yaitu dengan cara pencampuran agregat limbah limestone dengan agregat alami, dan sudah ditambahkan bitumen/aspal panas. Penelitian ini menggunakan variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, untuk mencari nilai KAO dan variasi pengganti agregat limbah limestone 5%, 10%, 15%, dari berat total benda uji.

3.4 Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dari hasil pengujian terhadap aspal, agregat, campuran antara aspal dan agregat untuk perkerasan Asphalt Concrete – Wearing Course (AC-WC). Berdasarkan persyaratan dan spesifikasi yang telah ditentukan dan dilakukan pengujian terhadap nilai stabilitas, flow, VIM, VMA, dan Marshall Quotient dan indek peredaman terhadap seluruh benda uji dengan menggunakan alat marshall. Pengambilan data pada alat marshall dilakukan dengan mencatat besarnya gaya yang didapat menghancurkan benda uji tersebut. Dari pengujian marshall, akan didapatkan kadar aspal optimum (KAO).

3.5 Analisis Data

Metode yang di gunakan dalam penelitian ini adalah Metode *Trial and error*. Metode *trial and error* adalah suatu metode pendalaman materi dengan mencoba dan menemukan, dimana metode ini merujuk pada upaya untuk mencapai tujuan melalui percobaan. Upaya ini dilakukan hingga beberapa kali hingga mendapatkan hasil yang paling sesuai.

Berikut langkah penelitian yang dilakukan sesuai dengan diagram alir penelitian, yaitu :

1. Persiapan alat dan bahan
Pengujian agregat kasar, halus, dan *filler*, pengujian agregat kasar dan halus meliputi analisa saringan, berat jenis dan penyerapan air dengan acuan SNI 03-1970-1990. Sedangkan pengujian *filler* harus lolos saringan no. 200, minimal 70% sesuai dengan acuan

spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dan bebas dari semua bahan yang tidak dikehendaki, dan harus dalam keadaan kering.

2. Perencanaan *Job Mix Formula*

Urutan proses atau dapat disebut tahapan dalam menentukan campuran benda uji adalah sebagai berikut :

- a. Menentukan berat total benda uji untuk mempermudah menentukan persentase campuran.
- b. Menentukan kadar bahan tambah limbah beton dengan persentase 5%, 10%, dan 15% dari berat total campuran.
- c. Menentukan kadar agregat kasar 1,2 pada masing – masing variasi.
- d. Menentukan kadar agregat kasar, halus, *filler*, dan aspal pada masing – masing persentase.

3. Pembuatan benda uji

Langkah – langkah dalam pembuatan benda uji pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Menyiapkan bahan campuran seperti aspal, agregat kasar, agregat halus, dan *filler*. Kemudian timbang bahan sesuai dengan JMF (*Jon Mix Formula*) yang telah ditentukan.
- b. Menyiapkan alat – alat untuk pembuatan benda uji, seperti kompor gas, tabung gas, wajan, penumbuk, cetakan, dan lain sebagainya.
- c. Memanaskan aspal hingga mencair hingga suhu di atas 150°C
- d. Memanaskan agregat kasar, halus, dan *filler* sambil di aduk hingga mencampur sampai suhu lebih dari 150°C.
- e. Mencampur agregat yang telah di panaskan dengan aspal yang telah ditentukan sesuai JMF (*Jon Mix Formula*) dan diaduk hingga aspal merata.
- f. Menyiapkan cetakan benda uji (*mould*) lengkap dengan alas cetakan yang sudah diolesi minyak pelumas dan

kertas lakmus pada dasar cetakan dan diatas campuran setelah campuran di masukan pada cetakan.

- g. Memasukan campuran yang telah di panaskan kedalam cetakan dan ditusukan besi agar campuran memenuhi ruang yang kosong pada cetakan dengan prosedur menusuk bagian pinggir dan tengah sebanyak 25 kali.
 - h. Dilakukan penumbukan pada campuran didalam cetakan dengan tumbukan sebanyak 150 kali, yang di bagi 75 kali setiap sisinya.
 - i. Setelah penumbukan selesai benda uji di dikeluarkan dari cetakan dengan menggunakan dongkrak.
 - j. Setelah dingin benda uji di timbang untuk mengetahui berat kering benda uji. Dan setelah itu benda uji direndam dalam air sampai kurang lebih 24 jam.
 - k. Setelah benda uji di rendam kurang lebih 24 jam, benda uji kembali ditimbang dengan metode ditimbang dalam air dan di timbang kering permukaan atau SSD.
 - l. Rendam benda uji kedalam bak pemanas hingga suhu lebih dari 60°C.
 - m. Uji *marshall* benda uji setelah panas benda uji lebih dari atau sama dengan 60°C.
4. Pengujian dengan alat *marshall*
Pengujian dengan alat *marshall test* deilakukan dengan langkah – langkah sebagai berikut :
- a. Ukur diameter dan tinggi benda uji
 - b. Merendam benda uji pada bak pemanas selama kurang lebih 45 menit hingga suhu lebih dari atau sama dengan 60°C.
 - c. Setelah benda uji memenuhi suhu yang telah ditentukan, benda uji yang akan di tes diangkat dari bak pemanas dan di letakan pada cetakan penekan alat *marshall test*.

- d. Letakan cetakan penekan di bawah ring *marshall test* pada posisi lurus dan rata.
- e. Nyalakan mesin dengan arah panel *UP* untuk memulai uji *marshall*. Proses ini dilakukan dengan kecepatan 51mm permenit, kemudian dibaca pada saat arloji (*dial*) stabilitas berhenti atau berputar kembali.

5. Analisis hasil dan kesimpulan

Sesuai dengan acuan penelitian terdahulu, penelitian ini akan fokus pada pembahasan mengenai karakteristik limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian *Filler* terhadap nilai *marshall* yang meliputi :

- a. Stabilitas
- b. Kelelehan (*flow*)
- c. VMA
- d. VIM
- e. VFA
- f. Kepadatan (*density*)
- g. MQ (*marshall quotient*).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

4.1.1 Pengujian Material

Pengujian utama material agregat yang dilakukan terdiri pengujian berupa analisis saringan agregat kasar, agregat halus dan filler (Dep. PU, SNI ASTM C136:2012). Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar (Dep. PU, SNI 1969:2016). Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus (Dep. PU, SNI 1970:2016). Tahapan pertama pada penelitian ini adalah memilih material batu pecah dengan batasan ukuran yang telah ditentukan, kemudian dilakukan pemeriksaan berat jenis dalam kondisi kering permukaan (Saturated Surface Dry) dan semu (Apparent Specific Gravity). Standar agregat yang digunakan harus memiliki berat jenis minimum 2,5 gram/cm³ dan penyerapan air maksimum sebesar 3%.

Langkah pertama dalam tahapan penelitian ini adalah memilih material batu pecah dengan batasan ukuran yang telah ditentukan, kemudian dilakukan pemeriksaan berat jenis dalam kondisi kering permukaan (saturated surface dry) dan semu (apparent specific gravity). Langkah selanjutnya yaitu memeriksa berat air yang dapat diserap pori melalui tes penyerapan air, adapun pemilihan agregat digolongkan menjadi FA (Fine Agregat), MA (Medium Agregat) dan Bottom ash sebagai pengganti CA (Course Agregat).

Berikut adalah hasil dari pengujian agregat yang telah dilakukan, dimulai dari pengujian ukuran agregat yang kecil hingga agregat yang berukuran besar :

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Berat jenis dan penyerapan air agregat halus

Pengujian Penyerapan Air Agregat Halus	A	B	C	Satuan
Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD)	500	500	500	Gram
Berat benda uji kering - oven, Bk	495.61	494.17	493.67	Gram
Berat piknometer diisi air, B	694	665.94	680.66	Gram
Berat piknometer + benda uji (SSD) + air, Bt	995.07	994.37	995.66	Gram
Kadar air	1.12			%
Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Halus	A	B	C	Rata-rata
Berat Jenis (Bulk) $\frac{Bk}{(B + 500 - Bt)}$	2.49	2.88	2.67	2.68
Berat jenis kering permukaan jenuh $\frac{500}{(B + 500 - Bt)}$	2.51	2.91	2.70	2.71
Berat jenis semu (apparent) $\frac{Bk}{(B + Bk - Bt)}$	2.55	2.98	2.76	2.76
Penyerapan $\frac{500 - Bk}{Bk} \times 100\%$	0.89	1.18	1.28	1.12

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dari hasil ujipropertis berat jenis dan dan penyerapan air agregat halus di dapatkan nilai kadar air 1.12%, Bulk 2.68%, SSD 2.71%, Semu 2.76%, dan penyerapan 1.12%.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Berat jenis dan penyerapan air agregat (0,5)

Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar	A	B	C	Satuan
Berat benda uji kering - oven, Bk	2000	2000	2000	Gram
Berat benda uji kering permukaan jenuh Bj	2041	2039	2020	Gram
Berat benda didalam air Ba	1272	1278	1262	Gram
Kadar air	1.67			%

Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar	A	B	C	Rata-rata
Berat Jenis (Bulk) $\frac{B_k}{(B_j - B_a)}$	2.60	2.63	2.64	2.62
Berat jenis kering permukaan jenuh $\frac{B_j}{(B_j - B_a)}$	2.65	2.68	2.66	2.67
Berat jenis semu (apparent) $\frac{B_k}{(B_k - B_a)}$	2.75	2.77	2.71	2.74
Penyerapan $\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\%$	2.05	1.95	1	1.67

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dari hasil ujipertis berat jenis dan dan penyerapan air agregat kasar (0,5) di dapatkan nilai kadar air 1.67%, Bulk 2.62%, SSD 2.66%, Semu 2.74%, dan penyerapan 1.67%.

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Berat jenis dan penyerapan air agregat (1’')

Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar	A	B	C	Satuan
Berat benda uji kering - oven, B _k	2000	2000	2000	Gram
Berat benda uji kering permukaan jenuh B _j	2048	2053	2091	Gram
Berat benda didalam air B _a	1156	1164	1163	Gram
Kadar air	3.20			%

Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar	A	B	C	Rata-rata
Berat Jenis (Bulk) $\frac{B_k}{(B_j - B_a)}$	2.24	2.25	2.16	2.22
Berat jenis kering permukaan jenuh $\frac{B_j}{(B_j - B_a)}$	2.30	2.31	2.25	2.29
Berat jenis semu (apparent) $\frac{B_k}{(B_k - B_a)}$	2.37	2.39	2.39	2.38
Penyerapan $\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\%$	2.4	2.65	4.55	3.20

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dari hasil ujipropertis berat jenis dan dan penyerapan air agregat kasar (1’’) di dapatkan nilai kadar air 3.20%, Bulk 2.22%, SSD 2.29%, Semu 2.38%, dan penyerapan 3.20%.

Persyaratan spesifikasi minimal berat jenis bulk adalah 2.5 dan penyerapan agregat tidak boleh lebih dari 3% kurang atau lebih dari itu maka agregat tidak dapat digunakan. Pemeriksaan agregat ini digunakan untuk mencari hasil berat jenis bulk dari total agregat dan berat jenis efektif dari agregat.

4.1.2 Pengujian Sifat Fisik Pen 60/70

Aspal Penetrasi 60/70 adalah aspal dengan nilai penetrasi 60 sampai 79 (SNI 1737:1989-F). Penetrasi 60/70 sering dipakai di Indonesia

dikarenakan menyesuaikan iklim yang terjadi di Indonesia. Pengujian penetrasi ini sangat dipengaruhi oleh faktor berat beban total, ukuran sudut dan kehalusan permukaan jarum, temperatur dan waktu. Oleh karena itu, perlu disusun dengan rinci ukuran, persyaratan dan batasan peralatan, waktu dan beban yang digunakan dalam penentuan penetrasi aspal. Cara uji ini dimaksudkan sebagai acuan para penanggung jawab dan teknisi laboratorium aspal untuk menentukan penetrasi aspal serta menyeragamkan cara pengujian untuk pengendalian mutu aspal agar diperoleh hasil pengujian yang akurat dan benar.

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Sifat Fisik Aspal

NO	JENIS PEMERIKSAAN	A	B	Rata-rata	Satuan	Spek.
1	Pemeriksaan (Penetrasi test) 25° C : 100 gr : 5 second	69	68	68.5	0.1 mm	60-70

Hasil pengujian penetrasi diketahui bahwa aspal dari perusahaan Berlian Aspal Bakar Kabupaten Bogor yang digunakan tergolong aspal yang keras. Ditinjau pada suhu ruang memiliki nilai penetrasi 68,5. Aspal yang keras memiliki kisaran 60-70 menurut SNI 2456-2011.

4.1.3 Pengujian Titik Lembek Aspal

Titik lembek ialah temperatur pada saat bola baja dengan berat tertentu,medesak turun lapisan aspal yang tertahan dalam cincin berukuran tertentu,sehingga aspal menyentuh pelat dasar yang terletak di bawah cincin pada jarak 25,4 mm, sebagai akibat kecepatan pemanasan tertentu. Titik lembek aspal bervariasi antara 30°C sampai 200°C, dua aspal yang mempunyai nilai penetrasi yang sama belum tentu mempunyai titik lembek yang sama. Aspal dengan titik lembek yang lebih tinggi kurang peka terhadap perubahan temperatur, aspal jenis ini lebih cocok apabila digunakan sebagai bahan pengikat pada konstruksi perkerasan jalan lentur, (Spesifikasi BinaMarga tahun 2010-Revisi 2). Aspal sebagai bahan yang bersifat viskoelastik (mudah berubah sifat jika terkena suhu). Dalam suhu tinggi (panas) aspal bersifat lunak sampai cair, dan pada suhu rendah (dingin) aspal bersifat keras sampai padat. Untuk mengetahui sifat viskositas

ini diperlukan Pengujian Titik Lembek Aspal. Persyaratan nilai pengujian titik lembek untuk aspal keras ditunjukkan pada Tabel 4.5 :

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Sifat Fisik Aspal

NO	JENIS PEMERIKSAAN	A	B	Rata-rata	Satuan	Spek.
1	Kelembekan (Softening Point Test) SNI. 2434-2011	53	54	53,5	°C	48-58

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan angka titik lembek aspal yang berkisar 30°C sampai 157°C dengan cara Ring and Ball. Untuk aspal yang biasa digunakan pada perkerasan jalan, yaitu aspal pen 60/70 mempunyai titiklembek minimal 48°C.

4.2 Rancangan Gradasi Campuran untuk Campuran AC-WC

Gradasi campuran ini dilakukan dengan agregat baru sehingga bisa memenuhi gradasi yang disyaratkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 revisi II. Komposisi rancangan campuran dibagi menjadi fraksi-fraksi tertentu, meliputi:

1. Agregat Kasar (Coarse Aggregate) dengan ukuran 10-15 mm,.
2. Agregat Sedang (Medium Aggregate) dengan ukuran 5-10 mm.
3. Agregat Halus (Fine Aggregate) dengan ukuran 0-5 mm.
4. Filler abu batu.

Spesifikasi campuran yang digunakan yaitu Bina Marga 2018 Revisi II divisi 6, untuk mencapai resep spesifikasi maka peneliti mencoba sebuah komposisi campuran dengan menggabungkan material agregat kasar, agregat halus serta filler menjadi campuran homogen dan mempunyai susunan butir yang diharapkan mampu memenuhi standart spesifikasi yang disyaratkan. Fraksi agregat yang ditentukan dari 4 fraksi tersebut masing – masing akan dibagi menjadi 2 bagian untuk proses grading atau ayakan yang mana akan memiliki berat yang berbeda lalu akan di rata-rata dari berat kumulatif persen agregat yang lolos.

Ayakan (Grading) yang dilakukan menggunakan alat saringan agregat dari ukuran bukaan saringan yang terbesar hingga yang terkecil yaitu ½”-200” dimana akan menghasilkan gradasi untuk pencampuran komposisi AC-WC. Komposisi rancangan campuran terbagi atas empat fraksi yaitu Agregat FA (Fine Agregat), Agregat MA (Medium Agregat), Agregat Bottom Ash sebagai pengganti CA (Course Agregat), Filler dengan abu batu. Berikut ini adalah tabel untuk hasil analisa saringan di lakukan 2 kali pengambilan sampel lalu di rata rata nilai yang lolos per saringan.

Tabel 4. 6 Grading Agregat Halus

AYAKAN		I			II			KUMULATIF TERTAHAN		RATA-RATA
		BERAT TERTAHAN	% TERTAHAN	& LOLOS	BERAT TERTAHAN	% TERTAHAN	& LOLOS	I	II	
ASTM	MM									
1.0"	25.0	0	0.00	100.00	0	0.00	100.00	0.00	0.00	100
3/4"	19.0	0	0.00	100.00	0	0.00	100.00	0.00	0.00	100
1/2"	12.5	9	0.36	99.64	11	0.44	99.56	9.00	11.00	99.6
3/8"	9.5	194	8.12	91.88	198	8.36	91.64	203.00	209.00	91.76
#4	4.75	552	30.20	69.80	558	30.68	69.32	755.00	767.00	69.56
#8	2.36	701	58.24	41.76	716	59.32	40.68	1456.00	1483.00	41.22
#16	1.18	336	71.68	28.32	327	72.40	27.60	1792.00	1810.00	27.96
#30	0.600	274	82.64	17.36	265	83.00	17.00	2066.00	2075.00	17.18
#50	0.300	219	91.40	8.60	212	91.48	8.52	2285.00	2287.00	8.56
#100	0.150	132	96.68	3.32	130	96.68	3.32	2417.00	2417.00	3.32
#200	0.075	77	99.76	0.24	76	99.72	0.28	2494.00	2493.00	0.26
PAN		4	99.92	0.08	5	99.92	0.08	2498.00	2498.00	0.08
Berat Contoh		2498	Gram		2498	Gram				

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 7 Grading Agregat Kasar (0,5)

AYAKAN		I			II			KUMULATIF TERTAHAN		RATA-RATA
		BERAT TERTAHAN	% TERTAHAN	& LOLOS	BERAT TERTAHAN	% TERTAHAN	& LOLOS	I	II	
ASTM	MM									
3/4"	19.0	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100
1/2"	12.5	118.00	4.72	95.28	112.00	4.48	95.52	118.00	112.00	95.4
3/8"	9.5	483.00	24.04	75.96	479.00	23.64	76.36	601.00	591.00	76.16
#4	4.75	704.00	52.20	47.80	770.00	54.44	45.56	1305.00	1361.00	46.68
#8	2.36	698.00	6.00	94.00	656.00	80.68	19.32	2003.00	2017.00	56.66
#16	1.18	274.00	91.08	8.92	290.00	92.28	7.72	2277.00	2307.00	8.32
#30	0.600	131.00	96.32	3.68	115.00	96.88	3.12	2408.00	2422.00	3.4
#50	0.300	37.00	97.80	2.20	31.00	98.12	1.88	2445.00	2453.00	2.04
#100	0.150	27.00	98.88	1.12	20.00	98.92	1.08	2472.00	2473.00	1.1
#200	0.075	27.00	99.96	0.04	26.00	99.96	0.04	2499.00	2499.00	0.04
PAN		0.00	99.96	0.04	0.00	99.96	0.04	2499.00	2499.00	0.04
Berat contoh		2499	Gram		2499	Gram				

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

Tabel 4. 8 Grading Agregat Kasar (1)

AYAKAN		I			II			KUMULATIF TERTAHAN		RATA- RATA
		BERAT TERTAHAN	% TERTAHAN	& LOLOS	BERAT TERTAHAN	% TERTAHAN	& LOLOS	I	II	
ASTM	MM									
3/4"	19	0	0	100	0	0	100	0	0	100
1/2"	12.5	292	11.68	88.32	298	11.92	88.08	292.00	298.00	88.2
3/8"	9.5	1018	52.40	47.60	1024	0.24	99.76	1310.00	6.00	73.68
#4	4.75	763	82.92	17.08	762	30.72	69.28	2073.00	768.00	43.18
#8	2.36	253	93.04	6.96	241	40.36	59.64	2326.00	1009.00	33.3
#16	1.18	133	98.36	1.64	131	45.60	54.40	2459.00	1140.00	28.02
#30	0.600	19	99.12	0.88	19	46.36	53.64	2478.00	1159.00	27.26
#50	0.300	4	99.28	0.72	6	46.60	53.40	2482.00	1165.00	27.06
#100	0.150	8	99.60	0.40	5	46.80	53.20	2490.00	1170.00	26.8
#200	0.075	8	99.92	0.08	9	47.16	52.84	2498.00	1179.00	26.46
Berat Contoh		2498	Gram		2495	Gram				

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

4.3 Pembuatan Amplop Gradasi Lapisan AC-WC

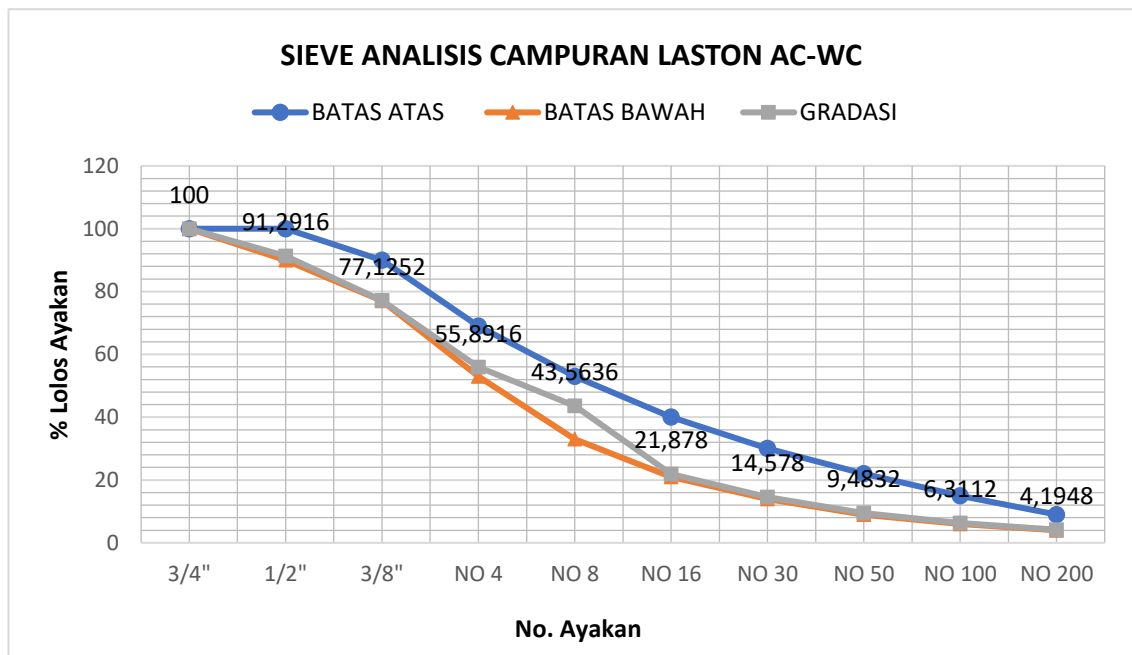
Spesifikasi campuran yang digunakan yaitu Bina Marga 2018 divisi 6 ,untuk mencapai resep spesifikasi maka peneliti mencoba sebuah komposisi campuran dengan menggabungkan material agregat kasar, agregat halus serta filler menjadi campuran homogen dan mempunyai susunan butir yang diharapkan mampu memenuhi standart spesifikasi yang disyaratkan. Fraksi agregat yang ditentukan dari 4 fraksi tersebut masing – masing akan dibagi menjadi 2 bagian untuk proses grading / ayakan yang mana akan memiliki berat yang berbeda lalu akan di rata-rata dari berat kumulatif persen agregat yang lolos. Untuk mendapatkan gradasi gabungan yang memenuhi standar Bina Marga 2018 divisi 6 maka diperlukan trial and error, yang mana hasil dari gradasi gabungan diharapkan mampu memenuhi atau tidak melebihi dari batas pada kisaran nilai kurva yang telah disyaratkan oleh Bina Marga 2018.

Menentukan proporsi agregat kasar, sedang dan halus, maka digunakan jarak yang sama dari kurva ke luar gradasi agregat, kemudian dilihat ke nomer saringan terdekat. Hasil garis perpotongan kurva luar dari saringan no 1” sampai no ½” untuk agregat kasar hingga sedang dan no.3/8 sampai no 200 untuk agregat halus. Perincian akhir persentase gradasi masing-masing komponen agregat setelah dilakukan trial and error adalah seperti pada Tabel 4.8 Gambar 4.1

Tabel 4. 9 Gradasi Gabungan

SIEVE SIZE		Hot Bin I	Hot Bin II	Hot Bin III	FILLER	JUMLAH	SPEK	
							BB	BA
3/4"	19	100.00	100.00	100.00	100.00	100	100	100
1/2"	12.5	49.14	95.40	99.60	100.00	91.2916	90	100
3/8"	9.5	18.30	76.16	91.76	100.00	77.1252	77	90
NO 4	4.75	12.26	46.68	69.56	100.00	55.8916	53	69
NO 8	2.360	8.08	56.66	41.22	100.00	43.5636	33	53
NO 16	1.180	6.02	8.32	27.96	100.00	21.878	21	40
NO 30	0.600	4.46	3.40	17.18	100.00	14.578	14	30
NO 50	0.300	3.00	2.04	8.56	100.00	9.4832	9	22
NO 100	0.150	1.82	1.10	3.32	100.00	6.3112	6	15
NO 200	0.075	0.34	0.04	0.26	100.00	4.1948	4	9
A	Hot Bin I						14	%
B	Hot Bin II						30	%
C	Hot Bin III						52	%
D	FILLER						4	%
TOTAL							100	%

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.



Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Gabungan

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa gradasi gabungan telah memenuhi persyaratan spesifikasi umum Bina Marga 2018 divisi 6 perkerasan aspal, dengan

hasil perhitungan grading dan gradasi gabungan diatas diperoleh presentase agregat dari masing-masing variasi yang mana untuk gradasi gabungan terdiri dari agregat kasar (10-15 mm) 14%, agregat Medium (5-10 mm) 30%, agregat halus (0-5 mm) 52%, dan Filler Abu Batu 4%. Tidak ada nilai gradasi gabungan yang kurang dari batas minimum atau melebihi batas maksimum. Setelah mendapatkan presentase komposisi agregat, hal yang selanjutnya dikerjakan peneliti adalah menentukan berat total rencana 1260 gram. Agregat dengan presentase masing-masing yang telah di dapat kemudian dikalikan dengan berat satu mould tersebut untuk dapat membuat satu benda uji dengan kadar yang telah ditentukan peneliti.

4.4 Penentuan Kadar Aspal Rencana

Rumus yang digunakan untuk menentukan kadar aspal rencana dengan acuan Asphalt Institute adalah sebagai berikut :

$$P_b = 0,035(\%CA) + 0,045(\%FA) + 0,18(\%FF) + K$$

Dimana:

P_b = Kadar aspal rencana, persen terhadap berat campuran

CA = Agregat kasar, persen agregat tertahan saringan no. 8

FA = Agregat halus, persen agregat lolos saringan no. 8 dan tertahan saringan no. 200

FF = Agregat lolos ayakan no. 200

K = Konstanta (nilai K sekita 0,5 sampai 1,0 untuk AC dan 2,0 – 3,0 untuk HRS).

$$\begin{aligned} P_b &= 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%FF) + K \\ &= 0,035(56,44\%) + 0,045(39,36\%) + 0,18(4,2\%) + 1 \\ &= 5,502600 \% \text{ dibulatkan menjadi } 6\% \end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai P_b dari beberapa variasi, hasil yang diperoleh kadar aspal rencana yang akan digunakan ($P_b = 6,0\%$). Pada penelitian ini, untuk mendapatkan nilai kadar aspal optimum (KAO) maka untuk Gradasi Gabungan dibuat di buat variasi dengan 5 kadar aspal dengan jumlah benda uji 15, benda uji masing-masing kadar 3 benda uji. Variasi kadar yang digunakan adalah ($P_b - 1,0\%$), ($P_b - 0,5\%$), ($P_b\%$), ($P_b + 0,5\%$), dan ($P_b + 1,0\%$), dijelaskan pada Tabel 4.9 berikut :

Tabel 4. 10 Pembuatan Benda Uji Laston AC - WC

Perkiraan Kadar Aspal	Gradasi Batas Tengah	Keterangan
5,0%	3 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu
5,5%	3 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu
6,0%	3 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu
6,5%	3 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu
7,0%	3 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu
Jumlah	15 buah	

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

4.5 Pembuatan Benda Uji AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course)

Pembuatan 1 benda uji maka digunakan presentase jumlah masing-masing agregat dari hasil analisa gradasi gabungan pada masing-masing variasi, sebagai berikut :

Tabel 4. 11 Proporsi Agregat Benda Uji

Perkiraan Berat Isian Mould Standar		1260					
KOMPOSISI CAMPURAN		KOMPOSISI AGGREGAT	KADAR ASPAL RENCANA				
KADAR ASPAL RENCANA		%	5	5.5	6	6.5	7
A	HOT BIN I	14%	167.58	166.70	165.82	164.93	164.05
B	HOT BIN II	30%	359.1	357.2	355.3	353.4	351.5
C	HOT BIN III	52%	622.44	619.16	615.89	612.61	609.34
D	Filler	4%	47.88	47.63	47.38	47.12	46.87
BERAT AGREGAT CAMPURAN (gr)			1197	1191	1184	1178	1172
BERAT ASPAL (gr)			63	69.3	75.6	81.9	88.2
BERAT RENCANA TOTAL CAMPURN (gr)			1260	1260	1260	1260	1260

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Berat presentase agregat gradasi gabungan di siapkan sampai memenuhi berat campuran yang ditentukan, pada gradasi gabungan dilakukan metode yang berdeda dari mulai proses pencampuran agregat dimana terlebih dahulu agregat kasar (10–15 mm) dimasukkan dalam penggorengan yang sudah dipanaskan, digoreng durasi waktu ± 15 menit. Kemudian barulah agregat lainnya dimasukkan kedalam penggorengan dengan suhu konstan, diaduk sampai agregat campuran benar-benar

homogen dan mengering. Campuran agregat hasil penggorengan di timbang kembali dan dimasukkan perkiraan kadar aspal sesuai pada Tabel 4.10. Kadar aspal yang dimasukkan diambil dari berat campuran agregat hasil penggorengan, pencampuran kadar aspal dan agregat diaduk sampai benar-benar homogen, pada proses ini penimbangan agregat dijelaskan pada Tabel 4.10. Kemudian campuran yang sudah jadi dipanaskan kembali ke dalam oven dengan suhu 150°C dengan durasi ± 1 jam, setelah itu campuran hasil oven di tumbuk dengan alat Marshall manual compactor dengan jumlah tumbukan 75 per bidang.

Tabel 4. 12 Uji Density Kadar Aspal Gradasi Normal

cc	KODE BENDA UJI	TINGGI			DIAMETER			RATA-RATA		faktor koreksi stabilitas	BERAT KERING	BERAT DALAM AIR	BERAT SSD	flow	stabilitas
		sisi 1	sisi 2	sisi 3	sisi 1	sisi 2	sisi 3	tinggi	diameter						
5	i	69.03	70.10	69.86	102.25	102.26	192.35	69.66	132.29	0.86	1192	669	1194	2.67	140
	ii	69.96	70.58	70.76	102.64	101.75	101.81	70.43	102.07	0.85	1193	658	1195	2.54	151
	iii	70.33	70.02	70.91	10.61	102.65	101.55	70.42	71.60	0.85	1191	674	1193	2.48	168
5,5	i	69.19	72.11	73.32	101.97	101.35	101.93	71.54	101.75	0.83	1190	670	1192	2.65	208
	ii	65.86	67.20	69.65	101.48	101.22	101.30	67.57	101.33	0.91	1188	659	1190	2.45	164
	iii	71.33	68.05	69.17	101.74	102.02	101.91	69.52	101.89	0.87	1186	674	1188	2.38	190
6	i	63.38	68.90	68.85	101.67	102.23	101.78	67.04	101.89	0.92	1189	670	1191	2.43	153
	ii	67.53	67.93	69.16	101.35	102.24	102.06	68.21	101.88	0.90	1187	658	1190	2.32	159
	iii	67.75	65.80	68.88	101.81	101.73	101.86	67.48	101.80	0.91	1185	675	1187	2.28	210
6,5	i	68.36	68.23	67.62	102.20	102.00	102.28	68.07	102.16	0.90	1190	668	1192	1.85	190
	ii	68.20	70.09	67.33	101.22	101.80	101.98	68.54	101.67	0.89	1192	679	1195	2.10	168
	iii	65.07	67.10	68.39	101.84	101.86	101.96	66.85	101.89	0.92	1193	675	1196	1.95	198
7	i	68.12	68.44	67.07	102.08	102.34	102.22	67.88	102.21	0.90	1186	675	1188	1.70	195
	ii	67.02	68.18	68.13	102.33	102.15	102.24	67.78	102.24	0.90	1184	664	1185	1.88	158
	iii	66.82	65.92	68.23	102.00	102.01	102.33	66.99	102.11	0.92	1182	674	1184	1.97	183

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 13 Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 5% (Normal)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN			
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	$((100/(A/T))+\{100-A\}/V))$	$N \times G / T$	$(100-A) \times G/U$	$H-G \times 100/H$	$100 - K$	$A-\{100-A \times Q/100\}$	$((M-L)/M)*100$	$\{V-U/V.U\} \times T$				R/S	$C/(E-D)$
5	0.86	1192	669	1194	525	2.27		4.30	84.39	7.27	15.61		53.41		140	1838.45	2.67	688.6	2.27
	0.85	1193	658	1195	537	2.22		4.21	82.58	9.27	17.42		46.81		151	1949.59	2.54	767.6	2.22
	0.85	1191	674	1193	519	2.29		4.34	85.30	6.28	14.70		57.30		168	2169.63	2.48	874.9	2.29
			rata-rata		527.0	2.26	2.45	4.28	84.09	7.61	15.91	4.99	52.51	0.01	153	1985.89	2.56	777.0	2.26
KETERANGAN						HASIL TES						AGREGAT		(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT		
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			5	%	A :	HOT BIN I		2.22	2.38	14		%	
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.26	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62	2.74	30		%	
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			7.61	%	C :	HOT BIN III		2.68	2.76	52		%	
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			1985.89	kg	D :	filler		2.59	2.59	4		%	
BJ. SEMU				2.69		KELELEHAN			2.56	mm									

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 14 Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 5,5% (Normal)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY	
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN				
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y	
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	((100/(A/T)+(100-A)/V))	N x G / T	(100-A) x G/U	H-G x 100/H	100 - K	A-(100-A*Q/100)	((M-L)/M)*100	(V-U/V.U)*T				R/S	C/(E-D)	
5.5	0.83	1190	670	1192	522	2.28		12.06	83.38	6.23	16.62		62.51		208	2622.48	2.65	989.6	2.28	
	0.91	1188	659	1190	531	2.24		11.83	81.83	8.63	18.17		52.51		164	2266.71	2.45	925.2	2.24	
	0.87	1186	674	1188	514	2.31		12.20	84.40	5.09	15.60		67.37		190	2503.24	2.38	1051.8	2.31	
			rata-rata			522.3	2.27	2.43	12.03	83.20	6.65	16.80	5.49	60.80	0.01	187	2464.1	2.49	988.9	2.27
KETERANGAN						HASIL TES					AGREGAT			(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT			
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			5.5	%	A :	HOT BIN I		2.22	2.38	14	%			
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.27	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62	2.74	30	%			
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			6.65	%	C :	HOT BIN III		2.68	2.76	52	%			
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2464.14	kg	D :	filler		2.59	2.59	4	%			
BJ. SEMU				2.69		KELELEHAN			2.49	mm										

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 15 Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 6% (Normal)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN			
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	$((100/(A/T)+(100-A)/V))$	$N \times G / T$	$(100-A) \times G/U$	$H-G \times 100/H$	$100 - K$	$A-(100-A \times Q/100)$	$((M-L)/M) \times 100$	$(V-U/V.U) \times T$				R/S	$C/(E-D)$
6	0.92	1189	670	1191	521	2.28		13.17	83.03	5.46	16.97		67.80		153	2141.47	2.43	880.2	2.28
	0.90	1187	658	1190	532	2.23		12.88	81.18	7.57	18.82		59.76		159	2163.94	2.32	932.7	2.23
	0.91	1185	675	1187	512	2.31		13.36	84.21	4.12	15.79		73.88		210	2909.01	2.28	1275.9	2.31
			rata-rata		521.7	2.28	2.41	13.13	82.81	5.72	17.19	5.99	67.15	0.01	174	2404.8	2.34	1029.6	2.28
KETERANGAN						HASIL TES					AGREGAT			(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT		
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			6	%	A :	HOT BIN I		2.22		2.38	14		%
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.28	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62		2.74	30		%
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			5.72	%	C :	HOT BIN III		2.68		2.76	52		%
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2404.81	kg	D :	filler		2.59		2.59	4		%
BJ. SEMU				2.69		KELELEHAN			2.34	mm									

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 16 Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 6,5% (Normal)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY	
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN				
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y	
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	((100/(A/T)+(100-A)/V))	N x G / T	(100-A) x G/U	H-G x 100/H	100 - K	A-(100- A*Q/100)	((M- L)/M)*100	(V-U/V.U)*T				R/S	C/(E-D)	
6.5	0.90	1190	668	1192	524	2.27		14.20	82.19	5.26	17.81		70.46		190	2594.48	1.85	1402.4	2.27	
	0.89	1192	679	1195	516	2.31		14.44	83.60	3.63	16.40		77.85		168	2261.64	2.10	1077.0	2.31	
	0.92	1193	675	1196	521	2.29		14.32	82.87	4.48	17.13		73.87		198	2783.82	1.95	1427.6	2.29	
			rata-rata		520.3	2.29	2.40	14.32	82.88	4.46	17.12	6.49	74.06	0.01	185	2546.6	1.97	1302.3	2.29	
KETERANGAN						HASIL TES						AGREGAT		(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT			
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			6.5		%	A :	HOT BIN I		2.22		2.38	14		%
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.29		gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62		2.74	30		%
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			4.46		%	C :	HOT BIN III		2.68		2.76	52		%
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2546.65		kg	D :	filler		2.59		2.59	4		%
BJ. SEMU				2.69		KELELEHAN			1.97		mm									

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 17 Marshall Test Perkiraan Kadar Aspal 7% (Normal)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN			
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	$((100/(A/T)+(100-A/V))$	$N \times G / T$	$(100-A) \times G/U$	$H-G \times 100/H$	$100 - K$	$A-(100-A \times Q/100)$	$((M-L)/M)*100$	$(V-U/V.U)*T$				R/S	$C/(E-D)$
7	0.90	1186	675	1188	513	2.31		15.57	83.22	2.88	16.78		82.83		195	2675.29	1.70	1573.7	2.31
	0.90	1184	664	1185	521	2.27		15.30	81.80	4.53	18.20		75.08		158	2172.92	1.88	1155.8	2.27
	0.92	1182	674	1184	510	2.32		15.61	83.43	2.64	16.57		84.07		183	2564.61	1.97	1301.8	2.32
			rata-rata		514.7	2.30	2.38	15.49	82.82	3.35	17.18	6.99	80.66	0.01	179	2470.9	1.85	1343.8	2.30
KETERANGAN						HASIL TES						AGREGAT			(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT	
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			7	%	A :	HOT BIN I		2.22	2.38	14		%	
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.30	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62	2.74	30		%	
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			3.35	%	C :	HOT BIN III		2.68	2.76	52		%	
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2470.94	kg	D :	filler		2.59	2.59	4		%	
BJ. SEMU				2.69		KELELEHAN			1.85	mm									

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

4.6 Uji Marshall Kadar Aspal Variasi AC-WC

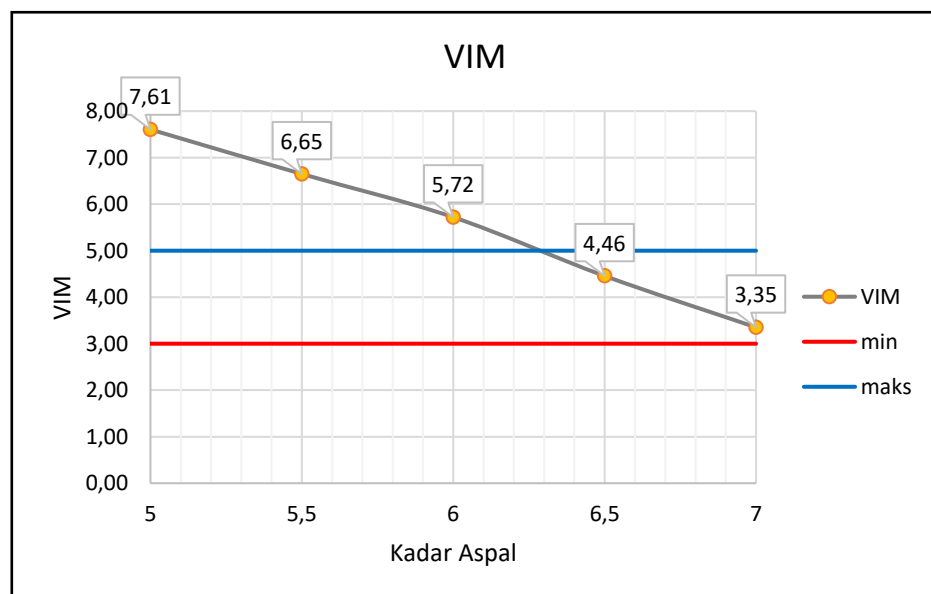
Tahap selanjutnya kita analisa hasil dari Marshall Test dari kedua variasi gradasi gabungan yaitu nilai stabilitas, kelelehan (flow), VIM , VMA , VFA dan MQ (Marshall Quotient). Grafik terhadap pengujian marshall akan dijelaskan dibawah ini :

4.6.1 Analisis Terhadap Nilai VIM

Tabel 4. 18 Analisis Terhadap Nilai VIM

Kadar Aspal (%)	VIM (%)	Spesifikasi (%)	Keterangan
5.0	7,61	(3 – 5) Spek. Umum Bina Marga 2018 (Revisi II Divisi 6)	<i>Tidak</i>
5.5	6,65		<i>Tidak</i>
6.0	5,72		<i>Tidak</i>
6.5	4,46		<i>Memenuhi</i>
7.0	3,35		<i>Memenuhi</i>

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro



Gambar 4. 2 Grafik Analisis Nilai V.I.M.

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

VIM atau *Void in Mix* merupakan volume pori yang masih tersisa setelah campuran aspal dipadatkan dan dibutuhkan untuk tempat bergesernya butir-butir agregat. Akibat pemadatan tambahan yang terjadi oleh repetisi beban lalu lintas, atau tempat jika aspal menjadi lunak akibat meningkatnya temperatur. Pada Grafik

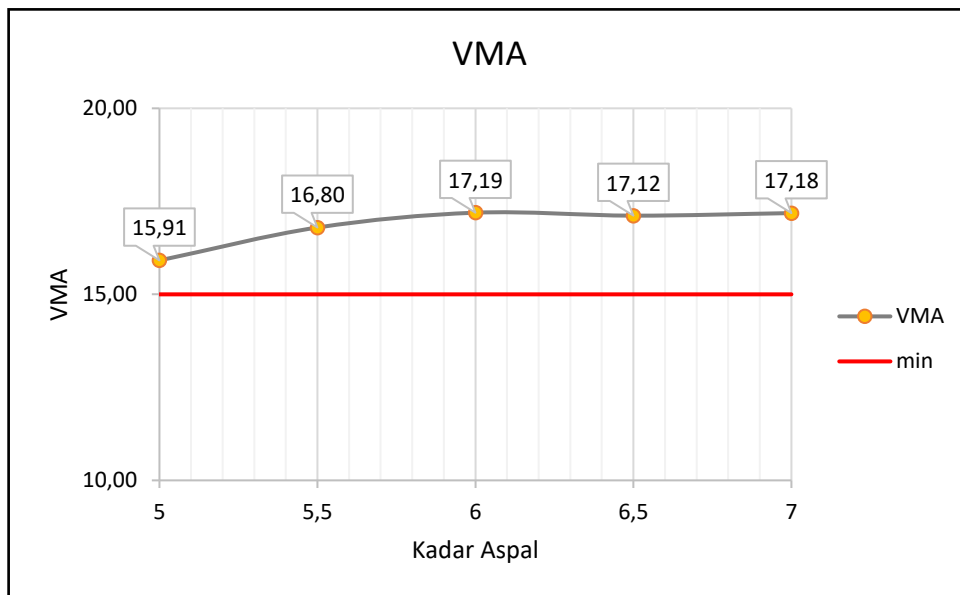
4.2 menunjukkan hasil pengujian pada VIM sudah memenuhi spesifikasi pada penambahan kadar aspal 5.0%-7.0%. Pori udara yang ada setelah dicampurkan dengan aspal pada kadar tersebut mempunyai campuran yang baik dari segi kadar aspal serta gradasi agregat yang rapat sehingga campuran dapat terwujud dengan maksimal. Sedangkan penambahan pada kadar aspal 5.0%-6,0% tidak memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi II Divisi 6.

4.6.2 Analisis Terhadap Nilai VMA

Tabel 4. 19 Analisis Terhadap Nilai VMA

Kadar Aspal (%)	VMA (%)	Spesifikasi (%)	Keterangan
5.0	15,91	(Min. 15) Spek. Umum Bina Marga 2018 (Revisi II Divisi 6)	<i>Memenuhi</i>
5.5	16,80		<i>Memenuhi</i>
6.0	17,19		<i>Memenuhi</i>
6.5	17,12		<i>Memenuhi</i>
7.0	17,18		<i>Memenuhi</i>

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.



Gambar 4. 3 Grafik Analisis Nilai V.M.A.

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

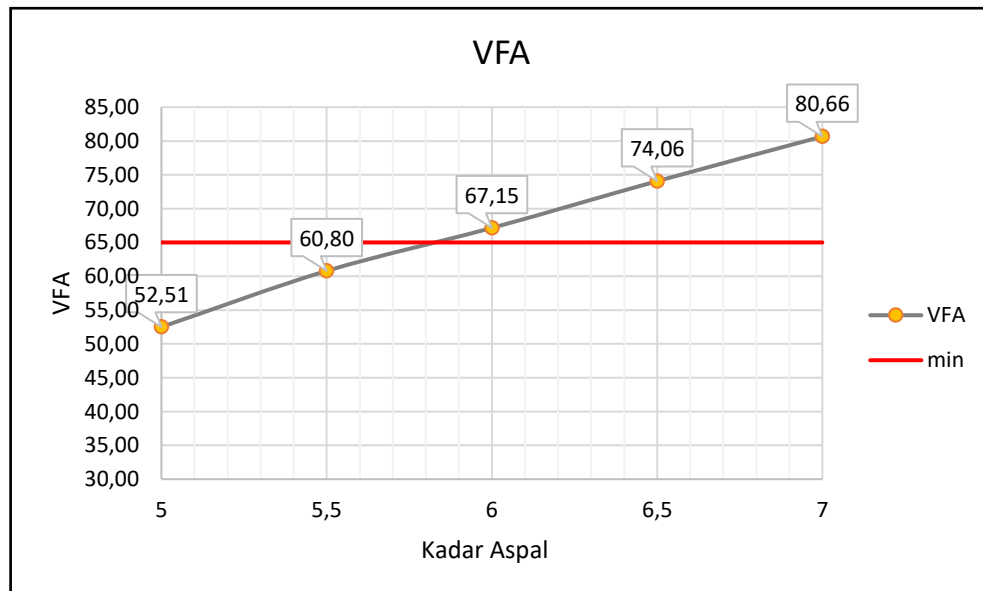
VMA atau *Void in the Mineral Aggregate* merupakan volume pori udara diantara butir agregat sebelum dicampur dengan aspal. Persentase yang didapat pada setiap kadar aspal mengalami peningkatan. Hasil tabel menunjukkan semakin banyak kadar aspal yang disubstitusikan semakin tinggi pula nilai VMA yang didapat memenuhi spesifikasi 15%.

4.6.3 Analisis Terhadap VFA

Tabel 4. 20 Analisis Terhadap Nilai VFA

Kadar Aspal (%)	VFA (%)	Spesifikasi (%)	Keterangan
5.0	52,51	Min 65 Spek. Umum Bina Marga 2018 (Revisi II Divisi 6)	<i>Tidak</i>
5.5	60,80		<i>Tidak</i>
6.0	67,15		<i>Memenuhi</i>
6.5	74,15		<i>Memenuhi</i>
7.0	80,66		<i>Memenuhi</i>

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro



Gambar 4. 4 Grafik Analisis Nilai V.F.A.

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

VFA atau *Volume of Voids Filled with Asphalt* yaitu volume pori udara yang terisi aspal. Tidak jauh berbeda dengan VMA, nilai VFA juga mengalami

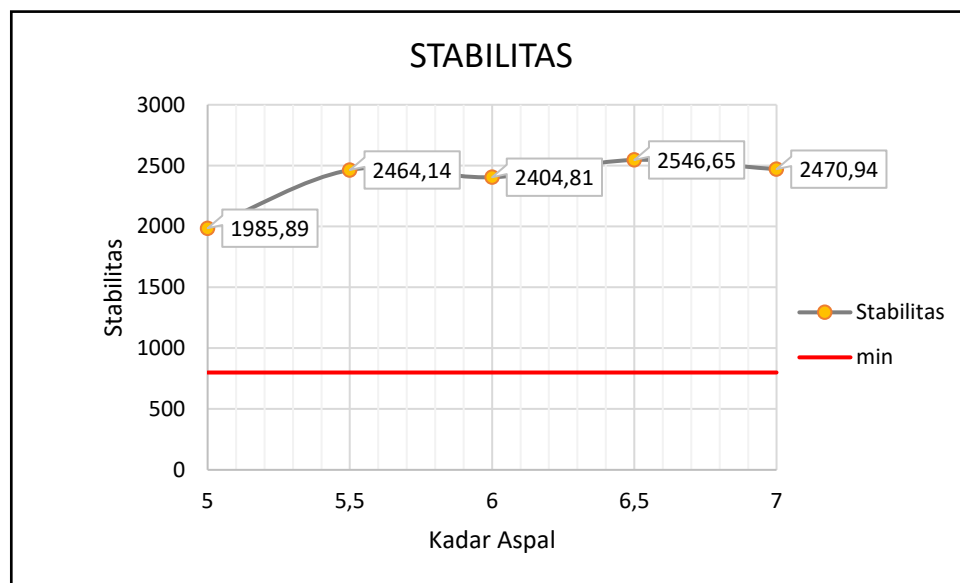
peningkatan setiap kadar aspalnya. Namun hanya pada kadar aspal 5.0% dan 5.5% tidak memenuhi standar spesifikasi minimal yaitu 65%.

4.6.4 Analisis Terhadap Nilai Stabilitas

Tabel 4. 21 Analisis Terhadap Nilai Stabilitas

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (%)	Spesifikasi (Kg)	Keterangan
5.0	1985,89	(Min. 800) Spek. Umum Bina Marga 2018 (Revisi II Divisi 6)	<i>Memenuhi</i>
5.5	2464,14		<i>Memenuhi</i>
6.0	2404,81		<i>Memenuhi</i>
6.5	2546,65		<i>Memenuhi</i>
7.0	2470,94		<i>Memenuhi</i>

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.



Gambar 4. 5 Grafik Analisis Nilai Stabilitas.

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

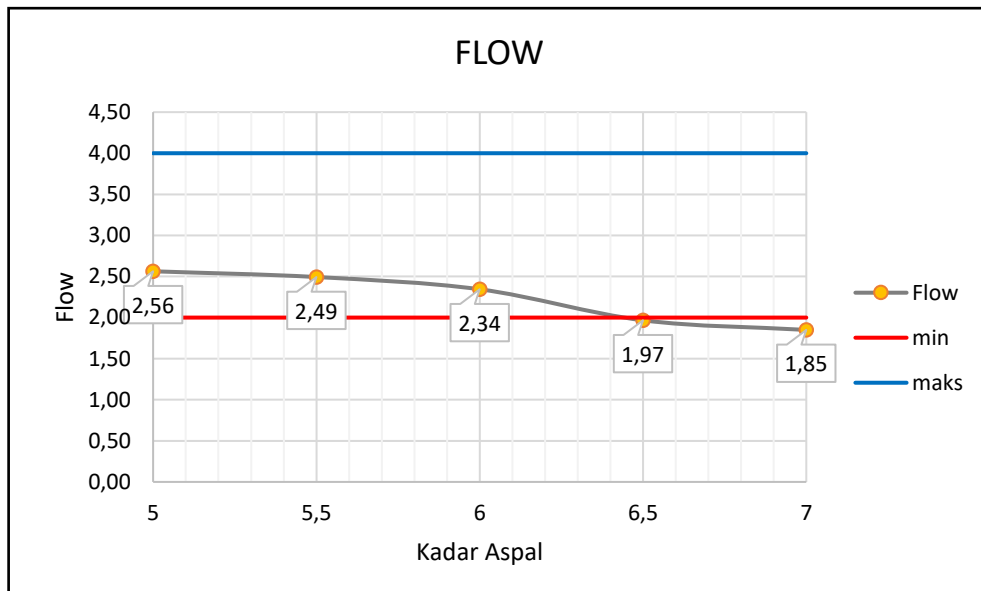
Pada Grafik 4.6 Dapat dilihat bahwa setiap kadar sudah memenuhi spesifikasi yang ada dan semakin tinggi kadar aspal yang digunakan semakin besar pula hasil stabilitas yang didapatkan.

4.6.5 Analisis Terhadap Nilai Flow

Tabel 4. 22 Analisis Terhadap Nilai Flow.

Kadar Aspal (%)	Flow (%)	Spesifikasi (mm)	Keterangan
5.0	2,56	2.0 - 4.0 Spek. Umum Bina Marga 2018 (Revisi II Divisi 6)	Memenuhi
5.5	2,49		Memenuhi
6.0	2,34		Memenuhi
6.5	1,97		Tidak
7.0	1,85		Tidak

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.



Gambar 4. 6 Grafik Analisis Nilai Flow.

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

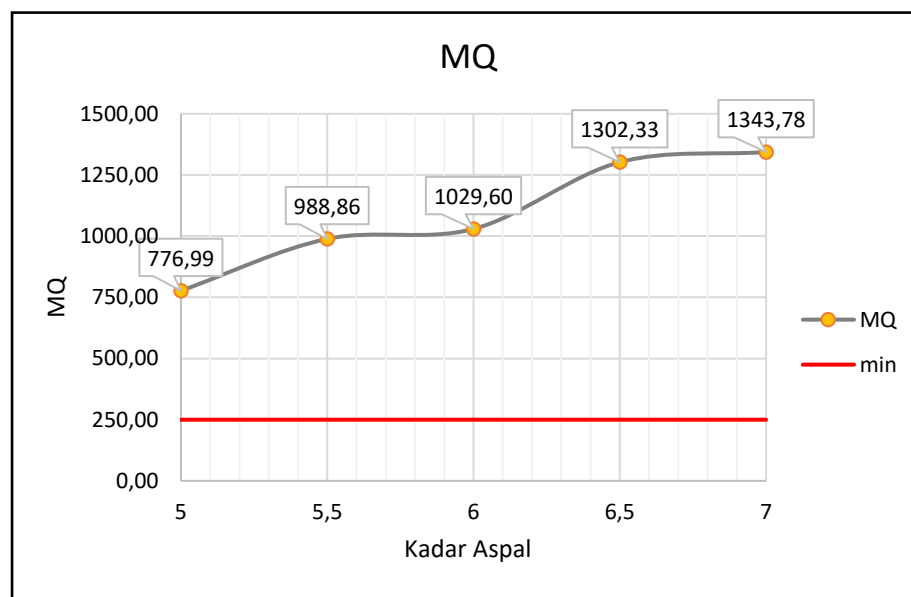
Nilai Flow tertinggi yaitu pada kadar aspal 5% menurut grafik trendline, menunjukkan sifat aspal sebagai bahan pengikat pada campuran bersifat elastis sehingga dapat menahan dan menyebarkan beban kendaraan hingga merata, namun pada kadar aspal 6.5% dan 7.0% nilai flow menunjukkan penurunan dan tidak masuk dalam nilai spesifikasi yang dibutuhkan.

4.6.6 Analisis Terhadap Nilai Marshall Quotient (MQ)

Tabel 4. 23 Analisis Terhadap Nilai MQ

Kadar Aspal (%)	MQ (%)	Spesifikasi (Kg/mm)	Keterangan
5.0	776,99	Min 250 Spek. Umum Bina Marga 2018 (Revisi II Divisi 6)	Memenuhi
5.5	988,86		Memenuhi
6.0	1029,60		Memenuhi
6.5	1302,33		Memenuhi
7.0	1343,78		Memenuhi

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.



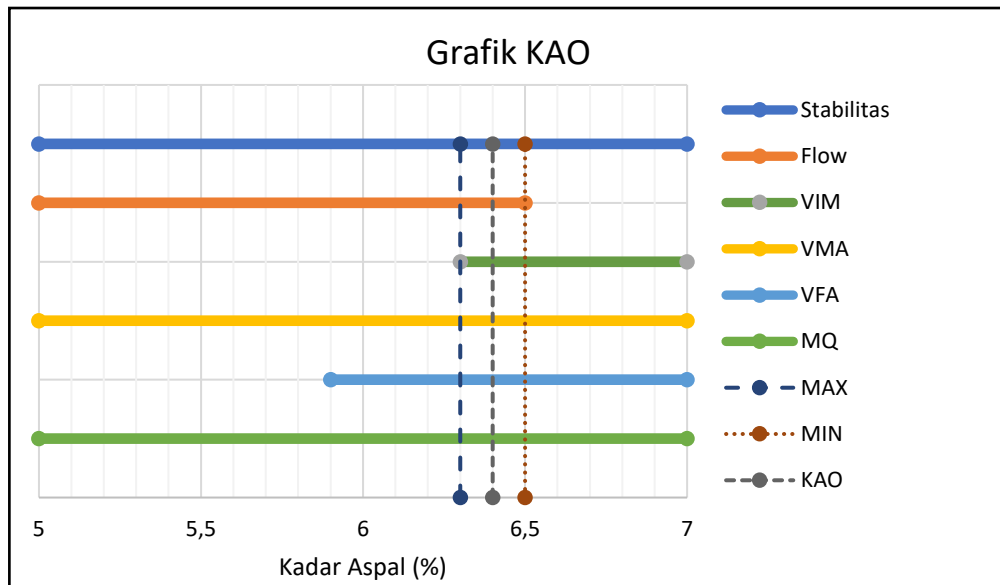
Gambar 4. 7 Grafik Analisis Nilai MQ.

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

Pada pengujian diperoleh hasil yang memenuhi spesifikasi pada setiap kadarnya. Nilai MQ (Marshall Question) yang paling baik yaitu pada kadar aspal 7,0% yang mengakibatkan aspal dapat memiliki sifat lentur dalam menahan beban kendaraan tapi tetap kaku tidak mudah bleeding karena masih dalam kisaran spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi II Divisi 6.

4.7 Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Penentuan kadar aspal optimum (KAO) ditentukan dari hubungan beberapa parameter pengujian *Job Mix Formula* (JMF) aspal AC-WC dengan standar yang disyaratkan dengan nilai stabilitas yang tertinggi, seperti pada Gambar 4.8 dibawah ini :



Gambar 4. 8 Kadar Aspal Optimum Normal.

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

Hasil pangujian marshall dengan menggunakan kadar aspal rencana semula (5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7%) untuk campuran AC-WC diperoleh KAO yang ditentukan dari menggabungkan nilai VIM, VMA, VFA, Stabilitas, Flow dan Marshall Quotient yang mendapatkan suatu selang kadar aspal yang memenuhi syarat dan diambil nilai stabilitas tertinggi tersebut yaitu 6,4%.

4.8 Pembuatan Benda Uji AC-WC Campuran Limestone

Pembuatan 1 benda uji maka digunakan presentase jumlah masing-masing agregat dari hasil analisa gradasi gabungan pada masing-masing variasi, sebagai berikut :

Tabel 4. 24 Proporsi Agregat Benda Uji

			KADAR PENAMBAHAN LIME STONE			
KOMPOSISI CAMPURAN		KOMPOSISI AGGREGAT	0%	5%	10%	15%
KADAR ASPAL OPTIMUM		%	6.40	6.40	6.40	6.40
a	HOT BIN I	14%	165.1	165.1	165.1	165.1
b	HOT BIN II	30%	353.8	353.8	353.8	353.8
c	HOT BIN III	52%	613.3	613.3	613.3	613.3
d	Filler	4%	47.2	47.2	47.2	47.2
BERAT AGREGAT CAMPURAN (gr)			1179.4	1179.4	1179.4	1179.4
BERAT ASPAL OPTIMUM (gr)			80.6	80.6	80.6	80.6
BERAT FILLER (gr)			47.2	44.8	42.5	40.1
BERAT LIME STONE (gr)			0.00	2.36	4.72	7.08
BERAT RENCANA TOTAL CAMPURAN (gr)			1260.0	1260.0	1260.0	1260.0

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro

Berat presentase agregat gradasi gabungan di siapkan sampai memenuhi berat campuran yang ditentukan, pada gradasi gabungan dilakukan metode yang berdeda dari mulai proses pencampuran agregat dimana terlebih dahulu agregat kasar (10–15 mm) dimasukkan dalam penggorengan yang sudah dipanaskan, digoreng durasi waktu ± 15 menit. Kemudian barulah agregat lainnya dimasukkan kedalam penggorengan dengan suhu konstan, diaduk sampai agregat campuran benar-benar homogen dan mengering. Campuran agregat hasil penggorengan di timbang kembali dan dimasukkan perkiraan kadar aspal sesuai pada Tabel 4.10. Kadar aspal yang dimasukkan diambil dari berat campuran agregat hasil penggorengan, pencampuran kadar aspal dan agregat diaduk sampai benar-benar homogen, pada proses ini penimbangan agregat dijelaskan pada Tabel 4.10. Kemudian campuran yang sudah jadi dipanaskan kembali ke dalam oven dengan suhu 150°C dengan durasi ± 1 jam, setelah itu campuran hasil oven di tumbuk dengan alat Marshall manual compactor dengan jumlah tumbukan 75 per bidang. Hal tersebut dilakukan berulang-ulang sampai memenuhi jumlah benda uji yang direncanakan sesuai pada Tabel 4.10.

Dari perhitungan proporsi campuran AC-WC normal di atas, peneliti melakukan perhitungan proporsi campuran AC-WC dengan variasi 5 %, 10, % dan 15 % (Limbah *Limestone*).

Tabel 4. 25 Pembuatan Benda Uji Laston AC – WC (variasi)

Perkiraan Kadar Aspal	Gradasi Batas Tengah	Keterangan
0%	5 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu + <i>Limestone</i>
5%	5 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu + <i>Limestone</i>
10%	5 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu + <i>Limestone</i>
15%	5 buah	Campuran agregat dengan spesifikasi AC-WC + <i>Filler</i> abu batu + <i>Limestone</i>
Jumlah	20 buah	

Sumber : Uji Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 26 Uji Density Kadar Aspal Gradasi Campuran Limestone

VARIASI	KODE BENDA UJI	TINGGI			DIAMETER			RATA-RATA		faktor koreksi stabilitas	BERAT KERING	BERAT DALAM AIR	BERAT SSD	flow	stabilitas
		sisi 1	sisi 2	sisi 3	sisi 1	sisi 2	sisi 3	tinggi	diameter						
0%	i	67.18	66.79	65.56	102.00	102.04	101.22	66.51	101.75	0.92	1187	663	1189	3.12	243
	ii	71.74	69.74	64.98	101.72	101.71	102.56	68.82	102.00	0.88	1182	673	1184	2.36	210
	iii	71.77	67.66	87.77	102.99	102.37	102.48	75.73	102.61	0.76	1185	658	1187	3.50	165
	iv	67.57	67.50	67.63	102.65	101.68	101.75	67.57	102.03	0.90	1187	633	1189	1.28	148
	v	65.05	64.97	66.78	101.67	103.03	101.75	65.60	102.15	0.93	1180	663	1182	1.75	163
5%	i	65.75	64.39	65.48	102.67	101.50	101.49	65.21	101.89	0.93	1185	673	1187	2.86	165
	ii	98.17	97.47	97.38	100.06	101.93	101.22	97.67	101.07	0.25	1187	675	1189	3.35	160
	iii	65.53	65.17	65.66	101.96	101.82	101.30	65.45	101.69	0.95	1189	674	1191	2.45	145
	iv	70.12	70.17	69.61	101.30	101.39	101.15	69.97	101.28	0.86	1185	672	1187	3.11	175
	v	66.94	67.34	66.74	101.09	100.97	101.04	67.01	101.03	0.92	1187	668	1189	4.40	230
10%	i	64.85	65.21	65.41	101.67	100.92	100.25	65.16	100.95	0.96	1182	675	1185	3.20	190
	ii	64.89	65.01	64.98	101.38	102.40	102.91	64.96	102.23	0.97	1185	677	1187	3.70	170
	iii	69.01	69.99	68.44	102.07	102.01	101.97	69.15	102.02	0.87	1187	676	1189	2.34	202
	iv	66.02	66.11	66.25	101.40	101.29	101.14	66.13	101.28	0.94	1183	669	1185	3.95	173
	v	65.89	66.60	67.42	101.90	101.95	101.91	66.64	101.92	0.93	1185	670	1187	2.30	196
15%	i	67.83	67.19	66.78	101.84	101.88	102.00	67.27	101.91	0.92	1180	675	1182	1.00	190
	ii	70.16	69.81	70.14	102.13	102.03	102.07	70.04	102.08	0.86	1183	677	1185	1.46	197
	iii	66.06	65.97	65.78	101.05	101.82	101.43	65.94	101.43	0.95	1185	674	1187	2.39	160
	iv	67.55	67.66	67.43	101.47	101.96	100.33	67.55	101.25	0.91	1181	679	1183	1.90	158
	v	65.50	65.88	67.61	102.40	101.94	101.94	66.33	102.09	0.94	1183	668	1185	1.70	195

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 27 Marshall Test 0% (campuran)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN			
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	$((100/(A/T)+(100-A)/V))$	$N \times G / T$	$(100-A) \times G/U$	$H-G \times 100/H$	$100 - K$	$A-(100-A \times Q/100)$	$((M-L)/M) \times 100$	$(V-U/V.U) \times T$				R/S	$C/(E-D)$
6.4	0.92	1187	663	1189	526	2.26		13.89	81.75	6.12	18.25		66.49		243	3416.38	3.12	1095.0	2.26
	0.88	1182	673	1184	511	2.31		14.24	83.80	3.77	16.20		76.76		210	2794.21	2.36	1184.0	2.31
	0.76	1185	658	1187	529	2.24		13.79	81.15	6.80	18.85		63.90		165	1916.49	3.50	547.6	2.24
	0.90	1187	633	1189	556	2.13		13.14	77.34	11.18	22.66		50.66		148	2014.61	1.28	1573.9	2.13
	0.93	1180	663	1182	519	2.27		14.00	82.37	5.41	17.63		69.32		163	2297.19	1.75	1312.7	2.27
			rata-rata		528.2	2.24	2.40	13.81	81.28	6.66	18.72	6.39	65.42	0.01	186	2487.8	2.40	1142.6	2.24
KETERANGAN						HASIL TES					AGREGAT		(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT			
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			6	%	A :	HOT BIN I		2.22	2.38	14		%	
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.24	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62	2.78	30		%	
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			6.66	%	C :	HOT BIN III		2.68	2.76	52		%	
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2487.78	kg	D :	filler		2.59	2.59	4		%	
BJ. SEMU				2.70		KELELEHAN			2.40	mm									

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 28 Marshall Test 5% (Campuran)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN			
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	((100/(A/T)+(100-A)/V))	N x G / T	(100-A) x G/U	H-G x 100/H	100 - K	A-(100-A*Q/100)	((M-L)/M)*100	(V-U/V.U)*T				R/S	C/(E-D)
6.4	0.93	1185	673	1187	514	2.31		14.19	83.52	4.09	16.48		75.21		165	2328.52	2.86	814.2	2.31
	0.25	1187	675	1189	514	2.31		14.22	83.66	3.92	16.34		75.99		160	609.93	3.35	182.1	2.31
	0.95	1189	674	1191	517	2.30		14.16	83.32	4.32	16.68		74.11		145	2083.64	2.45	850.5	2.30
	0.86	1185	672	1187	515	2.30		14.16	83.36	4.27	16.64		74.33		175	2282.45	3.11	733.9	2.30
	0.92	1187	668	1189	521	2.28		14.02	82.54	5.21	17.46		70.14		230	3200.01	4.40	727.3	2.28
			rata-rata		516.2	2.30	2.40	14.15	83.28	4.36	16.72	6.39	73.96	0.01	175	2100.9	3.23	661.6	2.30
KETERANGAN						HASIL TES					AGREGAT			(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT		
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			6.4	%	A :	HOT BIN I		2.22	2.38	14	%		
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.30	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62	2.78	30	%		
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			4.36	%	C :	HOT BIN III		2.68	2.76	52	%		
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2100.91	kg	D :	filler		2.59	2.59	4	%		
BJ. SEMU				2.70		KELELEHAN			3.23	mm									

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 29 Marshall Test 10% (Campuran)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN			
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	((100/(A/T)+(100-A)/V))	N x G / T	(100-A) x G/U	H-G x 100/H	100 - K	A-(100-A*Q/100)	((M-L)/M)*100	(V-U/V.U)*T				R/S	C/(E-D)
6.4	0.96	1182	675	1185	510	2.32		14.27	83.96	3.58	16.04		77.69		190	2778.53	3.20	868.3	2.32
	0.97	1185	677	1187	510	2.32		14.30	84.17	3.33	15.83		78.94		170	2497.17	3.70	674.9	2.32
	0.87	1187	676	1189	513	2.31		14.24	83.82	3.74	16.18		76.91		202	2686.02	2.34	1147.9	2.31
	0.94	1183	669	1185	516	2.29		14.11	83.06	4.62	16.94		72.75		173	2474.12	3.95	626.4	2.29
	0.93	1185	670	1187	517	2.29		14.11	83.03	4.64	16.97		72.64		196	2769.82	2.30	1204.3	2.29
			rata-rata		513.2	2.31	2.40	14.21	83.61	3.98	16.39	6.39	75.78	0.01	186	2641.1	3.10	904.3	2.31
KETERANGAN						HASIL TES					AGREGAT			(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT		
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			6	%	A :	HOT BIN I		2.22		2.38	14		%
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.31	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62		2.78	30		%
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			3.98	%	C :	HOT BIN III		2.68		2.76	52		%
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2641.13	kg	D :	filler		2.59		2.59	4		%
BJ. SEMU				2.70		KELELEHAN			3.10	mm									

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Tabel 4. 30 Marshall Test 15% (Campuran)

KADAR ASPAL	TINGGI BENDA UJI	BERAT (GRAM)			ISI BENDA UJI	BJ BULK CAMPURAN	BJ MAKSIMUM CAMPURAN	VOLUME TOTAL CAMPURAN			VMA%	KADAR ASPAL EFF TERHADAP CAMPURAN	RONGGA YANG TERISI ASPAL (VFA)	PENYERAPAN ASPAL (%BERAT DR JUMLAH CAMPURAN)	STABILITAS (KG)		KELELEHAN PLASTIS (MM)	HASIL BAGI MARSHAL (KG/MM)	DENSITY
		DI UDARA	DALAM AIR	KERING PERMUKAAN				KADAR ASPAL EFEKTIF	AGREGAT	RONGGA UDARA (VIM)					DI BACA	DI SESUAIKAN			
A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q		R	S	W	Y
% BERAT TOTAL CAMPURAN					E-D	C/F	((100/(A/T)+(100-A)/V))	N x G / T	(100-A) x G/U	H-G x 100/H	100 - K	A-(100-A*Q/100)	((M-L)/M)*100	(V-U/V.U)*T				R/S	C/(E-D)
6.4	0.92	1180	675	1182	507	2.33		14.33	84.32	3.17	15.68		79.78		190	2645.23	1.00	2645.2	2.33
	0.86	1183	677	1185	508	2.33		14.33	84.36	3.12	15.64		80.07		197	2565.33	1.46	1757.1	2.33
	0.95	1185	674	1187	513	2.31		14.22	83.68	3.90	16.32		76.11		160	2298.32	2.39	961.6	2.31
	0.91	1181	679	1183	504	2.34		14.42	84.89	2.51	15.11		83.37		158	2185.01	1.90	1150.0	2.34
	0.94	1183	668	1185	517	2.29		14.08	82.89	4.80	17.11		71.92		195	2775.57	1.70	1632.7	2.29
			rata-rata		509.8	2.32	2.40	14.28	84.03	3.50	15.97	6.39	78.25	0.01	180	2493.9	1.69	1629.3	2.32
KETERANGAN						HASIL TES					AGREGAT			(BJ BULK)		(BJ SEMU)	%BERAT TOTAL AGREGAT		
ANGKA PENETRASI ASPAL				60-70		ASPAL			6.4	%	A :	HOT BIN I		2.22	2.38	14		%	
BJ. ASPAL (T)				1.04		BULK CAMPURAN			2.32	gr/cc	B :	HOT BIN II		2.62	2.78	30		%	
BJ. BULK (U)				2.58		RONGGA UDARA			3.50	%	C :	HOT BIN III		2.68	2.76	52		%	
BJ. EFEKTIF (V)				2.64		STABILITAS			2493.89	kg	D :	filler		2.59	2.59	4		%	
BJ. SEMU				2.70		KELELEHAN			1.69	mm									

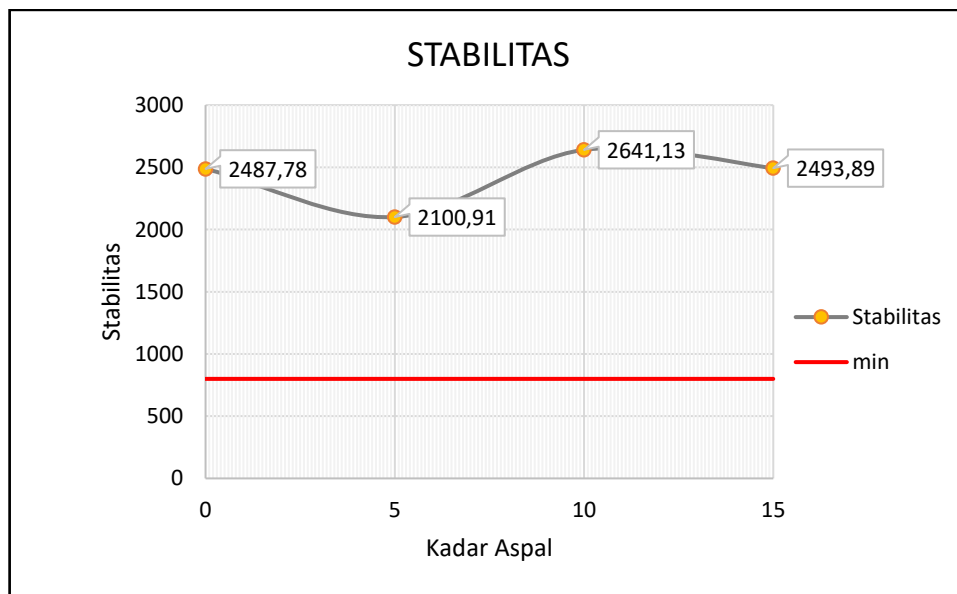
Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro.

4.9 Hasil Uji KAO Penambahan Limbah Limestone

Tahap selanjutnya kita analisa hasil dari Marshall Test dari kedua variasi gradasi gabungan yaitu nilai stabilitas, kelelahan (flow), VIM , VMA , VFA dan MQ (Marshall Quotient). Grafik terhadap pengujian marshall akan dijelaskan dibawah ini :

4.9.1 Stabilitas

Hasil dari pengujian stabilitas pada aspal campuran laston AC-WC baik tanpa atau dengan Limbah *Limestone* dapat ditarik kesimpulan bahwa semua mengalami peningkatan dari nilai minimum pada spesifikasi umum Bina Marga 2018 Revisi II Divisi 6. Peningkatan nilai stabilitas tertinggi terjadi pada penambahan limbah *Limestone* 5% mengalami penurunan dari nilai stabilitas tetapi masih masuk dalam batas minimum yaitu 800 kg. Nilai stabilitas terbaik terdapat pada variasi 10%. Penambahan limbah *Limestone* dapat memenuhi spesifikasi dari campuran laston AC-WC, dimana nilai minimum stabilitas berdasarkan spesifikasi umum Bina Marga 2018 adalah 800 kg. Hasil stabilitas bisa di lihat pada Gambar 4.9



Gambar 4. 9 Grafik Analisi Nilai Stabilitas

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

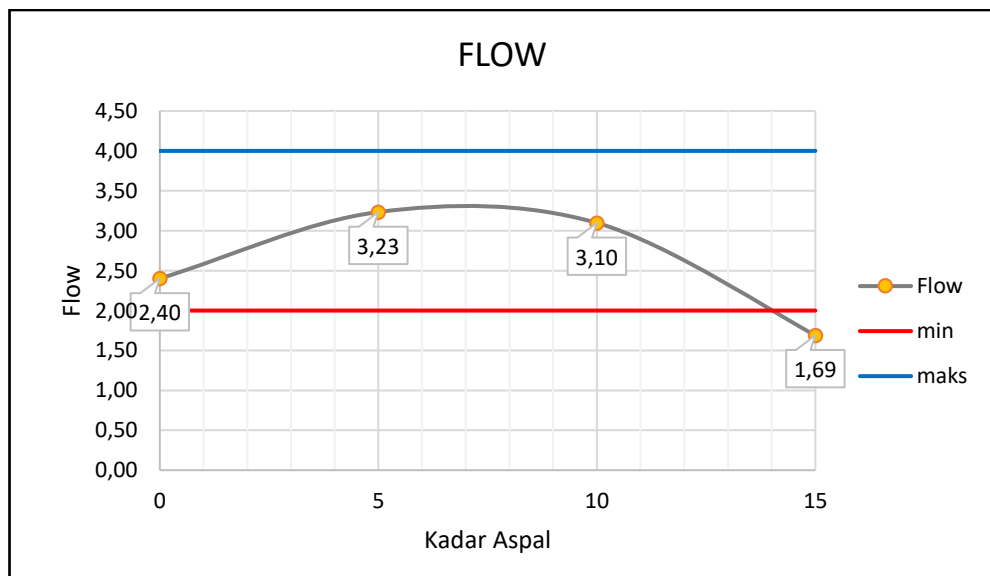
Dapat disimpulkan bahwa lapisan aspal beton AC-WC + limbah *Limestone* memiliki hasil stabilitas diatas rata-rata yang memenuhi

kemampuan perkerasan jalan menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang, alur, dan bleeding sebanding dengan kebutuhan jalan yang melayani volume lalu lintas tinggi dan dominan terdiri dari kendaraan berat yang membutuhkan nilai stabilitas tinggi.

4.9.2 Kelelehan (Flow)

Hasil dari pengujian kelelehan atau flow untuk lapisan aspal beton AC-WC + limbah Limestone, dengan kadar aspal 0%, 5%, 10%, dan 15% dari Penggunaan limbah limestone sebagai pengganti Sebagian filler. Sehingga dapat kita ketahui pengaruh dari penggunaan limbah *limestone*.

Penambahan variasi limbah *limestone* pada penelitian ini adalah 0 % ,5% , 10%, 15%. Pada kadar aspal variasi 5 % didapat nilai kelelehan flow sebesar 3,23 mm, mengalami penurunan dari nilai kontrol sebesar 1,69 mm yang tidak memenuhi nilai flow sebesar 2% sesuai spesifikasi umum Bina Marga 2018. Pada kadar aspal 10% di dapat nilai kelelehan flow sebesar 3.10 mm, mengalami penurunan dari nilai kadar aspal 5%. Pada penambahan variasi limbah *limestone* memenuhi persyaratan standar spesifikasi umum Bina Marga 2018 yaitu kelelehan atau flow minimal 2 mm dan maksimal 4 mm. Berikut hasil dari nilai kelelehan/flow bisa dilihat pada Gambar 4.10



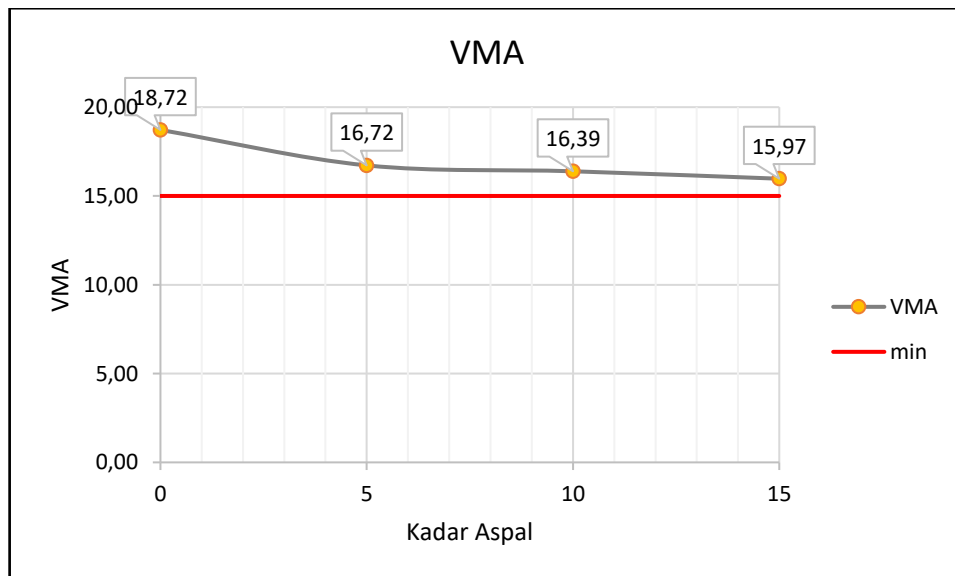
Gambar 4. 10 Grafik Analisi Nilai Stabilitas

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dapat disimpulkan bahwa lapisan aspal beton AC-WC + limbah *limestone* 5%, 10%, 15%. memiliki nilai kelelahan atau flow diatas nilai minimum yaitu 2,00 mm yang menunjukkan campuran bersifat plastis tetapi juga tetap elastis agar memenuhi kemampuan perkerasan jalan untuk menerima beban lalu lintas secara merata. Lapisan aspal beton AC-WC + Limbah *limestone* memiliki sifat elastisitas yang cukup tetapi juga ada yang belum memenuhi nilai kelelahan atau flow yang ada didalam persyaratan standar spesifikasi Bina Marga 2018.

4.9.3 VMA (Voids in the Mineral Agregate)

Hasil dari perhitungan VMA untuk campuran AC-WC + limbah *limestone* dengan kadar aspal variasi 0%, 5%, 10%, dan 15%. Pada perhitungan VMA dengan kadar aspal optimum 6.4% di dapat nilai tertinggi sebesar 18,72%, nilai tersebut paling tinggi dari batas nilai VMA. Pada kadar aspal variasi 0% 5%, 10% dan 15%. nilai VMA semakin turun namun tetap masuk dalam spesifikasi. Berdasarkan spesifikasi umum Bina Marga 2018 sebesar 15%. Hasil VMA dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11 Grafik Analisi Nilai VMA

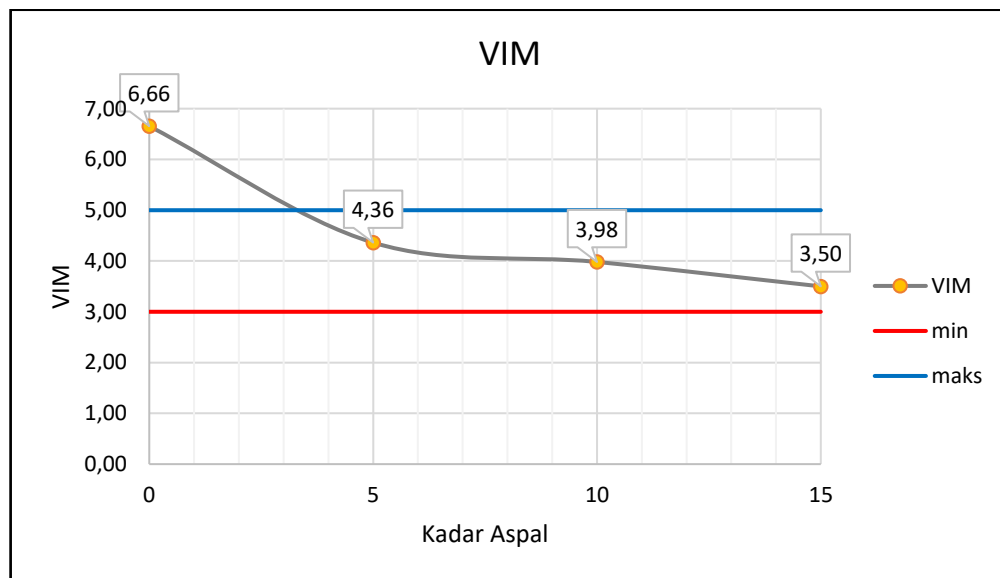
Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dapat disimpulkan bahwa lapisan aspal beton AC-WC + limbah *limestone* 5%, 10%, 15%. yang menunjukkan campuran mempunyai pori udara di antara butir agregat yang semakin sedikit dikarenakan ukuran gradasi yang

semakin rapat untuk campuran AC-WC+ Limbah *limestone*. memenuhi nilai VMA minimal 15% yang ada didalam persyaratan standar spesifikasi Bina Marga 2018.

4.9.4 VIM (Void In Mix)

Hasil dari pengujian VIM lapisan aspal beton AC-WC dengan penambahan limbah *limestone* dengan kadar variasi 0%, 5%, 10%, 15%. Yaitu dengan nilai 4,36%, 3,98%, 3,50% yang memenuhi spesifikasi umum Bina Marga 2018. Dimana nilai minimum untuk VIM adalah 3,0% dan maksimum 5,0% berdasarkan spesifikasi. Nilai VIM dapat dilihat Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 Grafik Analisi Nilai VIM

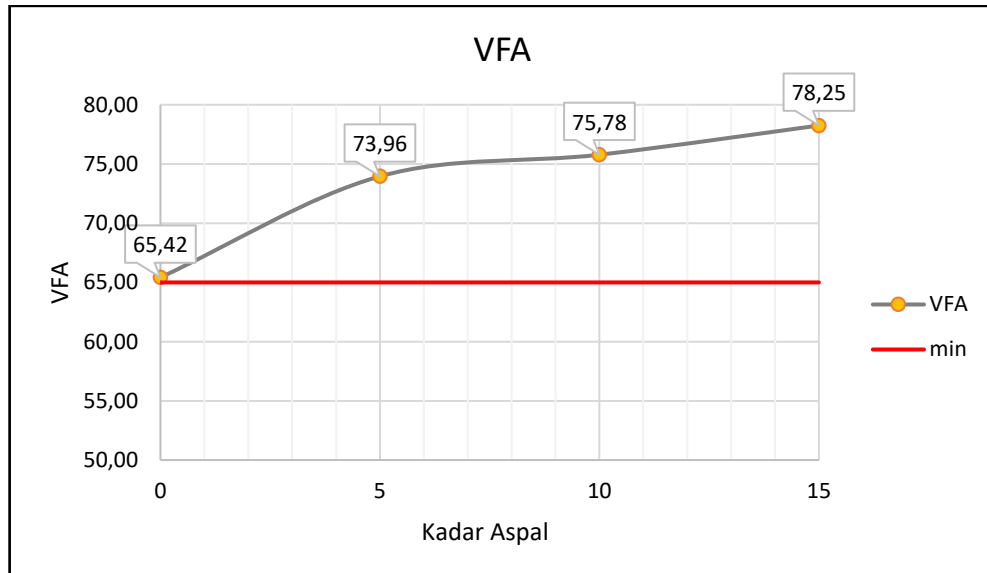
Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dapat disimpulkan bahwa lapisan aspal beton AC-WC dengan penambahan limbah *limestone* 5%, 10%, 15%. pada kadar aspal optimum 6,4% menunjukan campuran sesuai dengan persyaratan spesifikasi umum Bina Marga tahun 2018 Revisi II.

4.9.5 VFA (Void Filled with Asphalt)

Hasil dari pengujian VFA lapisan aspal beton AC-WC dengan penambahan limbah *limestone* 5%, 10%, 15%. dengan kadar aspal optimum 6.4%. Pada kadar aspal 5%, 10% dan 15% nilai VFA penambahan limbah *limestone* memenuhi persyaratan. Semakin tinggi kadar limbah *limestone* yang

dimasukkan, nilai VFA juga semakin tinggi dan memenuhi dengan persyaratan standar spesifikasi Bina Marga 2018 yaitu VFA minimal 65%. Nilai VFA dapat dilihat pada Gambar 4.13



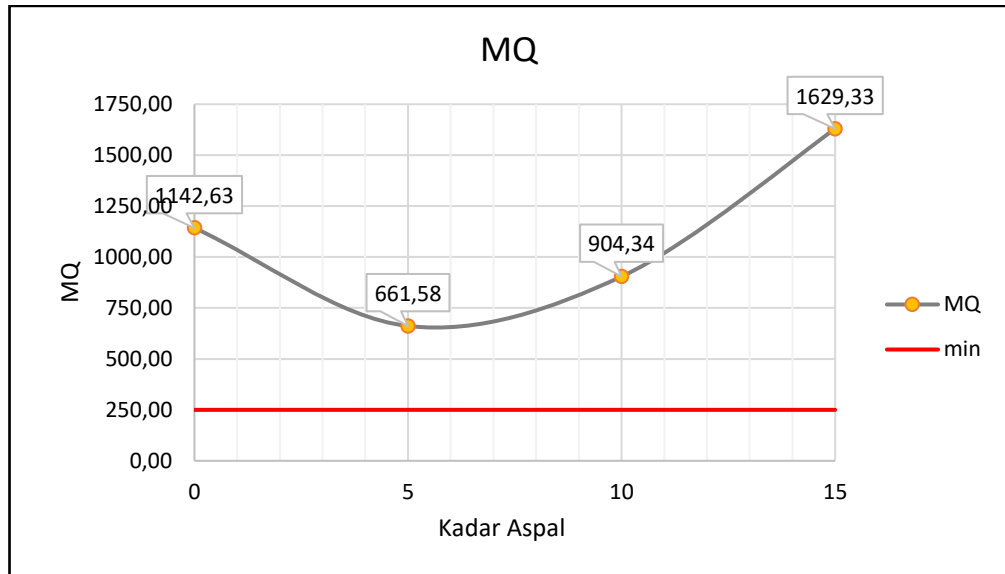
Gambar 4. 13 Grafik Analisi Nilai VFA

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dapat disimpulkan bahwa lapisan aspal beton AC-WC + limbah *limestone* 5%, 10%, 15% yang semakin tinggi menunjukkan campuran aspal mempunyai rongga-rongga dalam yang terisi aspal dengan optimum. Kriteria VFA ini membantu agar campuran tidak mudah rutting terhadap beban lalu lintas berat.

4.9.6 MQ (Marshall Quotient)

Hasil dari pengujian MQ (Marshall Quotient) lapisan aspal beton AC-WC + Limbah *limestone* kadar aspal optimum 6.4%. Pada semua nilai MQ penambahan limbah *limestone* 5%, 10%, 15% memenuhi nilai persyaratan. Standar spesifikasi Bina Marga 2018 yaitu nilai MQ (Marshall Quotient) minimal 250 Kg/mm. Hasil nilai MQ dapat dilihat pada Gambar 4.14.



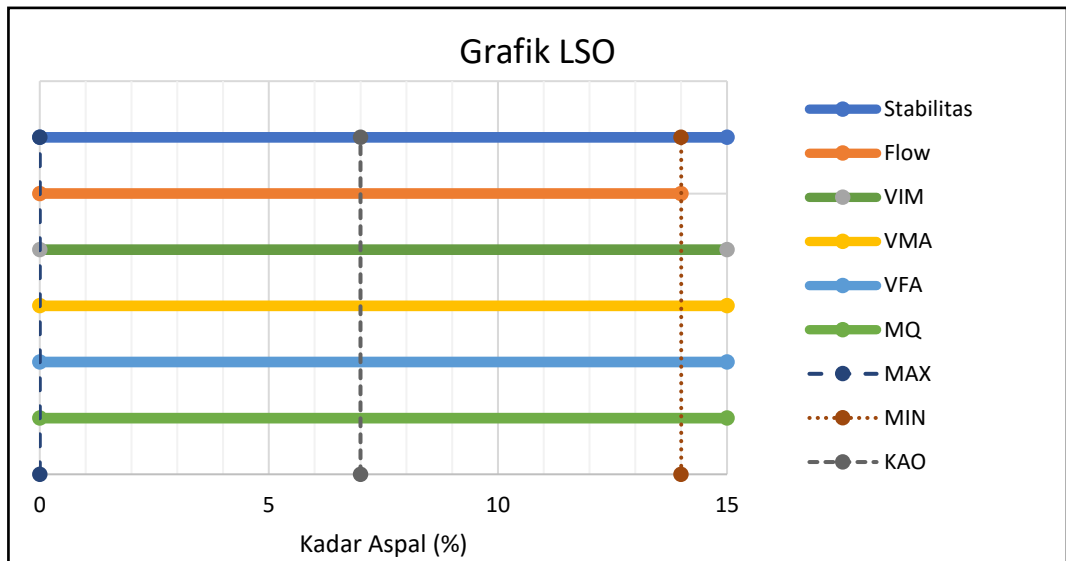
Gambar 4. 14 Grafik Analisi Nilai MQ

Sumber : Pengujian peneliti di Lab. Fakultas Sain dan Teknik Universitas Bojonegoro.

Dapat disimpulkan bahwa lapisan aspal beton AC-WC + limbah *limestone* 5%, 10%, 15% memiliki nilai MQ (Marshall Quotient) yang paling tinggi yaitu 1629,33 Kg/mm pada kadar variasi 15% yang menunjukkan campuran mempunyai sifat kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kadar aspal yang lain tetapi juga tetap memiliki sifat lentur dan stabil karena masih dalam ketentuan standart spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi II.

4.10 Menentukan KPO Penambahan Limbah Limestone

Penentuan kadar penambahan optimum (KPO) ditentukan dari hubungan beberapa parameter pengujian Job Mix Formula (JMF) aspal AC-WC dengan standar yang disyaratkan dengan nilai stabilitas yang tertinggi, seperti pada Gambar 4.15 dibawah ini :



Gambar 4. 15 Grafik LSO

Sumber : Pengujian Penelitian di Lab Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro

Hasil pangujian marshall dengan meggunakan kadar penambahan limbah *limestone* 5%, 10%, 15% dengan kadar aspal 6.4% diperoleh kadar Penambahan Optimum (KPO) yang ditentukan dari menggabungkan nilai VIM, VMA, VFA, Stabilitas, Flow dan Marshall Quotient (MQ) yang mendapatkan suatu selang kadar aspal yang memenuhi syarat, diambil nilai yang masuk dalam spesifikasi Bina Marga 2018 selang nilai tersebut, disimpulkan bahwa KPO yang memenuhi karakteristik Marshall variasi sebesar 7%.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis hasil pembahasan tabel uji marshall limbah *limestone* 5%, 10% dan 15% tentang pengaruh penambahan limbah *limestone* pada campuran AC-WC dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian *Filler* pada campuran laston AC-WC mempengaruhi nilai karakteristik marshall. Penambahan limbah *limestone* mempengaruhi nilai Stabilitas, VMA, dan Flow (kelelehan). Dimana Pada variasi penambahan limbah *limestone* 10% dengan nilai stabilitas paling tertinggi adalah 2641,13 kg. Pada benda uji dengan penambahan limbah *limestone*, menghasilkan penurunan nilai VMA benda uji normal yang dimana nilai VMA pada seluruh benda uji normal yang mana nilai VMA varisai limbah *limestone* 5%, 10%, 15%, mendapatkan nilai rentang antara 18,72% – 15,97% sedangkan VMA benda uji normal menghasilkan nilai rentang 15,91% – 17,18%. Maka diketahui hasil dari benda uji dengan penambahan limbah *limestone* menghasilkan nilai VMA yang telah memenuhi persyaratan spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi II yaitu lebih dari 15%
2. Berdasarkan data table 4.23 - 4.37 marshall test maka dapat disimpulkan bahwa pada variasi penambahan limbah *limestone* 5% mendapatkan nilai yang paling mendekati terhadap persyaratan spesifikasi umum Bina Marga tahun 2018 Revisi II.
3. Nilai kadar Penambahan optimum variasi penambahan limbah *limestone* sebagai pengganti sebagian *filler* campuran laston AC-WC. Pada penambahan limbah *limestone* 5%, 10%, 15% dengan penambahan di dapatkan nilai KPO dengan nilai 7%.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut maka penulis memberikan saran yang bermanfaat untuk penelitian pada masa yang akan datang, yaitu :

1. Untuk penelitian selanjutnya tidak hanya dilakukan dari segi karakteristik Marshall aspal beton saja, harus dipertimbangkan lagi dalam segi biaya untuk mengurangi penggunaan agregat alam dengan menggunakan limbah *limestone* sebagai inovasi terbaru untuk mengurangi limbah *limestone* yang ada di sekitar kita.
2. Perlu dilakukan penelitian mengenai perbandingan kualitas batu pecah antara perusahaan batching plan yang satu dengan batching plan yang lain guna mengetahui perbandingan kualitas produk yang biasa digunakan proyek daerah satu tempat ke tempat daerah yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Bina Marga. (2010). Spesifikasi umum 2010. *Direktorat Jendral Bina Marga, 2010*(Revisi 3), 1–6.
- DWI BUDI WINARNO. (2020). *SUBSTITUSIAGREGAT PADA LAPISIAN ASPHALT CONJJRETE-WEARINQCOURSE(AC-WC)*. April.
- Indonesia, R. (2020). *IN*.
- Mahli, M. (2017). *Pengaruh Penggunaan Limestone Sebagai Filler Pada Asphalt Concrete – Wearing Course (Ac-Wc)*. 1–11.
- Memenuhi, U., & Persyaratan, S. (2023). “*the Effect of Using Fly Ash and Mastic Asbuton As Filler on Marshall Characteristic of Slurry Seal.*”
- Setiawan, A., Zabadi, F., & Maulana, R. A. (2023). Industrial Waste As Filler And Pamekasan Aggregate In The Mixture Asphalt Concrete - Wearing Course In Terms Of Marshall Characteristics. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 4(2), 237–246. <https://doi.org/10.37253/jcep.v4i2.8664>
- Bina Marga. (2010). Spesifikasi umum 2010. *Direktorat Jendral Bina Marga, 2010*(Revisi 3), 1–6.
- DWI BUDI WINARNO. (2020). *SUBSTITUSIAGREGAT PADA LAPISIAN ASPHALT CONJJRETE-WEARINQCOURSE(AC-WC)*. April.
- Indonesia, R. (2020). *IN*.
- Mahli, M. (2017). *Pengaruh Penggunaan Limestone Sebagai Filler Pada Asphalt Concrete – Wearing Course (Ac-Wc)*. 1–11.
- Memenuhi, U., & Persyaratan, S. (2023). “*the Effect of Using Fly Ash and Mastic Asbuton As Filler on Marshall Characteristic of Slurry Seal.*”
- Setiawan, A., Zabadi, F., & Maulana, R. A. (2023). Industrial Waste As Filler And Pamekasan Aggregate In The Mixture Asphalt Concrete - Wearing Course In Terms Of Marshall Characteristics. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 4(2), 237–246. <https://doi.org/10.37253/jcep.v4i2.8664>
- (Bina Marga, 2010)Bina Marga. (2010). Spesifikasi umum 2010. *Direktorat Jendral Bina Marga, 2010*(Revisi 3), 1–6.
- DWI BUDI WINARNO. (2020). *SUBSTITUSIAGREGAT PADA LAPISIAN ASPHALT CONJJRETE-WEARINQCOURSE(AC-WC)*. April.
- Indonesia, R. (2020). *IN*.
- Mahli, M. (2017). *Pengaruh Penggunaan Limestone Sebagai Filler Pada Asphalt*

Concrete – Wearing Course (Ac-Wc). 1–11.

Memenuhi, U., & Persyaratan, S. (2023). “*the Effect of Using Fly Ash and Mastic Asbuton As Filler on Marshall Characteristic of Slurry Seal.*”

Setiawan, A., Zabadi, F., & Maulana, R. A. (2023). Industrial Waste As Filler And Pamekasan Aggregate In The Mixture Asphalt Concrete - Wearing Course In Terms Of Marshall Characteristics. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 4(2), 237–246. <https://doi.org/10.37253/jcep.v4i2.8664>