

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGGUNAAN
RECYCLED CONCRETE AGGREGATE SEBAGAI MATERIAL
SUBSTITUSI PADA CAMPURAN BERASPAL**



TUGAS AKHIR

Oleh :

Gita Tresna Wiguna

1810107010

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS PRADITA
TANGERANG
2023**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGGUNAAN
RECYCLED CONCRETE AGGREGATE SEBAGAI MATERIAL
SUBSTITUSI PADA CAMPURAN BERASPAL**



TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik (S.T) Jenjang Pendidikan Strata-1

Oleh:

Gita Tresna Wiguna

1810107010

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS PRADITA
TANGERANG
2023**

PERSETUJUAN SIDANG TUGAS AKHIR

Nama : Gita Tresna Wiguna
NIM : 1810107010
Program Studi : Teknik Sipil
Bentuk Tugas Akhir : Skripsi
Peminatan Tugas Akhir : Trasportasi
Judul Tugas Akhir : Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan
Recycled Concrete Aggregate Sebagai Material
Substitusi Pada Campuran Beraspal

Diterima dan Disetujui untuk Diujikan

Tangerang, 16 Agustus 2023

Menyetujui,

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Amelia Makmur, S.T., M.T.



Bella Koes Paulina Cantik. S.T., M. Eng.

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nama : Gita Tresna Wiguna
NIM : 1810107010
Program Studi : Teknik Sipil
Bentuk Tugas Akhir : Skripsi
Peminatan Tugas Akhir : Trasportasi
Judul Tugas Akhir : Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan
Recycled Concrete Aggregate Sebagai Material
Substitusi Pada Campuran Beraspal

Telah diujikan dan pada hari Jum'at, tanggal 25, bulan Agustus, tahun 2023

Dengan dinyatakan lulus

TIM PENGUJI

Penguji I



Ir. Jasson Lim, M.Eng., M.Sc.

Penguji II



Ir. Mulyadi Sugih Dharsono, M.M.,
M.Kom., M.Th., D.M.S

Diketahui oleh:

Dosen Koordinator Tugas Akhir



Dr. Van Basten, S.T., M.T.

Disahkan oleh:

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Ir. Mulyadi Sugih Dharsono, M.M.,
M.Kom., M.Th., D.M.S

PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT

Dengan ini saya menyatakan bahwa tugas akhir yang telah saya susun ini adalah benar karya ilmiah saya sendiri dan tidak mengandung unsur plagiat dari karya ilmiah orang lain (sebagian/seluruhnya). Semua karya ilmiah orang lain atau Lembaga lain yang dikutip dalam skripsi ini telah disebutkan sumber kutipannya dan dicantumkan di dalam Daftar Pustaka.

Jika di kemudian hari terbukti ditemukan kecurangan atau penyimpangan baik dalam pelaksanaan maupun penyusunan skripsi, maka saya bersedia untuk mendapatkan sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku dan dinyatakan **TIDAK LULUS**.

Tangerang, 16 Agustus 2023



Gita Tresna Wiguna

1810107010

**HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Dengan ini saya sebagai civitas akademik Universitas Pradita yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : Gita Tresna Wiguna

NIM : 1810107010

Program Studi : Teknik Sipil

Bentuk Tugas Akhir : Skripsi

Untuk meningkatkan pengembangan ilmu pengetahuan, memberikan skripsi/tugas akhir kepada Universitas Pradita Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) dengan judul :

**Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan *Recycled Concrete Aggregate*
Sebagai Material Substitusi Pada Campuran Beraspal**

Beserta dokumen tugas akhir yang ada sesuai ketentuan yang berlaku. Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) ini, maka Universitas Pradita berhak menyimpan dan mengelola dalam bentuk database, dan mempublikasikan tugas akhir ini sebagai penulis/pencipta dan pemilik Hak Cipta. Demikianlah pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Tangerang, 16 Agustus 2023



Gita Tresna Wiguna

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat-Nya yang telah membimbing dan memberikan kesempatan kepada saya untuk menyelesaikan tugas akhir ini. Melalui tugas akhir ini, saya berharap dapat memenuhi salah satu persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil dari Universitas Pradita. Topik penelitian ini adalah "Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan *Recycled Concrete Aggregate* Sebagai Material Substitusi Pada Campuran Beraspal".

Saya mengakui bahwa menyelesaikan tugas akhir ini dalam waktu yang tepat tidak akan berhasil tanpa bantuan, dukungan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada semua yang telah berpartisipasi dalam proses ini, terutama:

1. Yudi Sudrajat dan Yeni Sriharyani selaku orang tua saya yang selalu memberikan dukungan dan doa dalam penulisan laporan tugas akhir.
2. Bapak Ir. Mulyadi Sugih Dharsono, M.M., M.Kom., M.Th., D.M.S selaku bapak ketua Prodi Teknik Sipil Universitas Pradita.
3. Ibu Dr.Ir. Amelia Makmur, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing I.
4. Ibu Bella Koes Paulina C, S.T., M. Eng. selaku Dosen Pembimbing II.
5. Ibu Afni Kurnia Tambing, S.T. selaku asisten dosen teknik jalan raya.
6. Semua pengajar Prodi Teknik Sipil Universitas Pradita.
7. PT. Subur Brother yang sudah memberikan dukungan dalam penyediaan kebutuhan material.
8. Pradita *Research and Innovation Center* yang sudah memberikan fasilitas laboratorium.
9. Pak Sudarno yang sudah memberikan dukungan saran dan masukan dalam penelitian ini.
10. Pak Taufik dan Pak Joko yang telah membatu dalam proses pemilihan bahan material.
11. Hesti Aryanti dan Rivaldi Muhariz selaku kakak yang selalu memberi semangat dan do'a dalam penulisan laporan tugas akhir ini

12. Haykel Marcelinus Arapeta, Julius Andrew, Kenneth Sebastian Telussa, Mutiara Permata Puspita Dewi, Wike Andaresta Elsa Putri, Basili Nabil Syamsyudin, dan Kelvin sebagai tim lapangan yang telah banyak membantu dalam proses penelitian.
13. Annisa Fajriah Hasanah atas kesediaan waktu, motivasi, semangat dan bantuan yang tiada henti.
14. Willy Ardiansyah, S.M. sebagai partner saya, terimakasih telah menjadi bagian dalam hidup saya dalam memberikan semangat, motivasi dan dukungan untuk terus maju tanpa menyerah dalam mencapai impian saya.
15. Teman-teman perkuliahan angkatan 2018 yang selalu memberikan dukungan serta bantuan.

Akhir kata saya menyadari bahwa meskipun telah menyelesaikan tugas akhir ini, masih ada beberapa kekurangan yang perlu diperbaiki. Oleh karena itu, saya mengharapkan masukan dan saran dari pembaca yang akan sangat membantu. Saya berharap bahwa hasil karya ini dapat bermanfaat bagi semua orang yang membaca.

Tangerang, 16 Agustus 2023



Gita Tresna Wiguna
1810107010

ABSTRAK

Gita Tresna Wiguna (1810107010)

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGGUNAAN *RECYCLED CONCRETE AGGREGATE* SEBAGAI MATERIAL SUBSTITUSI PADA CAMPURAN BERASPAL

(LXXXII+ 82 halaman; 27 gambar; 24 tabel; 4 lampiran; 19 persamaan)

Peningkatan jumlah proyek konstruksi berdampak pada peningkatan permintaan beton sebagai material konstruksi. Hal ini mengakibatkan kenaikan jumlah limbah beton hasil *crushing test* yang dapat menimbulkan masalah lingkungan. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan limbah beton hasil *crushing test* sebagai bahan pengganti agregat pada campuran beraspal, yang dikenal sebagai *Recycled Concrete Aggregate* (RCA). Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan RCA pada campuran beraspal. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental dengan menggunakan pengujian Marshall. Variasi kadar RCA yang digunakan adalah 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap agregat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan RCA dalam campuran beraspal AC-BC dapat meningkatkan nilai VIM, VMA, dan *flow*, namun nilai VFA, stabilitas, dan MQ mengalami penurunan. Stabilitas campuran beraspal mencapai nilai optimum pada kadar 25% RCA, yaitu sebesar 1292,59 Kg. Selain itu, stabilitas mengalami penurunan paling signifikan sebesar 16,99% pada kadar RCA 50%.

Kata Kunci: *Recycled Concrete Agregat* (RCA), substitusi agregat, campuran beraspal

Referensi: 19 (2007-2022)

ABSTRACT

Gita Tresna Wiguna (1810107010)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE UTILIZATION AS SUBSTITUTION MATERIAL IN ASPHALT MIXTURES.

The increasing number of construction projects has increased the demand for concrete as a construction material. This increases the amount of concrete waste from crushing tests, which can cause environmental problems. One solution that can be done is to utilize concrete waste from crushing tests as an aggregate replacement material in asphalt mixtures known as Recycled Concrete Aggregate (RCA). Therefore, this study aimed to determine the effect of adding RCA to asphalt mixtures. The research method used is the experimental method using Marshall testing. The test results show that using RCA in AC-BC asphalt mixtures can increase the VIM, VMA, and flow values, but the VFA, stability, and MQ values decrease. The stability of the asphalt mixture reached the optimum value at 25% RCA content, which was 1292,59 Kg. In addition, stability experienced the most significant decrease of 16.99% at 50% RCA content.

Keywords: *Recycled Concrete Aggregat (RCA), aggregate substitution, paved mixes*

Reference : 19 (2007-2022)

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
PERSETUJUAN SIDANG TUGAS AKHIR	iii
PENGESAHAN TUGAS AKHIR	iv
PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT	v
PERSETUJUAN PUBLIKASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	vi
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPRAN	xv
DAFTAR NOTASI	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR PERSAMAAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Campuran beraspal	6
2.2 Aspal	9
2.3 Agregat.....	11
2.3.1 Agregat Kasar	13
2.3.2 Agregat Halus	15
2.4 Limbah Konstruksi	17

2.5	<i>Recycled Concrete Aggregate (RCA)</i>	18
2.6	Pengujian	19
2.6.1	Pengujian Material	20
2.6.2	Kadar Aspal Optimum (KAO)	29
2.6.3	Pengujian Marshall	30
2.7	Penelitian Terdahulu	36
2.8	Kebaruan Penelitian	39
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		40
3.1	Umum	40
3.2	Kerangka Penelitian	40
3.3	Persiapan Bahan	42
3.4	Pengujian Bahan	44
3.5	Perancangan Campuran Beraspal	48
3.6	Benda Uji	48
3.7	Pengujian Benda Uji	49
3.8	Penyajian Hasil dan Analisis	51
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		52
4.1	Hasil Pengujian Bahan	52
4.1.1	Analisis Pengujian Aspal	52
4.1.2	Analisis Pengujian Agregat	53
4.1.3	Analisis Saringan	55
4.2	Perancangan Capuran Beraspal	57
4.3	Hasil Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal	60
4.4	Hasil dan Analisis Pengujian Marshall Campuran Beraspal	61
4.5	Hasil dan Analisis Pengujian Marshall Campuran Beraspal dengan RCA	69
4.5.1	Perancangan Capuran Beraspal dengan RCA	70
4.5.2	Hasil Pengujian Berat Jenis Maksimum dengan RCA	71
4.5.3	Hasil Pengujian Marshall Campuran Beraspal dengan RCA	72

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	80
5.1 Kesimpulan	80
5.2 Saran	81
DAFTAR PUSTAKA	82
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konstruksi Lapisan <i>Asphalt Concrete</i>	7
Gambar 2.2	Mesin <i>Stone Crusher</i>	14
Gambar 2.3	Limbah Beton	17
Gambar 2.4	<i>Recycled Concrete Aggregate</i>	18
Gambar 2.5	Batasan Gradasi Agregat.....	21
Gambar 2.6	Ukuran Butiran Pada Bin	22
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	41
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)	42
Gambar 3.2	Pengambilan Bahan	43
Gambar 3.3	Penghancuran RCA.....	43
Gambar 3.4	Berat Jenis Agregat Kasar	45
Gambar 3.5	Proses Abrasi	45
Gambar 3.6	Proses Pengujian Marshall	50
Gambar 3.7	Proses Pengujian Berat Jenis Maksimum	50
Gambar 4.1	Grafik Gradasi Agregat untuk Benda Uji.....	56
Gambar 4.2	Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas.....	65
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan <i>flow</i>	65
Gambar 4.4	Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan MQ.....	66
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VIM	67
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VFA	67
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VMA	68
Gambar 4.8	Grafik Penentuan KAO	69
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Kadar Limbah Beton Terhadap Stabilitas	74
Gambar 4.10	Grafik Hubungan Kadar Limbah Beton Terhadap <i>Flow</i>	75
Gambar 4.11	Grafik Hubungan Kadar Limbah Beton Terhadap MQ	76
Gambar 4.12	Grafik Hubungan RCA Terhadap VIM	76
Gambar 4.13	Grafik Hubungan Kadar Limbah Beton Terhadap VFA.....	77
Gambar 4.14	Grafik Hubungan Kadar Limbah Beton Terhadap VMA	78
Gambar 4.15	Grafik Kadar RCA Optimum	78

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pengujian Material Agregat.....	L-1
Lampiran 2 Hasil Pengujian Material Aspal	L-2
Lampiran 3 Hasil Pengujian Marshall	L-3

DAFTAR NOTASI

- A = Berat sampel kering oven (gram)
- A = Massa sampel kering di udara
- C = Berat sampel jenuh dalam air (gram)
- D = Massa dari wadah dengan air pada 25°C
- E = Massa dari wadah dengan air + sampel pada suhu 25°C (vakum udara)
- F = Nilai *flow* (mm)
- G_{mb} = Berat jenis curah campuran
- G_{mm} = Berat jenis maksimum campuran
- G_{sb} = Berat jenis curah agregat
- KAO = Kadar Aspal Optimum
- MQ = *Marshall Quotient*
- RCA = *Recycled Concrete Aggregate*, aggregate beton daur ulang
- S = Berat sampel kering permukaan jenuh udara (gram)
- S = Nilai stabilitas (kg)
- VFA = *Voids Filled With Asphalt*, Volume rongga terisis aspal
- VIM = *Void In Total Mix*, Volum rongga dalam campuran
- VMA = *Void in Minerale Aggregate*, Volume rongga di antara mineral agregat
- W₁ = Berat benda uji awal gram)
- W₂ = Berat benda uji tertahan saringan No.12 (gram)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Pengujian Agregat Kasar.....	13
Tabel 2.2	Parameter Pengujian Agregat Halus.....	16
Tabel 2.3	Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Beraspal.....	20
Tabel 2.4	Ukuran Butiran Pada Bin.....	22
Tabel 2.5	Daftar Gradasi Berat Agregat Kasar.....	25
Tabel 2.6	Parameter Pangujian Aspal.....	28
Tabel 2.7	Angka Korelasi.....	31
Tabel 2.8	Ketentuan Sifat-Sifat Campuran Beraspal Laston.....	35
Tabel 3.1	Benda Uji AC-BC Penentuan KAO.....	48
Tabel 3.2	Benda Uji AC-BC dengan RCA.....	49
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Aspal.....	52
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan.....	53
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Keausan Agregat dan RCA.....	54
Tabel 4.4	Presentase Lolos Agregat Kasar dan Halus.....	55
Tabel 4.5	Perancangan Komposisi 2.....	57
Tabel 4.6	Perancangan Komposisi 1.....	58
Tabel 4.7	Berat Agregat Kumulatif.....	59
Tabel 4.8	Data Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal.....	60
Tabel 4.9	Hasil Pengujian Marshall Terhadap Kadar Aspal.....	62
Tabel 4.10	Rekapitulasi Data Uji Marshall untuk menentukan KAO.....	64
Tabel 4.11	Perancangan Dengan RCA.....	70
Tabel 4.12	Data Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal dengan RCA.....	71
Tabel 4.13	Hasil Pengujian Marshall dengan RCA.....	72
Tabel 4.14	Rekapitulasi Data Uji Marshall dengan RCA.....	74

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1.....	24
Persamaan 2.2.....	24
Persamaan 2.3.....	24
Persamaan 2.4.....	24
Persamaan 2.5.....	24
Persamaan 2.6.....	24
Persamaan 2.7.....	24
Persamaan 2.8.....	26
Persamaan 2.9.....	27
Persamaan 2.10.....	27
Persamaan 2.11.....	27
Persamaan 2.12.....	27
Persamaan 2.13.....	31
Persamaan 2.14.....	32
Persamaan 2.15.....	32
Persamaan 2.16.....	33
Persamaan 2.17.....	33
Persamaan 2.18.....	33
Persamaan 2.19.....	34

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan proyek infrastruktur di sejumlah negara, dalam beberapa tahun belakangan ini, telah mengalami peningkatan yang signifikan salah satunya adalah Indonesia. Menurut Manajemen Riset Nasional BCI Central (2023) konstruksi sipil yang mencakup infrastruktur, transportasi, dan utilitas meningkat sebesar 10,13% dengan nilai mencapai Rp.157,46 triliun. Peningkatan pembangunan infrastruktur tentunya berdampak pada peningkatan kebutuhan beton sebagai bahan konstruksi utama.

Permintaan beton yang meningkat juga akan berdampak pada peningkatan beton uji untuk keperluan konstruksi yang dikenal sebagai beton hasil *crushing test*. *Crushing test* beton merupakan proses untuk menilai kualitas dan kekuatan beton, namun setelah pengujian selesai seringkali menjadi bahan yang tidak terpakai dan hanya berakhir menjadi limbah.

Limbah beton hasil dari *crushing test* ini akan menjadi penyebab utama masalah lingkungan karena dapat menciptakan tempat pembuangan sampah yang besar. Jika limbah beton ini tidak dikelola dengan cara yang tepat, maka akan berdampak negatif bagi lingkungan. Dengan begitu, penting untuk melakukan upaya efektif dalam pengelolaan limbah beton hasil dari pengujian *crushing test*.

Peningkatan permintaan akan beton juga berdampak pada peningkatan penambangan batuan alam, yang dapat menyebabkan penurunan sumber daya alam yang tersedia dan berpotensi menyebabkan kelangkaan serta dampak negatif pada

lingkungan jika eksplorasi berlangsung terus-menerus. Oleh karena itu, penting untuk memprioritaskan keberlanjutan (*sustainability*) dalam penanganan limbah dan produksi material penyusun beton. Salah satu langkah untuk meningkatkan keberlanjutan adalah dengan mengurangi ketergantungan pada agregat dan memaksimalkan pemanfaatan limbah beton sebagai pengganti agregat atau *Recycled Concrete Aggregate* selanjutnya disebut dengan RCA.

RCA atau agregat beton daur ulang adalah material agregat yang diperoleh dari daur ulang beton bekas atau limbah beton. Proses RCA ini melibatkan penghancuran dan pemrosesan beton bekas menjadi agregat dengan ukuran yang sesuai untuk digunakan kembali dalam konstruksi. Hal ini menunjukkan betapa pentingnya melakukan daur ulang limbah beton guna menjaga keberlanjutan sumber daya alam dan mengganti sebagian agregat dengan bahan daur ulang.

RCA memiliki keunggulan dan kelemahan dalam penggunaannya. Keunggulan limbah beton terletak pada tingkat kuat tekan yang tinggi, karena bahan penyusunnya, seperti agregat, semen, dan air, membentuk material yang keras seperti batuan. Hal ini menjadi keuntungan saat digunakan sebagai RCA dalam campuran beraspal, namun penggunaan RCA juga memiliki kelemahan. Kehadiran semen dalam limbah beton dapat menyebabkan agregat ini lebih berpori serta memiliki kapasitas penyerapan yang besar dibandingkan dengan agregat. Hal tersebut dapat menyebabkan agregat RCA cenderung mengalami penurunan secara kualitas, sehingga faktor penurunan tersebut dapat mempengaruhi kinerja campuran beraspal. Maka komposisi dan stabilitas RCA dalam campuran beraspal perlu diperhatikan.

Berdasarkan uraian tersebut, maka perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan RCA dalam campuran beraspal terhadap nilai stabilitas pada campuran beraspal AC-BC. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini akan memberikan manfaat yang signifikan bagi industri konstruksi dalam mengurangi pengambilan agregat dari sumber daya alam yang semakin berkurang dan mengurangi dampak negatif pada lingkungan akibat limbah beton yang tidak dikelola dengan baik.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam menghadapi isu peningkatan limbah dari proses *crushing test* dan dampak negatif dari peningkatan permintaan beton serta aktivitas penambangan batu alam yang dapat menimbulkan masalah penurunan sumberdaya alam yang tersedia, salah satu solusi efektif yang dapat diambil adalah memanfaatkan RCA tersebut sebagai bahan substitusi dalam campuran beraspal. Dalam hal ini, untuk memastikan keberhasilan dari penggunaan RCA ini, perlu memperhatikan komposisi yang tepat agar dapat mengetahui pengaruh material substitusi tersebut terhadap nilai stabilitas pada campuran beraspal.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pemanfaatan RCA sebagai bahan substitusi sebagian atau seluruhnya dari agregat, serta untuk mengetahui tingkat keausan antara agregat dan RCA. Selain itu, penelitian ini akan menganalisis apakah penambahan RCA ini berpengaruh terhadap nilai stabilitas pada campuran beraspal.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan bagi pelaku industri konstruksi dengan memberikan solusi efektif dalam pemanfaatan RCA dalam campuran beraspal. Dengan demikian, di harapkan bahan RCA dapat digunakan sebagai bahan pengganti yang berdaya guna dan berkelanjutan, serta menciptakan campuran beraspal yang berkualitas dan ramah lingkungan.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini memiliki batasan sebagai berikut:

- a. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil, Universitas Pradita.
- b. *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC) merupakan jenis campuran yang akan digunakan dalam penelitian ini.
- c. Bahan pengikat dalam penelitian ini menggunakan aspal dengan penetrasi 60/70.
- d. Limbah beton hasil *Crushing test* yang digunakan dengan minimal mutu beton $f_c'25$ dari Laboratorium PT. Subur Brother.
- e. Kadar aspal yang direncanakan dalam penelitian ini adalah 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%.
- f. Komposisi variasi yang digunakan sebagai campuran agregat sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100%
- g. Pengujian ini untuk menentukan parameter Marshall khususnya nilai stabilitas pada campuran beraspal berdasarkan SNI 2489:2018.
- h. Standar hasil pengujian karakteristik campuran beraspal mengacu pada Peraturan Kementerian PUPR Direktorat Bina Marga tahun 2018.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara sistematis berisi pembahasan akan diuraikan pada penelitian ini terbagi per bab dengan masing-masing bab dapat dijelaskan di bawah ini:

- a. Bab 1 Pendahuluan, membahas secara detail mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, ruang lingkup, dan sistematika penulisan dalam penelitian ini.
- b. Bab 2 Tinjauan Pustaka, menjelaskan tentang dasar-dasar hipotesis mengenai aspal, agregat, limbah konstruksi, metode pengujian Marshall dengan parameternya, dan penelitian terdahulu.
- c. Bab 3 Metodologi Penelitian, berisi gambaran umum penelitian, tahapan penelitian, metode penelitian yang digunakan untuk pengumpulan data, analisis data hingga pada tahap kesimpulan.
- d. Bab 4 Analisa dan Hasil Penelitian, membahas hasil-hasil yang diperoleh dari pengujian bahan dan sampel, serta perhitungan data yang diperoleh dari pengujian tersebut.
- e. Bab 5 Kesimpulan dan Saran, mencakup kesimpulan hasil dari pembahasan bab-bab sebelumnya sesuai dengan hasil penelitian di laboratorium yang telah dilakukan. Dari kesimpulan tersebut, disajikan saran-saran yang dapat membantu dalam pengembangan penelitian lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

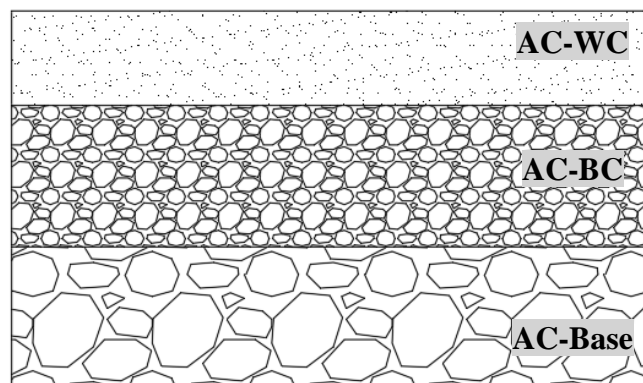
2.1 Campuran Beraspal

Menurut (Nawir, 2021) dalam buku "Bahan Material Perkerasan Jalan," disebutkan bahwa campuran beraspal merupakan kombinasi material konstruksi yang terdiri dari agregat mineral, bitumen atau aspal, serta bahan pengisi atau aditif lainnya. Campuran ini dibuat dengan menggabungkan berbagai komponen tersebut dalam proporsi yang tepat dan kemudian dipadatkan menjadi lapisan jalan atau perkerasan jalan. Campuran beraspal digunakan sebagai lapisan permukaan jalan yang memiliki peran penting dalam menjaga kualitas, kekuatan, dan stabilitas struktur jalan, serta memberikan kenyamanan bagi pengguna jalan.

Agregat mineral dalam campuran beraspal bisa berasal dari berbagai ukuran dan jenis, seperti agregat kasar dan halus, yang diambil dari sumber daya alam seperti batu pecah atau pasir. Bitumen atau aspal, yang merupakan komponen pengikat dalam campuran, memberikan daya rekat dan kelenturan pada campuran beraspal. Bahan pengisi atau aditif lainnya dapat ditambahkan untuk meningkatkan sifat-sifat tertentu dari campuran, seperti perubahan suhu.

Proses pembuatan campuran beraspal melibatkan pencampuran material-material tersebut dalam suatu pabrik pencampuran (*asphalt mixing plant*) dengan suhu tertentu hingga menghasilkan campuran yang homogen. Campuran tersebut kemudian diangkut dan ditempatkan pada permukaan jalan yang sudah dipersiapkan. Setelah penempatan, campuran beraspal akan dipadatkan menggunakan alat berat seperti *wale* atau *roller compactor* agar mencapai kepadatan yang optimal.

Penggunaan campuran beraspal memiliki tujuan utama untuk memberikan lapisan perkerasan jalan yang kuat, tahan lama, dan mampu menghadapi beban lalu lintas serta perubahan kondisi cuaca. Menurut (Sepo, et al., 2021), salah satu jenis lapisan permukaan sebagai bagian dari prasarana jalan adalah *Asphalt Concrete* (AC) atau aspal beton. Campuran beraspal beton sebagai lapisan terdiri atas AC-WC (*Asphalt Concrete-Wearing Course*), AC-BC (*Asphalt Concrete-Binder Course*), AC-Base (*Asphalt Concrete-Base*) seperti yang tersaji pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Konstuksi Lapisan *Asphalt Concrete*

Gambar 2.1 menunjukkan lapisan permukaan aspal beton untuk perkerasan jalan. Lapisan permukaan aspal yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *Asphalt Concrete - Binder Course* atau disebut dengan AC-BC. Campuran AC-BC memiliki peran sebagai lapisan tengah pada perkerasan jalan, yang ditempatkan di antara lapisan AC-WC pada permukaan atas yang merupakan lapisan permukaan jalan dengan ketebalan minimal 4 cm. Fungsinya adalah untuk menanggung beban lalu lintas serta mengatasi keausan akibat gesekan dari kendaraan dan lapisan AC-Base pada permukaan bawah yang berfungsi sebagai lapisan pondasi dengan ketebalan minimal 6 cm. Lapisan ini memiliki peran penting dalam menyediakan fondasi yang stabil dan kokoh untuk menopang beban lalu lintas, serta menjaga integritas struktural dari perkerasan jalan tersebut. Sedangkan lapisan tengah AC-

BC memiliki ketebalan minimum 5 cm. Lapisan ini berperan sebagai penghubung antara lapisan permukaan dan lapisan pondasi, memberikan dukungan yang kuat serta mengurangi risiko deformasi akibat beban lalu lintas

Dengan demikian, campuran AC-BC berperan penting dalam membentuk struktur dan kinerja keseluruhan dari perkerasan jalan, serta memberikan kontribusi dalam mendistribusikan beban lalu lintas dan meningkatkan kekuatan serta ketahanan perkerasan jalan itu sendiri. Sebagai lapisan tengah, AC-BC harus memiliki karakteristik yang optimal untuk menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan yang berbeda, sehingga dapat memberikan performa yang baik dan tahan lama dalam penggunaan jangka panjang.

Campuran AC-BC juga terdiri dari agregat, filler, aspal, dan aditif, namun gradasi agregat yang digunakan berbeda dengan AC-WC. Pada AC-BC, agregat kasar memiliki ukuran maksimum 25 mm, sedangkan agregat halus memiliki ukuran maksimum 12,5 mm. Filler yang umumnya digunakan pada AC-BC adalah debu batu atau semen portland. Aspal yang digunakan harus memenuhi syarat tertentu dan memiliki kadar yang cukup untuk mengikat agregat, sehingga menghasilkan campuran yang stabil dan tahan terhadap deformasi.

Tujuan penggunaan campuran AC-BC adalah untuk memberikan daya dukung yang baik pada lapisan tengah perkerasan jalan dan mengurangi deformasi akibat beban lalu lintas. Selain itu, AC-BC juga berfungsi sebagai lapisan intermediet yang memperkuat struktur perkerasan jalan secara keseluruhan. Penggunaan campuran AC-BC dapat meningkatkan kualitas permukaan jalan, mengurangi keausan, dan memberikan kenyamanan serta keselamatan bagi pengguna jalan.

Meskipun campuran AC-BC memiliki keunggulan dalam daya dukung dan ketahanan terhadap deformasi, penggunaannya juga memiliki beberapa kelemahan, seperti biaya yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan campuran AC lainnya. Namun, manfaatnya dalam meningkatkan kualitas dan keawetan perkerasan jalan membuat campuran AC-BC menjadi pilihan yang sering digunakan dalam konstruksi jalan raya.

2.2 Aspal

Aspal atau bitumen merupakan cairan hitam kental yang merupakan kombinasi dari campuran minyak dan bitumen dengan unsur senyawa hidrokarbon. Aspal memiliki karakteristik termoplastis yang memungkinkannya mencair ketika dipanaskan pada suhu tertentu dan membeku kembali ketika suhu menurun. Menurut (Sukirman, 2007), banyaknya komposisi aspal dalam campuran jalan yaitu 4-10% dari berat campuran 10-15% dari volume campuran. Di dalam industri konstruksi, aspal dikenal dalam beberapa jenis, di antaranya adalah aspal keras, yang berbentuk padat pada suhu ruangan dan dibagi menjadi beberapa jenis tergantung pada jenis minyak bumi yang digunakan dalam pembuatannya.

Beberapa jenis aspal yang sering digunakan di Indonesia adalah aspal dengan penetrasi 60/70, yang cocok digunakan pada perkerasan dengan jumlah lalu lintas sedang atau tinggi pada cuaca panas, serta aspal dengan penetrasi 80/100, yang lebih sesuai untuk perkerasan dengan jumlah lalu lintas sedang atau rendah pada cuaca dingin. Selain aspal keras, terdapat juga aspal cair yang merupakan campuran aspal dengan bahan pencair hasil dari penyulingan minyak bumi. Aspal cair ini tetap berwujud cair pada suhu ruangan dan digunakan dalam beberapa

aplikasi. Selanjutnya, terdapat juga aspal emulsi, yaitu campuran aspal dengan zat pengemulsi dalam bentuk cair. Aspal emulsi sering digunakan untuk keperluan pemeliharaan jalan, seperti memperbaiki jalan yang rusak pada permukaannya atau melakukan penambalan pada keretakan jalan.

Menurut Nur, et al. (2021), dalam perkerasan lentur, aspal memiliki fungsi sebagai bahan pengikat dan pengisi, oleh karena itu diperlukan kemampuan tahan terhadap perubahan cuaca untuk menghindari kerapuhan. Selain itu, aspal juga harus memiliki sifat fisik yang penting untuk diketahui meliputi viskositas, titik leleh, kekerasan, densitas, dan penyerapan. Viskositas adalah ukuran seberapa mudah aspal mengalir pada suhu tertentu, sementara titik leleh adalah suhu di mana aspal mulai meleleh. Kekerasan aspal diukur dengan menggunakan alat kekerasan seperti penetrometer aspal. Densitas aspal dapat mempengaruhi berat jenis campuran aspal, sedangkan penyerapan aspal dapat mempengaruhi interaksi antara aspal dan agregat.

Penggunaan aspal dalam industri konstruksi sangatlah penting karena berperan sebagai bahan dasar untuk pembuatan campuran beraspal yang digunakan pada perkerasan jalan dan berbagai proyek konstruksi lainnya. Dengan berbagai jenis aspal yang tersedia, pemilihan jenis aspal yang tepat sangat diperlukan untuk memastikan perkerasan jalan memiliki daya tahan dan performa yang optimal sesuai dengan kondisi lingkungan dan lalu lintas yang dihadapi. Dengan memperhatikan sifat-sifat ini, maka dapat dipilih jenis aspal yang tepat untuk digunakan dalam aplikasi tertentu, sehingga dapat memastikan keamanan dan kenyamanan bagi pengguna jalan raya. Kualitas aspal sangat penting untuk memastikan kinerja jalan yang baik dan tahan lama (Wilujeng & Risdianto, 2019)

2.3 Agregat

Agregat merupakan kombinasi berbagai material seperti pasir, kerikil, batu pecah, dan bahan tambahan lainnya yang berperan sebagai bahan konstruksi dalam pembuatan beton, aspal, dan campuran lainnya. Pembentukan agregat terjadi secara alami melalui proses pemecahan batuan besar menjadi ukuran yang lebih kecil melalui erosi, pengikisan, dan patahan. Metode pengambilan agregat mencakup penambangan terbuka, penggalian dari sungai, dan pengambilan dari tambang.

Penambangan agregat yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan lingkungan dan mempengaruhi kualitas agregat yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengambilan agregat yang berkelanjutan dan terkendali sangat penting untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan memastikan kualitas agregat yang memenuhi standar (Mahbubi & Ahyudanari, 2019).

Dalam produksi campuran aspal, agregat merupakan komponen utama yang membentuk sekitar 90-95% dari total berat campuran aspal atau 75-85% dari total volume campuran (Saleh et al., 2022). Oleh karena itu, pemilihan sumber agregat yang tepat sangat penting dalam menciptakan campuran aspal yang memenuhi standar kualitas. Pemilihan sumber agregat menjadi hal yang krusial guna memastikan campuran beraspal memenuhi standar kualitas. Faktor-faktor fisik, seperti ukuran dan bentuk agregat, harus dipertimbangkan dengan cermat (Suwastika, et al., 2019).

Menurut Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi Kementrian PUPR, (2018) menyatakan bahwa penyerapan agregat sebaiknya dijaga agar tidak melebihi batas tersentu. Jika penyerapan terlalu banyak, dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu lunak dan tidak stabil. Selain itu, penyerapan air juga perlu

diperhatikan, karena jika campuran beraspal memiliki penyerapan air yang tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada lapisan aspal saat terkena beban kendaraan dan kondisi lingkungan tertentu. Peraturan yang tepat terhadap kedua aspek ini akan berkontribusi pada kualitas dan ketahanan campuran beraspal.

Agregat juga memiliki beberapa sifat yang perlu diperhatikan dalam konstruksi. Sifat pertama adalah gradasi atau ukuran butiran, yang akan mempengaruhi kinerja agregat dalam campuran (Maulana, et al., 2022). Sifat kedua adalah kepadatan atau berat jenis, yang akan mempengaruhi volume agregat yang dibutuhkan untuk mencapai berat tertentu. Sifat ketiga adalah bentuk butir, yang mempengaruhi kemampuan agregat untuk saling mengunci dan memperkuat campuran. Sifat keempat adalah kekuatan atau daya tahan, yang menentukan kemampuan agregat untuk menahan beban dan deformasi. Sifat kelima adalah kelembaban, yang akan mempengaruhi kinerja campuran dan ketahanan terhadap kerusakan akibat air. Semua sifat ini harus diperhatikan dalam memilih dan menggunakan agregat dalam konstruksi, untuk memastikan campuran yang kuat dan tahan lama.

Selain itu, agregat juga harus bebas dari komponen yang tidak diinginkan, termasuk bahan organik seperti tanaman, partikulat lunak seperti tanah, dan lumpur. Agregat yang terkontaminasi dapat mengurangi daya ikat antara aspal dan agregat, yang berpotensi berdampak negatif pada kekuatan perkerasan aspal. Dengan memperhatikan kualitas dan karakteristik agregat, diharapkan campuran aspal yang dihasilkan akan memiliki performa yang optimal, menjaga daya tahan dan ketahanan terhadap beban serta kondisi lingkungan, sehingga memberikan kontribusi yang positif pada keberlanjutan dan keandalan struktur konstruksi.

2.3.1 Agregat Kasar

Menurut SNI 1969:2008, ukuran butir dalam agregat kasar berkisar antara 4,75 mm hingga 40 mm. Oleh karena itu, dalam merancang campuran beraspal, fraksi agregat kasar dihitung berdasarkan butiran yang masih tertahan pada saringan no. 4 dengan diameter lubang ayakan 4,75 mm. Selain itu, agregat kasar harus memenuhi persyaratan teknis seperti kebersihan, kekerasan, keawetan, dan bebas dari bahan yang tidak diinginkan (Suwastika et al., 2019). Berikut adalah tabel dari ketentuan agregat kasar menurut Bina Marga tahun 2018.

Tabel 2.1 Parameter Pengujian

Pengujian		Metode Pengujian	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan	Natrium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12 %
	Magnesium sulfat		Maks. 18 %
Abrasi dengan mesin	Campuran AC	SNI 2417:2008	Maks. 6%
	Modifikasi dan SMA		Maks. 30%
Los Angeles ¹	Campuran beraspal	SNI 2417:2008	Maks. 8%
	bergradasi lainnya		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal		SNI 2439:2011	Min. 95 %
Butir Pecah pada Agregat Kasar	SMA	SNI 7619:2012	100/90 ^{*)}
	Lainnya		95/90 ^{**)}
Partikel Pipih dan Lonjong	SMA	ASTM D4791-10	Maks. 5%
	Lainnya	Perbandingan 1 : 5	Maks. 10 %
Material lolos Ayakan No.200		SNI ASTM C117: 2012	Maks. 1%

Sumber: Bina Marga (2018)

Untuk memperoleh agregat kasar yang sesuai dengan persyaratan yang tertera pada Tabel 2.1, biasanya digunakan batu pecah yang dihasilkan dari proses pemecahan oleh mesin pemecah batu (*stone crusher*) sebagai bahan dasar. Mesin pemecah batu dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Mesin *Stone Crusher*

Gambar 2.2 menunjukkan mesin pemecah batu atau *stone crusher*. *Stone crusher* berfungsi untuk memecahkan batuan alam menjadi ukuran yang lebih kecil sesuai dengan spesifikasi (persyaratan gradasi) yang dibutuhkan. Selain itu, penggunaan batu pecah ini dipilih karena memenuhi persyaratan teknis yang diperlukan dalam campuran beraspal. Selain itu, penggunaan batu pecah yang dihasilkan melalui proses mesin pemecah batu juga menjamin kualitas dan gradasi agregat kasar yang dibutuhkan dalam proses produksi campuran beraspal. Dengan demikian, menggunakan batu pecah oleh mesin pemecah batu menjadi pilihan yang tepat untuk mendapatkan agregat kasar dengan kualitas yang memenuhi standar dan sesuai dengan kebutuhan dalam pembuatan campuran beraspal.

Dalam proses produksi campuran beraspal, agregat kasar harus disiapkan sesuai ukuran yang dibutuhkan untuk jenis campuran yang akan dirancang. Hal ini dilakukan agar gradasi agregat kasar dapat dikendalikan dengan baik dalam proses pencampuran. Sistem penyimpanan agregat kasar dilakukan dengan cara *cold bin*. *Cold bin* merupakan wadah untuk menyimpan agregat kasar dalam suhu ruangan atau suhu yang rendah, dan umumnya digunakan dalam produksi aspal dingin. *Cold bin* digunakan untuk memastikan ketersediaan agregat kasar dalam jumlah yang

sesuai dengan spesifikasi teknis yang diperlukan dan memastikan agregat kasar disimpan dengan benar sehingga tidak mudah terkontaminasi dengan bahan lain yang dapat mempengaruhi kualitas campuran beraspal.

Dengan memperhatikan persyaratan teknis dan proses produksi yang tepat, agregat kasar dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kualitas, kekuatan, dan daya tahan campuran beraspal. Oleh karena itu, penggunaan agregat kasar yang berkualitas dalam campuran beraspal sangat penting untuk memastikan konstruksi jalan dan jalan raya yang tahan lama (Kustiani, et al., 2021)

2.3.2 Agregat Halus

Agregat halus, menurut SNI 1967:2010, memiliki ukuran butir yang lebih kecil dari 4,75 mm. Di dalam campuran beraspal, fraksi agregat halus dihitung berdasarkan butiran yang tertahan pada saringan nomor 6 hingga nomor 200. Agregat halus memiliki peran penting dalam campuran beraspal, yaitu mengisi celah antara partikel agregat kasar dan berfungsi sebagai pengikat antara partikel-partikel agregat dan aspal. Selain itu, agregat halus juga mempengaruhi sifat fisik dan mekanik campuran beraspal, seperti kehalusan permukaan, ketahanan terhadap deformasi plastis, dan kemampuan drainase Masudi (2022).

Agar campuran beraspal berkualitas, agregat halus harus memenuhi persyaratan tertentu. Agregat halus harus bersih, keras, dan bebas dari tanah liat atau material lain yang tidak diinginkan saat digunakan dalam produksi campuran beraspal. Hal ini bertujuan untuk menjamin kualitas campuran aspal yang dihasilkan, sehingga bahan baku yang digunakan harus memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan.

Menurut Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi Kementrian (2018) untuk mendapatkan agregat halus yang mencapai standar, langkah-langkah yang harus diambil termasuk mencuci material agregat halus sebelumnya dan memastikan kualitas agregat halus yang digunakan. Untuk memastikan agregat harus yang bagus harus memehuni persyaratan yang disajikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Parameter Pengujian Agregat Halus

No	Pengujian	Metode Pengujian	Nilai
1.	Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min.50%
2.	Uji Kadar Rongga Tanpa Pemasatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45
3.	Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat	SNI 03-4141-1996	Maks 1%
4.	Agregat Lolos Ayakan No.200	SNI ASTM C117: 2012	Maks. 10%

Sumber: Bina Marga (2018)

Tabel 2.2 menunjukkan beberapa parameter pengujian yang harus dipenuhi oleh agregat kasar dalam campuran beraspal. Parameter pertama adalah "Nilai Setara Pasir" yang harus memenuhi standar SNI 03-4428-1997 dengan nilai minimum 50%. Parameter kedua adalah "Uji Kadar Rongga Tanpa Pemasatan" yang harus memenuhi standar SNI 03-6877-2002 dengan nilai minimum 45. Parameter ketiga adalah "Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat" yang harus memenuhi standar SNI 03-4141-1996 dengan nilai maksimum 1%. Parameter terakhir adalah "Agregat Lolos Ayakan No.200" yang harus memenuhi standar SNI ASTM C117: 2012 dengan nilai maksimum 10%. Semua parameter ini harus dipenuhi agar agregat kasar dapat digunakan dalam campuran beraspal dengan kualitas yang baik dan sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan.

2.4 Limbah Konstruksi

Menurut Latief dan Toengsal (2020), limbah konstruksi merupakan sisa atau bahan yang tidak terpakai dalam proses konstruksi. Meskipun demikian, beberapa jenis limbah konstruksi dapat diolah kembali sebagai substitusi agregat, seperti limbah beton dan limbah aspal. Limbah beton merupakan sisa atau bahan yang tidak terpakai dalam proses pembangunan atau pengujian beton itu sendiri, yang seringkali disebut sebagai beton hasil *crushing test* seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Limbah Beton

Gambar 2.3 menunjukkan limbah beton dapat menjadi sisa atau material yang tidak terpakai dalam proses pembangunan, pembongkaran, dan renovasi gedung atau jalan. Jika tidak dikelola dengan baik, limbah beton dapat menjadi masalah lingkungan yang dapat menyebabkan pencemaran air dan tanah Suwastika et al (2019). Dengan demikian, penting untuk memperhatikan pengelolaan limbah beton dan melakukan daur ulang. Limbah beton dapat didaur ulang menjadi agregat kasar atau halus yang dapat digunakan kembali dalam proses konstruksi bangunan.

Pendekatan ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah beton diharapkan dapat mengurangi dampak negatif pada lingkungan dan memberikan manfaat ekonomi dengan menekan biaya produksi. Selain itu, penggunaan limbah beton sebagai bahan baku alternatif dalam industri konstruksi juga dapat meningkatkan kualitas produk dan menunjukkan komitmen untuk menjaga keberlanjutan lingkungan. Dengan demikian, pengelolaan limbah beton harus dilakukan dengan baik agar dapat memberikan manfaat bagi lingkungan dan industri konstruksi.

2.5 *Recycled Concrete Agregat (RCA)*

Recycled Concrete Aggregate atau selanjutnya disebut dengan RCA merupakan jenis agregat beton daur ulang, yang merujuk pada hasil daur ulang material agregat dari proses penghancuran dan pemrosesan beton bekas yang tidak terpakai, rusak, atau hasil dari pengujian beton. Menurut Khushnood, yang dikutip oleh Iskandar et al. (2022), penggunaan RCA dalam aplikasi non-struktural pertama kali diperkenalkan oleh Amerika Serikat pada tahun 1970-an. Pada proses ini, beton bekas dikumpulkan dan kemudian dihancurkan untuk menghasilkan RCA seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 *Recycled Concrete Agregate*

Gambar 2.4 menunjukkan limbah beton yang sudah dihancurkan dan akan menjadi RCA. RCA ini nantinya dapat digunakan sebagai bahan pengisi, pondasi, dan bahan dasar dalam berbagai proyek konstruksi. Agregat beton daur ulang ini dapat digunakan sebagai pengganti agregat alami dalam pembuatan campuran beraspal, beton, dan campuran konstruksi lainnya.

Terbatasnya sumber daya alam, seperti agregat alami, mendorong pencarian alternatif dalam industri konstruksi. Penggunaan RCA sebagai pengganti agregat alami dapat mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya alam yang terbatas dan tidak dapat diperbaharui. Dengan memanfaatkan bahan yang sebelumnya tidak terpakai, RCA membantu menjaga keseimbangan dan ketersediaan sumber daya alam yang lebih berkelanjutan.

Penggunaan RCA ini memberikan manfaat ganda dalam industri konstruksi, di mana selain mengurangi limbah beton yang biasanya dibuang, RCA juga dapat dimanfaatkan sebagai pengganti agregat alami dalam campuran beraspal, beton, serta campuran konstruksi lainnya. Dengan menggunakan RCA, bahan beton bekas yang sebelumnya tidak terpakai dapat dikelola ulang dan dimanfaatkan kembali.

2.6 Pengujian

Sebelum melakukan perencanaan atau perancangan campuran aspal, sangat penting untuk melakukan pengujian terhadap material yang akan digunakan. Pengujian ini bertujuan untuk menjamin campuran perkerasan yang dihasilkan memenuhi persyaratan dan standar yang berlaku. Beberapa jenis pengujian yang biasanya dilakukan adalah pengujian karakteristik aspal, pengujian karakteristik agregat, pengujian Marshall, dan pengujian stabilitas campuran.

2.6.1 Pengujian Material

Pengujian material terdiri dari dua jenis yaitu pengujian agregat dan aspal. Pengujian agregat dilaksanakan guna mencari tahu kelayakan dari agregat yang diaplikasikan pada campuran beraspal, perlu dilakukan beberapa jenis pengujian dalam pemeriksaan mutu agregat.

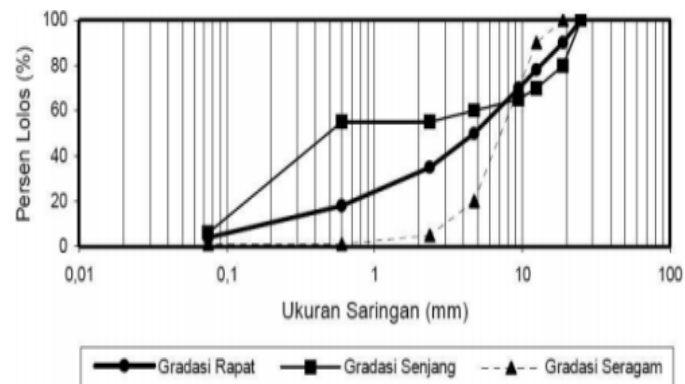
Menurut Pangaribuan & Dafrin (2020), gradasi agregat merupakan urutan susunan butiran agregat berdasarkan ukurannya, dan sangat berpengaruh pada kualitas perkerasan jalan secara keseluruhan. Analisis gradasi agregat didapatkan melalui pengujian menggunakan 1 set ayakan dengan ukuran saringan bervariasi dari yang terbesar hingga yang terkecil. Terdapat batasan gradasi agregat untuk menyatakan fraksi tiap agregat juga sebagai persyaratan bahwa agregat tersebut dapat digunakan, seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Beraspal

Ukuran Ayakan		% Berat Yang Lolos terhadap Total Agregat		
		Laston (AC)		
ASTM	(mm)	WC	BC	Base
1 ½	37,5			100
1	25		100	90 - 100
¾	19	100	90 - 100	76 - 90
½	12,5	90 - 100	75 - 90	60 - 78
⅜	9,5	77 - 90	66 - 82	52 - 71
No. 4	4,75	53 - 69	46 - 64	35 - 54
No. 8	2,36	33 - 53	30 - 49	23 - 41
No. 16	1,18	21 - 40	18 - 38	13 - 30
No. 30	0,600	14 - 30	12 - 28	10 - 22
No 50	0,300	9 - 22	7 - 20	6 - 15
No.100	0,150	6 - 15	5 - 13	4 - 10
No.200	0,075	4 - 9	4 - 8	3 - 7

Sumber; Bina Marga (2018)

Tujuan dari pengujian ini untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat kasar dan agregat halus serta jumlah persentase butirannya dengan menggunakan saringan dan kemudian disajikan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.5 Batasan Gradasi Agregat (Silvia Sukirman, 2007)

Tabel 2.3 dan Gambar 2.3 merupakan batasan persentase lolos agregat kasar dan halus, seperti yang disyaratkan dalam spesifikasi Bina Marga 2018. Dalam pengujian ini, setelah mendapatkan persentase lolos dari agregat kemudian kita memeriksa agar persentase lolos setiap ukuran berada pada daerah batasan. Hal ini dilakukan untuk mengontrol gradasi agregat yang akan digunakan dalam campuran beraspal, karena salah satu yang mempengaruhi karakteristik lapisan aspal adalah gradasi agregat.

Gradasi agregat menentukan besar rongga antar butir untuk menentukan stabilitas dan workabilitas. Terdapat tiga jenis gradasi agregat berdasarkan ukuran butirannya, yaitu gradasi seragam (*uniform graded*) disebut juga sebagai gradasi terbuka karena mengandung sedikit agregat halus. Ukuran butiran agregat yang dihasilkan hampir sama, campuran beraspal dari gradasi ini memiliki permeabilitas yang tinggi dan stabilitas yang rendah. Campuran beraspal bersifat permeabilitas

karena rongga campuran tidak diisi oleh agregat halus, sedangkan gradasi rapat (*dense graded*) tersusun atas butiran agregat kasar dan agregat halus yang seimbang atau disebut juga sebagai gradasi baik (*well graded*). Lapisan perkerasan yang dihasilkan memiliki nilai stabilitas tinggi, dan gradasi buruk/senjang (*poorly/gap graded*) fraksi ukuran agregat yang tidak lengkap atau jumlahnya sedikit sekali, disebut juga sebagai gradasi buruk (*poorly graded*). Menghasilkan perkerasan dengan mutu diantara gradasi seragam dan gradasi rapat.

Dalam campuran agregat, gradasi agregat diukur dengan menyatakan persentase agregat yang lolos atau tertahan berdasarkan beratnya, sehingga dapat menentukan ukuran rongga dalam campuran agregat. Ukuran gradasi agregat untuk pengelompokan pada Bin dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Ukuran Butiran Pada Bin

Jenis Bin	Lolos Saringan	Tertahan Saringan
Bin 1	$\frac{3}{4}$ " (19 mm)	$\frac{1}{2}$ " (12,5 mm)
Bin 2	$\frac{3}{8}$ " (9,5 mm)	No. 4 (4,75 mm)
Bin 3	No. 4 (4,75 mm)	No. 8 (2,36 mm)
Bin 4	No.8 (2,3 mm)	-

Sumber: Bina Marga (2018)

Tabel 2.4 merupakan penjelasan mengenai ukuran bin agregat yang akan digunakan dalam campuran beraspal. Untuk visual hasil saringan dapat dilihat pada Gambar 2.6 sebagai berikut.



Gambar 2.6 Ukuran Butiran Pada Bin

Tabel 2.4 dan Gambar 2.6 menunjukkan bahwa terdapat 4 jenis bin yang digunakan, yaitu bin 1, bin 2, bin 3, dan bin 4. Bin 1 dan bin 2 termasuk dalam jenis agregat kasar, sedangkan bin 3 dan bin 4 termasuk dalam jenis agregat halus. Dalam analisis saringan agregat, menggunakan agregat yang lolos saringan 3/4", lolos saringan 3/8", lolos saringan No. 4, dan lolos saringan No. 8. Selanjutnya, persentase agregat yang terpilih ditentukan untuk menentukan apakah agregat telah memenuhi persyaratan dalam spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018 dengan menggunakan persamaan yang telah ditetapkan.

$$\text{Terpilih} = (a \times \%a) + (b \times \%b) + (c \times \%c) + (d \times \%d) \quad (2.1)$$

Komposisi II

$$\text{Fraksi Bin 1} = 100 - \text{Terpilih saringan } 1/2 \quad (2.2)$$

$$\text{Fraksi Bin 2} = \text{Terpilih saringan } 1/2 - \text{Terpilih saringan } 4 \quad (2.3)$$

$$\text{Fraksi Bin 3} = \text{Terpilih saringan } 4 - \text{Terpilih saringan } 8 \quad (2.4)$$

$$\text{Fraksi Bin 4} = \text{Terpilih saringan } 8 \quad (2.5)$$

Komposisi I

$$\text{Komposisi Lolos Bin } n = \frac{\text{Komposisi II bin } n \times 100}{\Sigma \text{Komposisi II}} \quad (2.6)$$

$$\text{Kadar aspal komposisi I} = 100 - \Sigma \text{Komposisi I} \quad (2.7)$$

Keterangan :

a : %lolos Bin 1 saringan ke-n (%)

b : % lolos Bin 2 saringan ke-n (%)

c : % lolos Bin 3 saringan ke-n (%)

d : % lolos Bin 4 saringan ke-n (%)

a% : % agregat Bin 1 (%)

b% : % agregat Bin 2 (%)

c% : % agregat Bin 3 (%)

d% : % agregat Bin4 (%)

Pemeriksaan daya tahan atau keausan pada agregat sering dilakukan menggunakan metode uji abrasi dengan mesin *Los Angeles*. Uji abrasi bertujuan untuk mengukur tingkat ketahanan agregat terhadap proses gesekan dan tumbukan yang dapat mempengaruhi kualitas agregat, terutama pada penggunaannya sebagai bahan campuran beraspal. Penilaian terhadap tingkat keausan agregat ini penting sesuai dengan standar persyaratan yang ditetapkan dalam standar SNI 2417 – 2008, yang menggoongkan agregat berdasarkan tingkat keausannya.

Apabila nilai keausan yang diperoleh dari pengujian agregat melebihi 40%, maka agregat tersebut dianggap tidak baik untuk digunakan dalam bahan perkerasan jalan. Artinya, agregat tersebut cenderung kurang tahan terhadap abrasi dan keausan akibat gesekan dari lalu lintas kendaraan, sehingga tidak memenuhi persyaratan yang diinginkan dalam perkerasan jalan. Sementara itu, jika nilai keausan agregat yang diperoleh dari pengujian berada di bawah 40%, maka agregat tersebut dianggap baik dan layak digunakan dalam bahan perkerasan jalan. Hal ini menandakan bahwa agregat tersebut memiliki ketahanan yang memadai terhadap keausan dan abrasi, sehingga dapat memberikan kontribusi yang positif pada kekuatan dan keawetan perkerasan jalan yang dibuat.

Pengujian ini memiliki tujuan yang sangat penting dalam mengevaluasi sejauh mana agregat yang akan digunakan mampu mempertahankan kualitasnya, terutama agregat kasar. Adapun agregat yang akan digunakan beratnya disesuaikan dengan ketentuan pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Daftar Gradasi Berat Agregat Kasar

Ukuran Saringan				Gradasi dan Berat Benda Uji (gram)							
Lolos Saringan		Tertahan saringan		A	B	C	D	E	F	G	
mm	inci	mm	inci								
75	3	63	2.5	-	-	-	-	2500±50	-	-	
63	2.5	50	2	-	-	-	-	2500±50	-	-	
50	2	37,5	1.5	-	-	-	-	5000±50	5000±50	-	
37,5	1.5	25	1	1250±25	-	-	-	-	5000±25	5000±25	
25	1	19	3/4	1250±25	-	-	-	-	-	5000±25	
19	3/4	12,5	1/2	1250±10	2500±10	-	-	-	-	-	
12,5	1/2	9,5	3/8	1250±10	2500±10	2500±10	-	-	-	-	
9,5	3/8	6,3	1/4	-	-	2500±10	-	-	-	-	
6,3	1/4	4,75	No. 4	-	-	-	2500±10	-	-	-	
4,75	No. 4	2,36	No.8	-	-	-	2500±10	-	-	-	
Total				5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±10	10000±10	10000±10	
Jumlah Bola				12	11	8	6	12	12	12	
Berat Bola (gram)				5000±25	4584±25	3330±20	2500±15	5000±25	5000±25	5000±25	

Sumber: SNI 2417 – 2008

Pada Tabel 2.5 terdapat beberapa istilah yang perlu dipahami. Pertama, "bola baja" merupakan besi bulat berbentuk bola dengan ukuran dan berat tertentu yang digunakan sebagai beban untuk menggerus agregat pada mesin abrasi. Selanjutnya, ada beberapa gradasi agregat yang digunakan, seperti "Gradasi A" yang terdiri dari agregat kasar dengan ukuran butir maksimum 37,5 mm (1 ½ inci) hingga agregat dengan ukuran butir 9,5 mm (3/8 inci). Selain itu, terdapat "Gradasi B" dari ukuran butir maksimum 19,0 mm (3/4 inci) sampai dengan ukuran butir 9,5 mm (3/8 inci), serta "Gradasi C" dari ukuran butir maksimum 9,5 mm (3/8 inci) hingga agregat dengan ukuran butir 4,75 mm (saringan No. 4). "Gradasi D" mencakup agregat dari ukuran butir maksimum 4,75 mm (saringan No. 4) hingga ukuran butir 2,36 mm (saringan No. 8), dan "Gradasi E" terdiri dari agregat dari ukuran butir maksimum 75 mm (3 inci) sampai dengan ukuran butir 37,5 mm (1 ½ inci). Selanjutnya, ada "Gradasi F" yang mencakup agregat dari ukuran butir maksimum 50 mm (2 inci)

hingga ukuran butir 25,0 mm (1 inci), serta "Gradasi G" dari ukuran butir maksimum 37,5 mm (1 ½ inci) hingga ukuran butir 19,0 mm (¾ inci). Istilah-istilah ini merupakan bagian penting dalam pengujian keausan agregat dan memberikan kontribusi dalam memahami proses dan hasil pengujian yang dilakukan.

Berat benda uji yang akan digunakan dalam pengujian ini dilihat pada Tabel 2.5, sesuai dengan gradasi yang akan digunakan. Kebutuhan banyaknya bola besi yang akan digunakan dalam mesin abrasi juga terdapat pada tabel tersebut. Bola besi yang digunakan akan beradu dengan benda uji untuk menguji tingkat ketahanan benda tersebut. Hasil pemeriksaan kemudian dilakukan pengolahan data, untuk mendapatkan nilai keausan dengan menggunakan persamaan 2.8.

$$\text{Keausan} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2.8)$$

Keterangan :

W_1 = Berat benda uji awal (gram)

W_2 = Berat benda uji tertahan saringan No.12 (gram)

Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan pada konstruksi merupakan langkah penting dalam memastikan kualitas produk konstruksi yang dihasilkan. Dalam pemeriksaan ini berat jenis agregat dapat diukur dengan tiga cara yang berbeda. Pertama, berat jenis curah (*Bulk*), dihitung dengan memperhitungkan seluruh volume pori, termasuk volume pori yang bisa diresapi air dan yang tidak bisa diresapi air. Kedua, berat jenis semu (*Apparent*), dihitung dengan memperhitungkan volume bagian agregat yang bisa diresapi air. Terakhir, berat jenis efektif, digunakan saat resapan aspal secara normal yang hanya akan meresapi sebagian dari pori agregat. Selain itu, angka penyerapan digunakan untuk

menghitung perubahan berat agregat akibat air yang terserap ke dalam pori-pori antar partikel utama, dibandingkan dengan kondisi kering saat agregat dianggap telah terpapar air cukup lama sehingga penyerapannya sudah optimal.

Indeks absorpsi digunakan untuk mengukur perubahan massa agregat akibat air yang terserap ke dalam pori-pori antar partikel utama dibandingkan dengan kondisi kering, ketika agregat telah terpapar air cukup lama sehingga penyerapannya optimal. Agregat yang diambil dari bawah muka air tanah biasanya memiliki penyerapan yang lebih tinggi ketika digunakan, jika tidak dibiarkan mengering terlebih dahulu. Sebaliknya, beberapa jenis agregat mungkin memiliki kadar air yang lebih rendah jika digunakan, dibandingkan dengan kondisi terendam selama (24 ± 4) jam.

Dalam pemeriksaan ini harus mengikuti standar yang telah ditetapkan oleh SNI 1969:2008 untuk agregat kasar dan SNI 1970:2008 untuk agregat halus. Uji ini dilakukan untuk memastikan bahwa agregat memenuhi standar kualitas yang ditetapkan sehingga dapat menghasilkan produk konstruksi yang berkualitas. Menurut ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, mengenai Perkerasan Aspal, agregat kasar harus memenuhi persyaratan nilai berat jenis minimal 2,5 dan nilai penyerapan air maksimal 3%. Untuk mendapatkan berat jenis dan penyerapan agregat, dapat menggunakan persamaan 2.9, 2.10, 2.11, dan 2.12.

$$\text{Berat Jenis Kering Oven (Bulk)} = \frac{A}{S-C} \quad (2.9)$$

$$\text{Berat Jenis Kering Permukaan (SSD)} = \frac{S}{S-C} \quad (2.10)$$

$$\text{Berat Jenis Semu (Apparent)} = \frac{A}{A-C} \quad (2.11)$$

$$\text{Penyerapan (Absorbtion)} = \frac{S-A}{A} \times 100\% \quad (2.12)$$

Keterangan:

A = Berat sampel kering oven (gram)

C = Berat sampel jenuh dalam air (gram)

S = Berat sampel kering permukaan jenuh udara (gram)

Campuran beraspal tidak hanya terdiri dari agregat, tetapi juga mengandung aspal sebagai bahan pengikatnya. Pengujian terhadap karakteristik aspal perlu dilakukan untuk memastikan bahwa aspal yang digunakan memenuhi standar dan persyaratan yang berlaku dengan melakukan sejumlah pengujian. Hasil pengujian tersebut akan memberikan gambaran mengenai kelayakan aspal sebagai bahan campuran beraspal. Untuk menentukan kelayakan aspal sebagai bahan campuran dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Parameter Pengujian Aspal

Jenis Pengujian	Standar	Tipe I Aspal Pen. 60-70
Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70
Viskositas Kinematis 135°C	ASTM D2170-10	≥ 300
Titik Lembek (°C)		> 48
Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2434:2011	> 100
Titik Nyala (°C)		> 232
Kelarutan dalam <i>Trichloroethylene</i> (%)	AASHTO T44-14	> 99
Berat Jenis	SNI 2441:2011	> 1,0
Kadar Parafin Lilin (%)	SNI 03-3639-2002	<2

Sumber: Bina Marga (2018)

Tabel 2.6 menyajikan berbagai karakteristik yang dimiliki oleh aspal, dengan penetrasi dilakukan untuk menentukan tingkat kekerasan aspal dengan menggunakan metode pengujian penetrasi sesuai standar SNI 2456-2011, penetrasi 60/70 yang menunjukkan tingkat kekerasan aspal harus berada dalam rentang 60

hingga 70. Viskositas kinematis digunakan untuk menggambarkan sifat kekentalan aspal, yang harus memiliki nilai setidaknya $\geq 300^{\circ}\text{C}$. Titik lembek digunakan untuk menggambarkan perubahan aspal sehubungan dengan perubahan suhu, dan standar SNI 2434-2011 menetapkan persyaratan bahwa titik lembek harus setidaknya ≥ 48 . Daktilitas aspal digunakan untuk menggambarkan sifat fleksibilitasnya, dan nilainya harus setidaknya ≥ 100 sesuai dengan standar SNI 2432-2011. Titik nyala mengacu pada standar SNI 2433-2011 digunakan untuk menunjukkan suhu di mana aspal dapat terbakar, dengan nilai minimal yang harus $\geq 232^{\circ}\text{C}$. Selain itu, berat jenis, kelarutan dalam *Trichloroethylene*, dan kadar parafin lilin juga digunakan untuk menggambarkan mutu aspal secara keseluruhan.

2.6.2 Kadar Aspal Optimum (KAO)

Kadar Aspal Optimum atau dikenal dengan singkatan KAO merupakan kadar aspal yang memberikan kekuatan optimal pada campuran aspal beton. Hal ini sangat penting dalam desain campuran aspal beton karena dapat mempengaruhi kinerja campuran dalam jangka panjang. Untuk menentukan KAO yang tepat, dibutuhkan uji laboratorium dengan menggunakan metode uji yang standar, seperti metode Marshall. Metode ini dilakukan untuk mendapatkan stabilitas dan *flow* pada campuran beraspal (Effendy dkk, 2019).

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian dengan berbagai kadar aspal rencana, yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%. Setelah KAO teridentifikasi, dilakukan kombinasi komposisi dengan menambahkan RCA pada campuran beraspal untuk menciptakan campuran beraspal yang optimal dan memiliki ketahanan yang baik.

2.6.3 Pengujian Marshall

Proses pengujian Marshall, yang secara khusus mengacu pada standar SNI 2489-2018, merupakan suatu tahap penting dalam mengevaluasi kualitas karakteristik campuran beraspal. Metode Marshall ini melibatkan sejumlah langkah pengujian, termasuk uji kompresi pada silinder campuran beraspal yang dicetak pada suhu tertentu (Weimintoro et al., 2022). Selama proses pengujian Marshall, perubahan tinggi dan diameter silinder dicatat sebagai bagian dari metode untuk mengukur karakteristik mekanik dan fisik campuran beraspal.

Dalam upaya untuk mengukur nilai stabilitas, perlu memperhatikan beberapa parameter yang digunakan dalam metode pengujian Marshall. Beberapa parameter Marshall ini adalah stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient (MQ)*, *Void in Total Mix (VIM)*, *Void in Mineral Agregate (VMA)*, dan *Volume of Voids in the Filled Asphalt (VFA)*. Parameter tersebut harus dipastikan memenuhi standar kualitas yang ditetapkan pada perkerasan jalan.

Stabilitas merupakan kemampuan suatu campuran beraspal untuk menahan sebelum mengalami kegagalan atau retak. Penilaian stabilitas didasarkan pada nilai yang ditunjukkan oleh jarum dial pada alat pengujian. Untuk mengonversi nilai stabilitas yang ditunjukkan pada jarum dial ke dalam satuan Marshall yang umumnya menggunakan satuan *pound force (Lbf)*, perlu dilakukan penyesuaian satuan menjadi kilogram. Selanjutnya, nilai tersebut juga harus disesuaikan dengan angka koreksi seperti pada Tabel 2.7 yang berkaitan dengan ketebalan atau volume benda uji agar hasil pengujian menjadi akurat kemudian dikalikan dengan *proving ring* berikut.

Tabel 2.7 Angka Korelasi

Bulk Volume (cm ³)	Tebal Benda Uji	Angka Korelasi
354 - 367	44,4	1,92
368 - 379	46,0	1,79
380 - 392	47,6	1,67
393 - 405	49,2	1,56
406 - 420	50,8	1,47
421 - 431	52,4	1,39
432 - 443	54,0	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 06-2489-2018

Tabel 2.7 menunjukkan data angka korelasi stabilitas dapat ditemukan dari isi benda uji sampel. Sebagai contoh, jika isi benda uji berada di antara 354-367 cm³ maka, angka korelasi stabilitas adalah 1,92. Nilai stabilitas maksimum ini harus memenuhi standar tertentu yang telah ditetapkan, dengan persyaratan nilai stabilitas minimal sebesar 800 kg. Nilai stabilitas dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.13.

$$\text{Stabilitas} = \text{Bacaan dial} \times \text{kalibrasi ring} \times \text{angka korelasi} \quad (2.13)$$

Flow (kelelehan plastis), kemampuan campuran beraspal untuk mengalir/deformasi ketika diberi beban. Nilai *flow* yang dihasilkan menunjukkan kekakuan atau kemampuan campuran beraspal untuk beradaptasi dengan beban, dan juga harus memenuhi standar tertentu. Spesifikasi untuk besar nilai *flow* pada campuran beraspal sebesar 2–4 mm.

Marshall Quotient (Kuotasi *Marshall*) rasio antara kekuatan maksimum dan kekakuan campuran beraspal. Kuotasi *Marshall* yang tinggi menunjukkan bahwa campuran beraspal tersebut kuat dan lentur. Nilai MQ disyaratkan berkisar 250 kg/mm. Untuk memperoleh nilai MQ menggunakan persamaan 2.14.

$$MQ = \frac{S}{F} \quad (2.14)$$

Keterangan:

S = Nilai stabilitas (kg)

F = Nilai *flow* (mm)

Berat jenis maksimum campuran (G_{mm}) bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis maksimum setelah campuran beraspal divakum pada kondisi minim rongga (*void*). Nilai berat jenis maksimum agregat pada berbagai kadar aspal diperlukan untuk menghitung kadar rongga pada masing-masing kadar aspal dengan menggunakan persamaan 2.15.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad (2.15)$$

Keterangan;

A = Massa sampel kering di udara

D = Massa dari wadah dengan air pada 25°C

E = Massa dari wadah dengan air + sampel pada suhu 25°C (vakum udara)

Berat jenis curah total agregat (G_{sb}) adalah ukuran yang menggambarkan berat keseluruhan suatu agregat dalam kondisi curah (bulk), termasuk ruang antar partikel yang berisi udara atau air yang dapat dihitung menggunakan persamaan 2.16.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4}} \quad (2.16)$$

Keterangan:

P_1, P_2, P_n = Persentase dalam pembagian 1, 2, n

G_1, G_2, G_n = Berat jenis curah agregat

Void in Total Mix (VIM) adalah parameter yang mengukur besarnya jumlah pori atau ruang kosong dalam campuran beraspal. Kandungan *air void* yang tinggi dapat menunjukkan adanya kebocoran dan kerusakan pada jalan. Persyaratan untuk besaran nilai VIM yaitu sebesar 3–5% yang didapatkan dengan persamaan 2.17.

$$VIM = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (2.17)$$

Keterangan:

G_{mb} = Berat jenis curah campuran

G_{mm} = Berat jenis maksimum campuran

Void in Mineral Aggregate (VMA) adalah persentase rongga atau pori dalam campuran beraspal yang terdiri dari agregat mineral. Nilai VMA dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk kadar aspal, gradasi agregat, jumlah tumbukan, dan pemadatan. Jika nilai VMA semakin kecil dari persyaratan minimum yaitu >14%, maka akan mengurangi durabilitas campuran. Sebaliknya, jika nilai VMA semakin besar, akan menurunkan stabilitas campuran dan meningkatkan penyerapan agregat terhadap aspal. Untuk memperoleh nilai VMA menggunakan persamaan 2.18.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times (100 - \text{Kadar Aspal})}{G_{sb}} \quad (2.18)$$

Keterangan:

G_{mm} = Berat jenis maksimum campuran padat

G_{sb} = Berat jenis curah agregat

Volume of Voids in the Filled Asphalt (VFA) merupakan persentase rongga yang terisi oleh aspal dalam campuran beraspal. Jumlah ini tidak termasuk aspal yang telah terserap oleh agregat. Semakin besar nilai VFA, maka semakin banyak pori udara dalam campuran yang diisi oleh aspal, yang dapat mengakibatkan bleeding. Persyaratan untuk nilai VFA yang optimal adalah setidaknya >65%. Untuk memperoleh nilai VFA menggunakan persamaan 2.19.

$$VFA = \frac{100 \times (VMA - VIM)}{VMA} \quad (2.19)$$

Keterangan:

VMA = Rongga di antara mineral agregat

VIM = Rongga di dalam campuran beraspal

Dalam rangka menentukan proporsi bahan dan komponen lainnya yang optimal dalam campuran beraspal laston, pengukuran beberapa parameter penting perlu dilakukan. Parameter-parameter ini berperan dalam menguji kualitas dan karakteristik campuran beraspal, sehingga hasilnya dapat memenuhi standar dan spesifikasi yang ditentukan.

Dengan memastikan parameter-parameter tersebut memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Parameter pengujian Marshall dalam campuran beraspal laston adalah sebagai berikut:

Tabel 2.8 Ketentuan Sifat – Sifat Campuran Beraspal Laston

Sifat – Sifat Campuran		Laston		
		AC	BC	Base
Jumlah tumbukkan perbidang		75		
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min	0,6		
	Maks	1,2		
Rongga dalam campuran (VIM) (%)	Min	3,0		
	Maks	5,0		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min	15	14	13
Rongga terisi Aspal (VFA) (%)	Min	65	65	65
Stabilitas Marshall (Kg)	Min	800	1800	
Pelelehan (<i>flow</i>) (mm)	Min	2	3	
	Maks	4	6	
<i>Marshall Quotient</i> (MQ) (Kg/mm)	Min	250		
Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam 60°C	Min	90		

Sumber: Bina Marga (2018)

Dalam campuran beraspal tipe laston dan pada lapisan BC (*Base Course*), harus mematuhi berbagai ketentuan sifat-sifat seperti yang tercantum dalam Tabel 2.8. Ketentuan tersebut meliputi jumlah tumbukan per bidang sebesar 75, rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan nilai minimal sebesar 0,6 dan maksimal sebesar 1,2, rongga dalam campuran minimal 3,0% dan maksimal 5,0%, VMA minimal 14%, rongga terisi aspal minimal 65%, stabilitas Marshall dengan nilai minimal 800 Kg, pelelehan minimal 2 dan maksimal 4, stabilitas Marshall sisa setelah perendaman selama 24 jam pada suhu 60°C minimal 90%, *Marshall Quotient* (MQ) dengan minimal 250 (kg/mm). serta rongga dalam campuran pada kepadatan membal (*refusal*) minimal 2%. Untuk memenuhi ketentuan sifat-sifat tersebut, dibutuhkan perencanaan proporsi campuran yang sesuai, serta pengaturan teknik campuran yang baik.

2.7 Penelitian Terdahulu

Hasil studi literatur mengenai campuran beraspal dengan pemanfaatan limbah beton sebagai pengganti agregat menunjukkan bahwa penggunaan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) dalam campuran beraspal menghasilkan karakteristik yang berbeda. Berikut adalah penelitian terdahulu yang dilakukan:

- a. Wirahaji & Laintarawan (2019) melakukan penelitian yang berjudul "Karakteristik Marshall AC-BC Dengan Substitusi Limbah Beton Pada Agregat Kasar" bertujuan untuk mengidentifikasi sifat campuran beraspal AC-BC dengan menggunakan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar. Dalam penelitian ini, dilakukan variasi limbah beton dari 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, hingga 100% terhadap agregat kasar. Hasil penelitian pada penggunaan limbah beton dalam campuran beraspal dapat meningkatkan nilai VIM, VFB, dan VMA. Namun, sebaliknya, nilai stabilitas, *flow*, dan MQ cenderung menurun dengan penggunaan limbah beton. Nilai penyerapan limbah beton yang lebih besar dapat membuat aspal menjadi cepat meresap masuk kedalam pori-pori limbah sebelum mengikat antar agregat. Meskipun demikian, penelitian ini tidak mengidentifikasi mutu beton yang digunakan.
- b. Subagyo & Indramaha (2020) melakukan penelitian yang berjudul "Kinerja Marshall Campuran Beraspal Panas Lapis (AC-BC) Menggunakan Limbah Beton" bertujuan untuk melakukan perbandingan nilai Kadar Aspal Optimum pada berbagai proporsi agregat yang berbeda. Beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah beton dengan mutu K-250 dan proporsi limbah beton yang digunakan adalah 0%, 5%, 10%, dan 15% terhadap agregat alam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seiring dengan penambahan kadar limbah,

maka nilai stabilitas, VMA, VIM, dan MQ mengalami peningkatan sedangkan nilai *flow* dan VFB mengalami penurunan.

- c. Álvarez et al. (2020) melakukan penelitian dengan judul "*Influence Of Partial Coarse Fraction Substitution Of Natural Aggregate By Recycled Concrete Aggregate In Hot Asphalt Mixtures*" bertujuan untuk mengevaluasi sifat-sifat campuran aspal panas yang telah dibuat dengan menggunakan variasi kadar RCA yaitu 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan meningkatnya persentase RCA dalam campuran dapat meningkatkan nilai stabilitas, *flow*, VIM dan VMA. Untuk persentase optimal dalam substitusi RCA adalah sebesar 40%, karena nilai stabilitas dan *flow* memenuhi persyaratan spesifikasi yang ditetapkan. Dalam penelitian ini menunjukkan kualitas RCA tergantung pada sumber dari material itu sendiri.
- d. Penelitian yang dilakukan oleh Bastidas-Martínez et al. (2022) dengan judul "*Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements: A review*" bertujuan untuk memberikan literatur mengenai penggunaan RCA sebagai upaya dalam mengurangi dampak penggunaan NA secara berlebihan terhadap lingkungan. Dalam penelitian ini menyajikan tunjauan pengetahuan yang mengacu pada penggunaan RCA ketika digunakan dalam pembuatan campuran beraspal. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa RCA memiliki potensi yang luas untuk digunakan dalam pembuatan campuran beraspal, mengingat RCA tidak mengandung lempung, sehingga mendukung kelekatan antara agregat dan aspal. Namun, keterbatasan utama dalam penggunaan RCA terkait dengan ketahanan retak dan penyerapan pada agregat yang tinggi. Hal ini dikarenakan sifat fisik yang melekat pada RCA

sangat heterogen dan bervariasi tergantung pada sumber dan asal beton tersebut.

- e. Penelitian yang berjudul "*Life Cycle Assessment Of Hot Mix Asphalt With Recycled Concrete Aggregates For Road Pavements Construction*" oleh Vega A et al., (2022) bertujuan untuk membandingkan potensi dampak lingkungan pada penggunaan Recycled Concrete Agregat (RCA) sebagai pengganti agregat kasar dalam pembuatan campuran beraspal panas (HMA). Penelitian ini dilakukan pada tiga variasi kadar RCA, yaitu 15%, 30% dan 45% menggunakan metode penilaian dampak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan RCA pada kadar 15% dan 30% merupakan campuran yang baik, karena memenuhi persyaratan sehingga dapat digunakan dalam campuran beraspal. Sedangkan, pada kadar 45% menunjukkan kinerja yang lebih rendah karena peningkatan kadar limbah dapat meningkatkan penggunaan aspal sebagai bahan pengikat. Penggunaan RCA dianggap dapat menjadi alternatif yang ramah lingkungan karena dapat mengurangi dampak bagi lingkungan yang disebabkan oleh peningkatan limbah konstruksi terutama beton.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, dapat disimpulkan dengan penggunaan RCA sebagai substitusi pada campuran beraspal dapat mempengaruhi karakteristik terhasp campuran. Penggunaan RCA dengan mutu K-250 dapat meningkatkan nilai stabilitas campuran. Penggunaan RCA perlu mempertimbangkan mutu limbah beton, proporsi substitusi yang tepat, dan kualitas RCA untuk mencapai campuran beraspal yang sesuai dengan persyaratan teknis dan lingkungan yang berkelanjutan.

2.8 Kebaruan Penelitian

Pada penelitian ini, dilakukan pemanfaatan limbah beton hasil *crushing test* dengan mutu beton $f_c'25$ sebagai RCA dalam campuran aspal beton dengan tujuan meningkatkan nilai stabilitas, berdasarkan studi literatur dan hasil penelitian sebelumnya. Substitusi RCA akan divariasikan dengan kadar mulai dari 0% sebagai pembanding, kemudian dilakukan tambahan variasi kadar sebesar 25%, 50%, 75%, hingga 100%. Pengujian akan mengikuti spesifikasi AC-BC dan standar Bina Marga tahun 2018. Penelitian ini akan melibatkan pengujian Marshall untuk mendapatkan parameter aspal dan menganalisis pengaruh penambahan RCA pada campuran beraspal.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

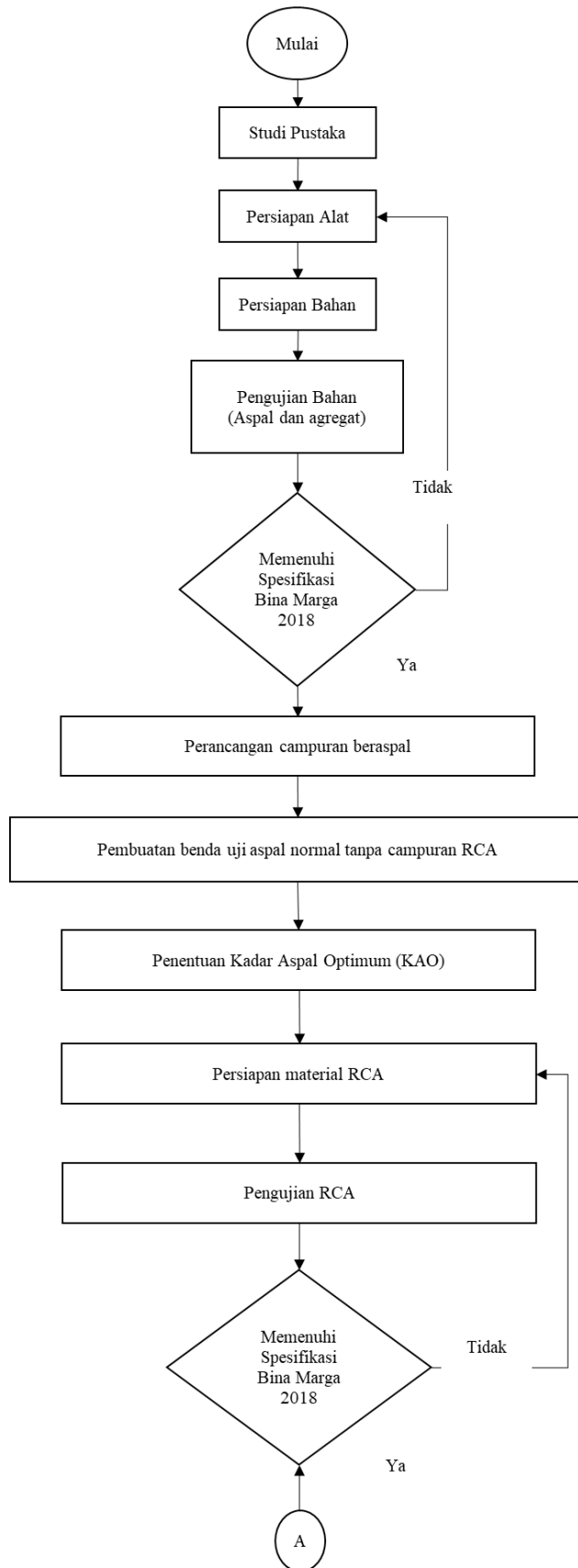
Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental, yang melibatkan percobaan untuk mengumpulkan data. Data tersebut kemudian dianalisis untuk membandingkan dengan persyaratan yang berlaku. Pengujian dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI).

Penelitian ini dilakukan secara bertahap, yaitu terdiri dari pengujian agregat (kasar dan halus), aspal dan pengujian terhadap campuran (uji Marshall). Pengujian agregat termasuk analisa saringan, pemeriksaan berat jenis, dan penyerapan air. Untuk pengujian aspal pen 60/70 termasuk juga penetrasi, titik nyala-bakar, titik lembek, dan berat jenis.

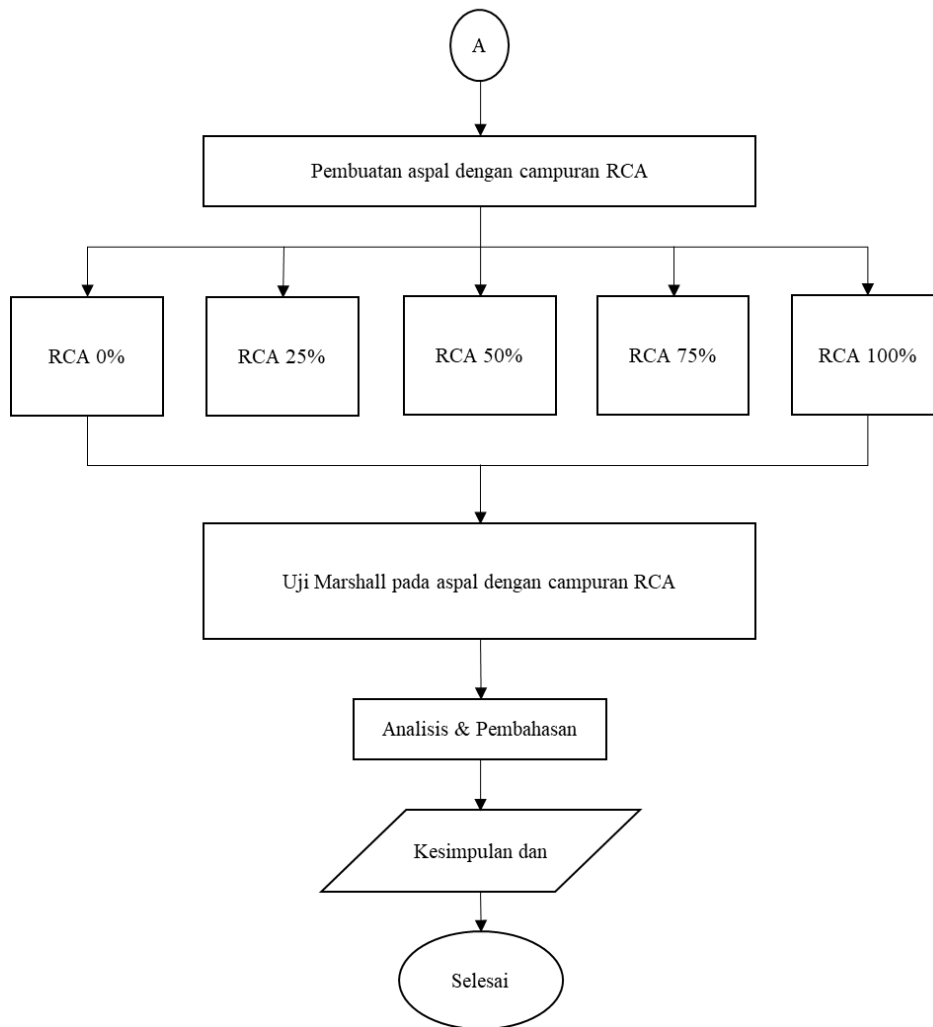
Dalam pengujian Marshall, data akan diperoleh dari beberapa parameter, seperti VIM, VFA, VMA, stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient*. Sampel penelitian diambil pada kadar aspal optimum yaitu antara 4,5%, 5%, 5,5%, hingga 6,5%, dengan menggunakan RCA dengan variasi 25%, 50%, 75%, dan 100% dari total berat campuran.

3.2 Kerangka Penelitian

Pada penelitian ini, terdapat tahapan-tahapan penelitian yang dibuat dalam bentuk kerangka penelitian seperti pada Gambar 3.1, yaitu gambaran urutan kegiatan yang secara analitis digunakan untuk menyampaikan suatu informasi secara berurutan.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

3.3 Persiapan Bahan

Persiapan bahan untuk pelaksanaan penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan guna memastikan kualitas dan karakteristik campuran beraspal yang akan diuji. Bahan-bahan yang diperlukan dalam tahapan persiapan ini meliputi agregat, aspal jenis penetrasi 60/70, dan RCA dengan mutu minimal $f_c'25$. Proses pengambilan bahan material yang akan digunakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Pengambilan Bahan

Gambar 3.2, menunjukkan proses pengambilan agregat secara langsung dari PT. Subur Brother, bahan yang diambil diantaranya: batu split, batu screening, abu batu dan limbah hasil *crushing test* dengan minimal mutu $f_c'25$. Untuk mendapatkan RCA ini, kita mengambil sampel beton bekas, lalu hancurkan dengan palu agar menjadi potongan kerikil yang lebih kecil seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Penghancuran RCA

Gambar 3.2, menunjukkan langkah-langkah dalam persiapan bahan dan penghancuran *Recycled Concrete Aggregate* (RCA). Proses ini dimulai dengan menggunakan mesin *crushing test* untuk membuat retakan besar pada sampel beton bekas. Setelah itu, proses penghancuran dilanjutkan menggunakan palu untuk memastikan RCA mencapai ukuran kerikil yang sesuai. Setelah itu, kita ayak untuk memastikan ukurannya sesuai dengan yang dibutuhkan setiap Bin.

3.4 Pengujian Bahan

Material akan dicampurkan dalam pembuatan sampel uji harus sesuai memenuhi standar dan syarat spesifikasi yang berlaku, maka material tersebut akan dinyatakan baik untuk diaplikasikan. Oleh sebab itu, perlu dilakukan pengujian material terhadap agregat, aspal, dan limbah agregat beton yang telah dipersiapkan. Pengujian pada agregat dan aspal meliputi:

a. Uji analisa saringan agregat

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan ukuran agregat yang lolos saringan No. ½". Sampel uji yang digunakan minimal beratnya 2 kg. Langkah pertama adalah mengeringkan benda uji di dalam oven dengan suhu $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Setelah itu, saringan disusun dengan ukuran terbesar di atas dan terkecil di bawah. Agregat yang telah dikeringkan dimasukkan ke dalam ayakan dan diayak selama 15 menit menggunakan sieve shaker. Kemudian, agregat yang tertahan pada saringan ditimbang dan beratnya dicatat.

b. Uji berat jenis dan penyerapan

Pengujian berat jenis pada agregat halus dilakukan dengan menggunakan uji kerucut, menggunakan benda uji berukuran 1 kg yang sebelumnya direndam hingga mencapai kondisi SSD (*Surface Saturated Dry*). Setelah itu, benda uji tersebut diukur beratnya dengan menggunakan piknometer yang berisi air, lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, untuk pengujian berat jenis dan penyerapan pada agregat kasar, digunakan benda uji berukuran 2 kg. Agregat kasar direndam hingga mencapai kondisi SSD dan diukur berat dalam air dengan menggunakan keranjang kawat seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Berat Jenis Agregat Kasar

Gambar 3.4, merupakan alat yang digunakan untuk menimbang sampel uji dalam air. Selanjutnya, dilakukan penimbangan dan pengeringan di dalam oven pada suhu yang sama dengan pengeringan agregat halus.

c. Keausan.

Pengujian keausan dilakukan menggunakan mesin Abrasi *Los Angeles* yang dapat dilihat pada Gambar 3.5 untuk menghitung persentase keausan pada campuran aspal beton. Dalam pengujian ini, digunakan dua ukuran benda uji dengan gradasi B, yaitu ukuran saringan lolos 3/4" tertahan 1/2" dan ukuran saringan lolos 1/2" tertahan 3/8", masing-masing dengan berat 2,5 kg. Mesin abrasi *Los Angeles* dan proses abrasi dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Proses Abrasi

Gambar 3.5, menunjukan bahwa pengujian melibatkan 11 bola baja yang diputar sebanyak 500 putaran dengan kecepatan 30 rpm hingga 33 rpm. Sebelum pengujian dilakukan, pastikan mesin Abrasi *Los Angeles* telah dikalibrasi dengan baik. Setelah pengujian selesai, benda uji dan bola baja disaring menggunakan saringan No. 12. Benda uji yang tertahan akan dioven dan ditimbang untuk menghitung persentase keausan. Pengujian keausan juga dilakukan pada limbah beton yang akan digunakan sebagai substitusi agregat dalam campuran beraspal.

d. Uji Daktilitas Aspal

Pengujian dimulai dengan mencetak aspal di dalam cetakan daktilitas dan meninggalkannya pada suhu ruang selama 30-40 menit. Kemudian, benda uji direndam di dalam bak perendam selama 85-95 menit. Setelah direndam, benda uji dapat diuji dengan meletakkannya pada daktilometer. Mesin kemudian dijalankan dengan kecepatan 50 rpm per menit hingga benda uji putus, dan pemulurannya dapat dibaca pada saat putus tersebut terjadi.

e. Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal

Pengujian titik nyala dan titik bakar dilakukan untuk mendapatkan informasi pada suhu berapa aspal akan terbakar. Alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah *cleveland pen cup*. Untuk melaksanakan pengujian, benda uji dimasukkan ke dalam cawan *cleveland* hingga mencapai garis batas pengisian. Kemudian, suhu dinaikkan sekitar 14-17°C per menit pada awal pemanasan, dan saat mendekati titik nyala dan titik bakar, digunakan api penguji dengan kenaikan suhu sekitar 2°C. Setiap suhu dicatat pada interval waktu tertentu.

f. Uji Titik Lembek Aspal

Untuk mengetahui titik lembek aspal dan melunak dengan kenaikan suhu di lapangan, dilakukan pengujian titik lembek. Pada pengujian ini, benda uji aspal dituangkan ke dalam dua cincin kuningan. Sebelum dilakukan pemanasan, bejana perendam, peralatan, serta benda uji direndam di air es. Selanjutnya, bejana perendam dipanaskan dengan kenaikan suhu 5°C/menit, dan suhu titik lembek dicatat ketika bola baja yang tertutup oleh aspal jatuh ke pelat dasar.

g. Uji Berat Jenis Aspal

Pengujian ini dilakukan dengan mengisi piknometer dengan benda uji aspal dan air suling hingga mencapai $\frac{3}{4}$ dari volume piknometer, kemudian dicatat beratnya. Selanjutnya, piknometer diisi dengan air suling dan benda uji aspal direndam selama 30 menit bersamaan dengan piknometer yang berisi air. Setelah perendaman selesai, berat benda uji dicatat kembali.

h. Uji Penetrasi Aspal

Pengujian ini dilakukan dengan mengisi cawan hingga batas ketinggian pada cawan, kemudian didiamkan selama 1 hingga 1,5 jam. Setelah itu, benda uji direndam di dalam bak perendam selama 1 hingga 1,5 jam. Selanjutnya, pengujian benda uji dilakukan dengan menggunakan alat penetrometer. Proses pengujian minimal dilakukan sebanyak tiga kali. Hal ini dilakukan agar material yang digunakan memiliki kualitas yang baik dan dapat menghasilkan benda uji aspal yang berkualitas juga.

3.5 Perancangan campuran beraspal

Perancangan campuran beraspal atau *mix design* merupakan rencana yang disusun untuk menentukan campuran beraspal yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji di laboratorium. Perencanaan ini mengacu pada standar Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 mengenai gradasi campuran agregat.

Dengan mempertimbangkan hasil analisis saringan dan persentase lolos, serta kadar aspal yang bervariasi. Data tersebut digunakan untuk menentukan koreksi kadar aspal berdasarkan total campuran, berat agregat, dan berat aspal dari jumlah keseluruhan benda uji sebesar 1200 gram. Proses perancangan campuran beraspal bertujuan untuk menemukan KAO. Nilai KAO yang diperoleh akan dijadikan kadar aspal untuk perancangan pembuatan sampel uji dengan bahan tambah limbah beton dengan proporsi mulai dari 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap berat aspal.

3.6 Benda Uji

Dalam proses pembuatan sampel uji, setiap material pembentuk campuran beraspal harus memenuhi standar yang telah ditetapkan. Pembuatan benda uji dibuat berbentuk silinder dengan ukuran diameter 101,6 mm dengan tinggi sebesar 63,5 mm. Jumlah benda uji yang akan dibuat dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Benda Uji AC-BC Untuk KAO

No	Kadar Aspal	Kode Benda Uji	Jumlah
1.	4,5%	A1, A2, A3, A4, A5	5 bh
2.	5,0%	A6, A7, A8, A9, NA10	5 bh
3.	5,5%	A11, A12, A13, A14, A15	5 bh
4.	6,0%	A16, A17, A18, A19, A20	5 bh
5.	6,5%	A21, A22, A23, A24, A25	5 bh

Tabel 3.1 menunjukkan kadar aspal rencana yang akan digunakan dalam menentukan KAO adalah 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%. Dalam penelitian ini sampe uji yang akan dibuat masing-masing 5 benda uji. Setelah mendapatkan KAO dilanjutkan pembuatan benda uji dengan substitusi RCA. Benda uji yang dibutuhkan dalam penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Benda uji AC-BC dengan RCA

No	Kadar Aspal	Kode Benda Uji	Jumlah
1.	0%	RCA1, RCA 2, RCA 3 RCA4, RCA5	5 bh
2.	25%	RCA6, RCA7, RCA, RCA9, RCA10	5 bh
3.	50%	RCA11, RCA12, RCA13, RCA14, RCA15	5 bh
4.	75%	RCA16, RCA17, RCA18, RCA19, RCA20	5 bh
5.	100%	RCA21, RCA22, RCA23, RCA24, RCA25	5 bh

Tabel 3.2 menunjukkan lima variasi kadar RCA yaitu, 0%, 25%, 50%, 75% dan 100% dengan menggunakan kode benda uji RCA1 hingga RCA25, RCA yang berarti *Recyced Concrete Aggregate*. Setiap kadar aspal diuji dengan menggunakan lima benda uji yang berbeda. Jumlah benda uji yang digunakan untuk setiap kadar aspal adalah 5 buah dengan total benda uji dalam penelitian ini adalah 25 buah.

3.7 Pengujian Benda Uji

Dalam penelitian ini, pengujian sampel uji dilakukan menggunakan metode Marshall. Pengujian dengan metode Marshall melibatkan lima benda uji sebagai sampel campuran beraspal yang dibuat dengan kadar aspal yang berbeda. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan kadar aspal optimum (KAO) dan pengaruh karakteristik Marshall terhadap setiap penambahan kadar aspal dan kadar RCA yang terjadi dalam campuran tersebut. Pengujian ini meliputi perendaman benda uji seperti pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Proses Pengujian Marshall

Gambar 3.6, menunjukkan bahwa benda uji dilakukan perendaman dalam *waterbath* selama 30 menit pada suhu 60°C. Setelah itu, dilakukan pengujian dengan mesin Marshall yang akan menghasilkan nilai stabilitas dan *flow*. Kemudian dilakukan pengujian berat jenis maksimum (G_{mm}) untuk memperoleh nilai VMA, VIM, dan VFA. Pengujian berat jenis maksimum (G_{mm}) pada dasarnya adalah perbandingan berat suatu benda pada suhu 25°C terhadap berat air pada volume dan temperatur yang sama. Proses pengujian ini mengacu pada standar SNI 6893- 2002 dengan prinsip pengukuran berat dan volume dari benda uji. Tujuannya adalah untuk menentukan nilai berat jenis maksimum dari campuran beraspal. Proses pengujian G_{mm} pada campuran beraspal dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Pengujian Berat Jenis Maksimum

Gambar 3.7 menggambarkan proses pengujian G_{mm} yang melibatkan langkah penghilangan butiran udara yang terperangkap pada benda uji. Hal ini

dilakukan dengan menggunakan mesin pompa untuk menghisap udara yang melekat pada benda uji. Proses ini memiliki peran penting dalam memastikan bahwa campuran beraspal memiliki kualitas dan karakteristik yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

3.8 Penyajian Hasil dan Analisis

Penyajian hasil dan analisis data dalam studi eksperimental mengenai penggunaan RCA sebagai pengganti agregat pada campuran beraspal melibatkan beberapa tahapan pembahasan. Pertama, dilakukan pengujian bahan aspal dan agregat untuk menentukan nilai material terhadap spesifikasi yang digunakan. Selanjutnya, dilakukan pengujian keausan pada RCA dengan metode *Los Angeles Abrasion Test* untuk mendapatkan nilai ketahanan agregat.

Dalam penelitian ini, akan digunakan beberapa kadar aspal rencana, yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%. Kadar aspal rencana tersebut akan menjadi acuan dalam pembuatan sampel benda uji. Selanjutnya, benda uji akan diuji menggunakan metode Marshall untuk mendapatkan nilai KAO, yang nantinya akan digunakan dalam pembuatan benda uji dengan penambahan RCA.

Dari hasil pengujian, data akan diolah dan disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara kadar aspal dan parameter Marshall seperti stabilitas, *flow*, MQ VIM, VMA, dan VFA. Pengolahan data ini bertujuan untuk mencari persamaan garis atau kurva yang mewakili hubungan yang dicari. Dari interpretasi data dan analisis yang dilakukan, akan ditarik kesimpulan dan jawaban atas pertanyaan penelitian ini.

BAB 4

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Bahan

Pengujian material pada campuran beraspal menggunakan metode SNI (Standar Nasional Indonesia) serta spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018. Sebagian besar volume dari campuran beraspal terdiri dari sifat-sifat fisis material penyusun campuran beraspal yang terdiri dari aspal, agregat kasar dan halus, RCA serta pemeriksaan terhadap nilai parameter Marshall.

4.1.1 Analisis Pengujian Aspal

Pengujian aspal harus sesuai dengan persyaratan yang tercantum dalam Standar Nasional Indonesia (SNI). Hasil pengujian laboratorium terhadap sifat fisik aspal jenis penetrasi 60/70 telah dilakukan, termasuk pengujian berat jenis, penetrasi, titik lembek, dan daktilitas. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Aspal

Pengujian Aspal	Standar	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Penetrasi	SNI 2456-1991	60-70	66,00	Memenuhi
Berat Jenis	SNI 2441-2011	> 1,0	1,03	Memenuhi
Titik Nyala (°C)	SNI 2434-2011	> 232	364	Memenuhi
Titik lembek (°C)		> 48	48,8	Memenuhi
Daktilitas 25°C, (cm)	SNI 2432-1991	> 100	150	Memenuhi

Tabel 4.1, menampilkan hasil pengujian aspal dengan nilai penetrasi sebesar 66, nilai tersebut masih berada dalam kisaran yang disyaratkan, yakni 60-70. Dalam pengujian berat jenis, ditemukan nilai sebesar 1,03. Sementara itu, pengujian titik nyala menunjukkan angka sebesar 364°C, yang juga memenuhi batas minimal sebesar 232°C. Hasil pengujian titik lembek menunjukkan nilai sebesar 48,8°C dari

nilai persyaratan minimal 48°C. Selanjutnya, pengujian daktilitas pada suhu 25°C menunjukkan nilai sebesar 150 cm, juga memenuhi batas minimal yang ditetapkan yaitu 100 cm. Berdasarkan hasil-hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa aspal tipe penetrasi 60/70 telah memenuhi persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018.

4.1.2 Analisis Pengujian Agregat

Pada tahap analisis pengujian ini dilakukan dalam berbagai parameter, untuk mengetahui kualitas dari agregat yang akan digunakan. Pengujian yang dilakukan mencakup pengujian berat jenis dan penyerapan pada agregat. Hasil pengujian untuk agregat kasar dan halus terkait berat jenis serta penyerapan dapat dilihat dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian Agregat	Standar	Spesifikasi	Hasil		Keterangan
			Agregat Kasar	Agregat Halus	
			Berat jenis (<i>bulk</i>)	Min. 2,5 gr/cm ³	
Berat jenis (SSD)		Min. 2,5 gr/cm ³	2,685	2,774	Memenuhi
Berat jenis semu (<i>apparent</i>)	SNI-1969-2016	Min. 2,5 gr/cm ³	2,787	2,712	Memenuhi
Penyerapan		Maks. 3%	2,164	2,302	Memenuhi

Tabel 4.2 menunjukan bahwa agregat telah memenuhi persyaratan spesifikasi. Dari hasil pengujian berat jenis curah (*bulk*) pada agregat kasar menunjukkan nilai sebesar 2,628 gr/cm³, sedangkan agregat halus memiliki nilai sebesar 2,55 gr/cm³, dimana nilai minimal yang diharuskan adalah minimal 2,5 gr/cm³. Selanjutnya, hasil pengujian berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) pada agregat kasar menunjukkan nilai sebesar 2,685 gr/cm³, sementara agregat halus memiliki nilai sebesar 2,774 gr/cm³, yang juga memenuhi nilai minimal yang diharuskan. Pengujian berat jenis semu (*apparent*) pada agregat kasar

menghasilkan nilai sebesar 2,787 gr/cm³, sedangkan agregat halus memiliki nilai sebesar 2,712 gr/cm³, yang juga memenuhi persyaratan minimal. Untuk hasil pengujian penyerapan pada agregat kasar menunjukkan nilai sebesar 2,164%, sementara agregat halus memiliki nilai sebesar 2,302%, dimana nilai yang diharuskan adalah maksimal 3%.

Selain pengujian berat jenis dan penyerapan pada agregat, pengujian keausan juga dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan pada agregat. Pengujian keausan merupakan langkah penting dalam mengevaluasi kemampuan agregat untuk menahan beban dan deformasi akibat tekanan yang diakibatkan oleh lalu lintas kendaraan. Pengujian keausan ini dilakukan pada agregat dan juga RCA dengan data uji yang disajikan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Keausan Agregat dan RCA

Material	Standar	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
Agregat	SNI-2417-2008	Maks. 40%	16,67	Memenuhi
RCA			38,24	Memenuhi

Tabel 4.3 menunjukkan data hasil pengujian abrasi *Los Angeles*, diperoleh persentase abrasi untuk agregat memiliki tingkat abrasi sebesar 16,67% sedangkan RCA memiliki tingkat abrasi sebesar 38,24%. Dengan demikian, RCA memiliki tingkat abrasi yang lebih tinggi daripada agregat, yang menunjukkan bahwa RCA cenderung lebih mudah terkikis dan aus akibat gaya tumbukan selama proses pengujian abrasi. Hal ini disebabkan oleh karakteristik fisik dan mekanik yang berbeda antara agregat dan RCA. Dalam spesifikasi maksimum yang ditetapkan untuk tingkat nilai abrasi *Los Angeles* sebesar 40%, sehingga agregat dan RCA sudah memenuhi persyaratan karena memiliki persentase abrasi di bawah batas maksimum yang ditetapkan.

4.1.3 Analisis Saringan

Pada tahap pembuatan campuran beraspal, penting untuk melakukan analisis saringan agregat guna menentukan komposisi yang tepat. Analisis ini bertujuan untuk memperoleh gradasi agregat yang sesuai dengan persyaratan material campuran beraspal. Hasil pengujian analisis saringan tersebut dapat ditemukan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Presentase Lolos Agregat Kasar dan Halus

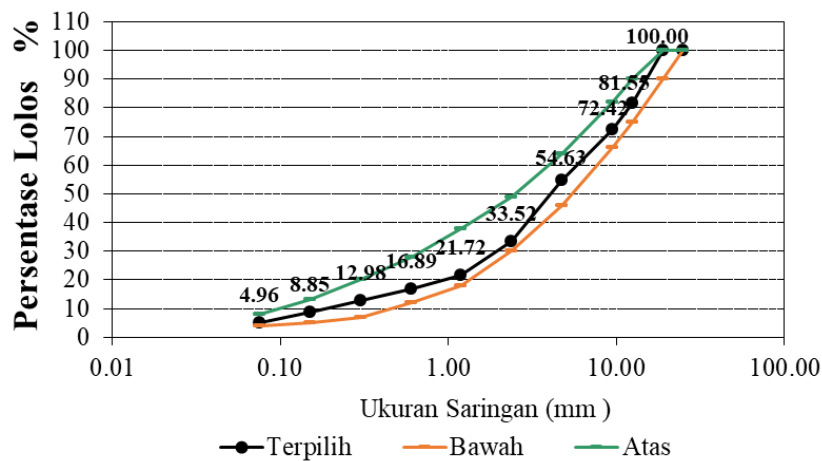
No Saringan	Ukuran Saringan (mm)	Persentase Lolos				Spesifikasi Bina Marga Terpilih 2018	
		Bin 1	Bin 2	Bin 3	Bin 4		
1"	25,00	100	100	100	100	100	100
3/4"	19,00	100	100	100	100	90-100	100
1/2"	12,50	48,74	100	100	100	75-90	81,55
3/8"	9,50	23,40	100	100	100	66-82	72,42
4	4,75	3,13	25,04	100	100	46-64	54,63
8	2,36	0,13	0,40	7,90	100	30-49	33,52
16	1,18	0,07	0,06	0,30	67,60	18-38	21,72
30	0,60	0,05	0,05	0,21	52,59	12-28	16,89
50	0,300	0,04	0,04	0,15	40,41	7-20	12,98
100	0,150	0,02	0,01	0,08	27,59	5-13	8,85
200	0,075	0,004	0,008	0,015	15,50	4-8	4,96
						Bin 1	36%
						Bin 2	14%
						Bin 3	18%
						Bin 4	32%
						Total	100%

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa agregat telah mencapai persyaratan untuk semua ukuran saringan, persentase terpilih berada dalam kisaran yang telah ditentukan dalam spesifikasi. Persentase lolos terpilih didapatkan dengan cara trial dan error pada persentase fraksi agregat yang akan digunakan dalam campuran. Trial dan error dilakukan hingga persentase lolos yang didapatkan berada pada

rentang yang sudah dipersyaratkan oleh Bina Marga 2018. Secara rinci, persentase lolos agregat pada Bin 1 adalah 36%, pada Bin 2 adalah 14%, pada Bin 3 adalah 18%, dan pada Bin 4 adalah 32%. Total persentase lolos agregat dari keempat Bin tersebut mencapai 100%. Oleh karena itu, gradasi tersebut dapat digunakan dengan baik sebagai bahan untuk pembuatan campuran beraspal. Berikut adalah contoh perhitungan persentase agregat terpilih pada saringan berdasarkan persamaan 2-1.

$$\begin{aligned} \text{Terpilih saringan } 1/2 &= (48,74 \times 36\%) + (100 \times 14\%) + (100 \times 18\%) + (100 \times 32\%) \\ &= 81,55\% \end{aligned}$$

Grafik presentase terpilih yang akan digunakan dalam campuran aspal dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Grafik Gradasi Agregat untuk Benda Uji

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa plot data yang diperoleh, nilai agregat terpilih berada di antara titik kontrol atas dan bawah hal ini menunjukkan bahwa gradasi agregat memenuhi batas yang ditentukan pada kedua titik kontrol tersebut. Jenis gradasi yang dihasilkan merupakan gradasi rapat atau gradasi baik. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa gradasi agregat telah sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan dalam spesifikasi.

4.2 Perancangan Campuran Beraspal

Dari hasil analisis agregat, dilakukan perancangan campuran beraspal. Proses ini dimulai dengan mencampurkan komposisi kadar aspal untuk mendapatkan persentase kadar aspal terhadap total campuran benda uji, serta fraksi agregat yang lolos ukuran 1" dan tertahan pada ukuran tertentu. Hasil dari perencanaan komposisi 2 ini dapat dilihat dalam Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Perancangan Komposisi 2

Material	Berat Jenis		Komposisi 2				
	Aspal	Bulk					
Kadar Aspal (%)	-	4,5	5	5,5	6	6,5	
Lolos 3/4"			18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
Tertahan 1/2"							
Lolos 3/8"		2,64					
Tertahan No. 4	1,06		26,92	26,92	26,92	26,92	26,92
Lolos No.4							
Tertahan No. 8			21,11	21,11	21,11	21,11	21,11
Lolos No. 8		2,58					
Tertahan Pan			33,52	33,52	33,52	33,52	33,52
Total			104,5	105,00	105,50	106,00	109,66

Pada perancangan campuran beraspal, dicantumkan data berat jenis aspal dan berat jenis agregat dari pengujian sebelumnya. Dalam hal ini, terdapat dua jenis perancangan campuran yang akan dihitung. Campuran pertama merupakan campuran yang akan digunakan dalam campuran beraspal, menghasilkan kadar aspal dan kadar agregat sebenarnya. Berikut adalah contoh perhitungan komposisi II dengan persamaan 2.2, 2.3, 2.4, 2.5.

$$\text{Fraksi Bin 1} = 100 - 81,55 = 18,45\%$$

$$\text{Fraksi Bin 2} = 81,55 - 54,63 = 26,92\%$$

$$\text{Fraksi Bin 3} = 54,63 - 21,72 = 21,11\%$$

$$\text{Fraksi Bin 4} = 33,52\%$$

Sedangkan campuran kedua menggunakan kadar aspal rencana dan dihitung untuk mendapatkan perencanaan komposisi 1. Seluruh komposisi campuran benda uji memiliki total persentase sebesar 100%. Hasil dari perencanaan komposisi 1 ini dapat dilihat dalam Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perancangan Komposisi 1

Material	Berat Jenis		Komposisi 1				
	Aspal	Bulk					
Kadar Aspal (%)	-		4,31	4,76	5,21	5,66	6,10
Lolos 3/4"			17,66	17,57	17,49	17,41	16,83
Tertahan 1/2"							
Lolos 3/8"		2,64					
Tertahan No. 4	1,06		25,76	25,63	25,51	25,39	24,54
Lolos No.4							
Tertahan No. 8			20,20	20,10	20,01	19,91	19,25
Lolos No. 8		2,58					
Tertahan Pan			32,08	31,93	31,78	31,63	31,48
Total			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabel 4.6 menunjukkan perancangan campuran beraspal, terdapat data kadar aspal terhadap batuan dan fraksi lolos $\frac{3}{4}$ hingga tertahan pan dalam persen. Berikut adalah contoh perhitungan yang digunakan untuk kadar aspal 4,5% menggunakan persamaan 2.6 dan 2.7.

$$\text{Fraksi Lolos Bin n} = \frac{18,45 \times 100}{104,5} = 17,66\%$$

$$\text{Kadar Aspal} = 100 - 95,69 = 4,31\%$$

Setelah mendapatkan persentase aspal dan agregat yang akan digunakan, langkah selanjutnya adalah menghitung kebutuhan berat agregat dan aspal dalam gram berdasarkan berat total campuran untuk 1 benda uji yang sebesar 1200 gr. Hasil pembagian berat agregat dan aspal dapat ditemukan dalam Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Berat Agregat Kumulatif

Material	Kadar Aspal Terhadap Campuran (%)				
	4,5	5,0	5,5	6	6,5
Kadar Aspal Terhadap Batuan (%)	4,31	4,76	5,21	5,66	6,10
Berat Aspal (gram)	51,67	57,14	62,56	67,92	73,24
Berat Agregat (gram)	1148,33	1142,86	1137,44	1132,08	1126,76
Berat Benda Uji	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Contoh perhitungan berat kebutuhan material agregat dan aspal untuk kadar 4,5 % adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Berat Aspal} &= \frac{\text{Kadar Aspal} \times 1200}{100} \\ &= \frac{4,31 \times 1200}{100} \\ &= 51,67 \text{ gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat Agregat} &= 1200 - \text{Berat Aspal} \\ &= 1200 - 51,67 \\ &= 1148,33 \text{ gram} \end{aligned}$$

Tabel 4.7 memperlihatkan perhitungan berat agregat dan aspal yang diperlukan untuk menghasilkan 1 benda uji, diukur dalam gram, dengan berbagai kadar aspal yang berbeda. Pada kadar aspal 4,5%, digunakan 51,67 gram aspal dan 1148,33 gram agregat. Kadar aspal 5% menggunakan 57,14 gram aspal dan 1142,86 gram agregat. Pada kadar aspal 5,5%, terpakai 62,56 gram aspal dan 1137,44 gram

agregat. Selanjutnya, pada kadar aspal 6%, digunakan 67,92 gram aspal dan 1132,08 gram agregat. Lalu, pada kadar aspal 6,5%, digunakan 72,24 gram aspal dan 1126,76 gram agregat. Berat kumulatif aspal dan agregat ini digunakan untuk membuat campuran beraspal. Perhitungan perancangan campuran dilakukan untuk pembuatan benda uji yang akan dilakukan pengujian Marshall untuk mendapatkan KAO.

4.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal

Pengujian berat jenis campuran beraspal dilakukan pada benda uji sebelum penumbukan terhadap 10 sampel dari 5 kadar aspal rencana. Pengujian dilakukan untuk mengetahui nilai berat jenis maksimum campuran beraspal yang tidak dipadatkan. Data hasil pengujian berat jenis maksimum pada campuran beraspal dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Data GMM Campuran Beraspal

Kadar Aspal (%)	Sampel Uji	A (gr)	B (gr)	D (gr)	E (gr)	Gmm gr/cm ³	Rata-rata gr/cm ³
4,5%	1	501	2493,7	2237,6	2534,1	2,450	2,459
	2	500	2502,2	2241,4	2538,8	2,468	
5%	1	500	2506,5	2236,5	2515,7	2,264	2,364
	2	500	2376,8	2243,8	2540,8	2,463	
5,5%	1	500	2474,6	2234,9	2515,3	2,77	2,356
	2	500	2525,5	2233,5	2528,1	2,434	
6%	1	500	2508,2	2240,4	2521,6	2,285	2,348
	2	500	2494,2	2239,7	2532,3	2,411	
6,5%	1	500	2503,3	2243,7	2520,2	2,237	2,332
	2	500	2506,8	2242,2	2536,2	2,427	

Tabel 4.8 menunjukkan data pengujian yang akan dihitung untuk memperoleh hasil berat jenis maksimum. Contoh perhitungan dilakukan dengan persamaan 2.14 pada kadar 4,5% sebagai berikut.

$$G_{\text{mm}} \text{ sampel 1} = \frac{501}{501 + 2237,6 - 2534,1} = 2,450 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{\text{mm}} \text{ sampel 2} = \frac{500}{501 + 2241,4 - 2538,8} = 2,468 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{2,450 + 2,468}{2} = 2,459 \text{ gr/cm}^3$$

Tabel 4.8 menunjukkan data hasil pengujian untuk menentukan nilai berat jenis maksimum. Untuk rata-rata berat pada kadar aspal 4,5% adalah sebesar 2,459 gr/cm³. Pada kadar aspal 5%, rata-rata berat jenis maksimum sebesar 2,364 gr/cm³. Pada kadar aspal 5,5%, rata-rata berat jenis maksimum mencapai sebesar 2,358 gr/cm³. Sementara pada kadar aspal 6%, ditemukan bahwa rata-rata berat jenis maksimum adalah 2,384 gr/cm³, dan pada kadar aspal 6,5% tercatat bahwa rata-rata berat jenis maksimum mencapai 2,32 gr/cm³. Selanjutnya data pengujian ini akan digunakan dalam mencari nilai VIM, VMA, dan VFA.

4.4 Hasil Pengujian Marshall Campuran Beraspal

Proses pengujian Marshall diawali setelah tahap pembuatan benda uji dengan komposisi kadar aspal yang telah direncanakan sebelumnya. Semua data hasil pengujian merupakan bagian dari karakteristik campuran beraspal yang akan membantu dalam mencari KAO dalam campuran tersebut. Karakteristik Marshall, termasuk parameter stabilitas, *flow*, MQ, VIM, VFA, dan VMA, dapat ditemukan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Marshall Terhadap Kadar Aspal

Kode Benda Uji	Sampel	A (%)	B (%)	C (gram)	D (gram)	E (gram)	F (cm ³)	G (gram/mm ³)	H (gram/cm ³)	VIM (%)	VMA (%)	VFA (%)	O (div)	P (kg/div)	Q (Kg)	R (mm)	S (kg/mm)
NA-4,5%	1	4,5	4,31	1186	1196	660,3	535,7	2,214		9,963	15,945	37,518	73	1155,12	1108,91	4	277,23
	2			1187	1190	666,1	523,9	2,266		7,857	13,979	43,795	54	854,47	820,29	6	136,71
	3			1187	1192	678,8	513,2	2,313		5,936	12,186	51,288	64	1012,70	972,20	7	138,89
	4			1185	1199	670,0	529,0	2,240		8,899	14,952	40,482	55	870,29	835,48	4	208,87
	5			1185	1190	651,7	538,3	2,201		10,473	16,421	36,223	51	807,00	750,51	4	187,63
Rata-rata								2,247	2,459	8,626	14,697	41,861	59,4	939,92	897,48	5,00	189,86
NA-5,0%	1	5	4,76	1181	1197	660,4	536,6	2,201		6,891	16,877	59,172	63	996,88	927,10	6	154,52
	2			1184	1199	673,0	526,0	2,251		4,773	14,987	68,152	73	1155,12	1108,91	4	277,23
	3			1172	1189	661,8	527,2	2,223		5,953	16,040	62,888	54	854,47	820,29	4	205,07
	4			1201	1200	674,2	525,8	2,284		3,369	13,733	75,468	68	1076,00	1032,96	5	206,59
	5			1199	1193	678,4	514,6	2,330		1,430	12,002	88,083	70	1107,64	1107,64	5	221,53
Rata-rata							2,258	2,364	4,483	14,728	70,753	65,6	1038,02	999,38	4,80	212,99	
NA-5,5%	1	5,5	5,21	1195	1207	678,6	528,4	2,262		3,992	15,036	73,453	72	1139,29	1093,72	5	218,74
	2			1170	1189	666,4	522,6	2,239		4,957	15,890	68,805	52	822,82	822,82	4	205,71
	3			1164	1177	661,8	515,2	2,259		4,086	15,120	72,974	67	1060,17	1060,17	4	265,04
	4			1184	1198	678,8	519,2	2,280		3,190	14,327	77,735	59	933,59	933,59	3	311,20
	5			1189	1210	678,9	531,1	2,239		4,959	15,892	68,794	66	1044,35	1002,58	4	250,64
Rata-rata							2,256	2,356	4,237	15,253	72,352	61	1000,04	982,58	4,00	250,27	
NA-6,0% %	1	6	5,66	1179	1191	671,2	519,8	2,268		3,399	15,238	77,691	67	1060,17	1060,17	4	265,04
	2			1193	1195	678,1	516,9	2,308		1,704	13,750	87,608	66	1044,35	1002,58	5	200,52
	3			1183	1198	669,6	528,4	2,239		4,649	16,334	71,537	65	1028,53	987,39	5	197,48
	4			1188	1199	666,2	532,8	2,230		5,037	16,675	69,793	68	1076,00	1032,96	3	344,32
	5			1194	1200	674,3	525,7	2,271		3,268	15,123	78,388	61	965,23	926,62	3	308,87
Rata-rata							2,263	2,348	3,612	15,424	77,004	75,4	1034,86	1001,94	4,00	263,25	
NA-6,5%	1	6,5	6,10	1189	1199	679,6	519,4	2,289		1,843	14,908	87,638	89	1408,29	1351,96	5	270,39
	2			1190	1200	678,8	521,2	2,283		2,100	15,130	86,123	85	1345,00	1291,20	5	258,24
	3			1191	1200	677,2	522,8	2,278		2,317	15,319	84,873	83	1313,35	1221,42	5	244,28
	4			1183	1195	671,2	523,8	2,258		3,159	16,048	80,318	90	1424,11	1367,15	4	341,79
	5			1187	1199	669,9	529,1	2,243		3,805	16,608	77,093	81	1281,70	1230,43	5	246,09
Rata-rata							2,270	2,332	2,645	15,603	83,209	80,8	1354,49	1292,43	4,80	272,16	

Tabel 4.9 merupakan perhitungan dari kelima kadar aspal yang berbeda dengan masing-masing kadar terdapat 5 benda uji. Data untuk mendapatkan KAO dari campuran beraspal diperoleh dari hasil pengujian Marshall dan berat jenis campuran maksimum pada Tabel 4.7. Contoh perhitungan pada 1 benda uji dengan kadar aspal 4,5% menggunakan persamaan 2.13, 2.14, 2.16, 2.17, 2.18, dan 2.19.

$$\text{Stabilitas} = 73 \times 15,823 \times 0,09 = 1108,91 \text{ Kg}$$

$$\text{Flow} = 4 \text{ mm}$$

$$F = D - E = 1196 - 660,3 = 535,7 \text{ gr}$$

$$I = \frac{C}{F} = \frac{1186}{660,3} = 2,214 \text{ gr/mm}^3$$

$$G_{sb} = \frac{36\%+14\%+18\%+32\%}{\frac{36\%}{2,638} + \frac{14\%}{2,638} + \frac{18\%}{2,609} + \frac{32\%}{2,302}} = 2,515 \text{ gr/cm}^3$$

$$MQ = \frac{1108,91}{4} = 277,23 \text{ Kg/mm}$$

$$\% \text{ VIM} = \frac{100 (2,459 - 2,214)}{2,459} = 9,963 \%$$

$$\% \text{ VMA} = \frac{100 - 2,14(100 - 4,5)}{2,515} = 15,945 \%$$

$$\% \text{ VFA} = \frac{100 (15,945 - 9,963)}{15,945} = 37,518 \%$$

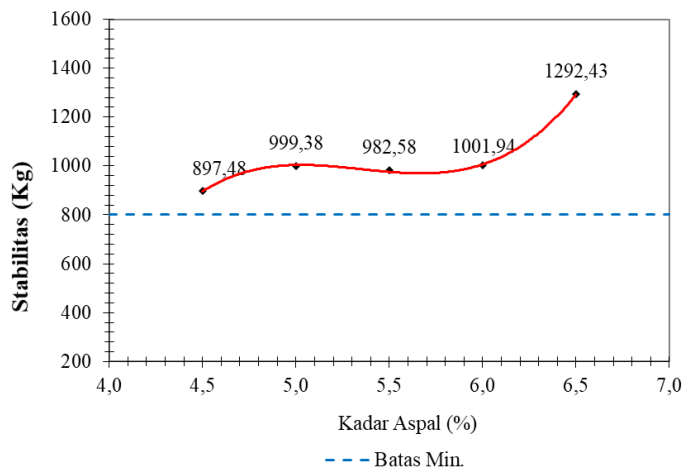
Setelah berhasil mengumpulkan data karakteristik dari pengujian yang dilakukan pada kelima kadar aspal yang berbeda pada benda uji, langkah berikutnya adalah menghitung nilai rata-rata dari hasil pengujian tersebut pada masing-masing kadar aspal. Setelah nilai rata-rata berhasil dihitung, hasil pengujian tersebut akan disusun dalam bentuk rekapitulasi. Rekapitulasi hasil pengujian ini akan dijelaskan secara rinci pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall Untuk Menentukan KAO

Karakteristik campuran	Spesifikasi Bina Marga (2018)	Kadar Aspal (%)				
		4,5	5	5,5	6	6,5
Stabilitas (Kg)	Min. 800	897,48	999,38	982,58	1001,94	1292,43
Flow (mm)	2-4	5,00	4,80	4,00	4,00	4,80
MQ (kg/mm)	Min. 250	189,86	212,99	250,27	263,25	272,16
VIM (%)	3-5	8,626	4,483	4,059	3,449	2,645
VFA (%)	Min. 65	41,86	70,75	73,51	78,04	83,21
VMA (%)	Min. 14	14,70	14,73	15,25	15,42	15,60

Tabel 4.10 menunjukkan rekapitulasi dari hasil pengujian Marshall dengan beberapa parameter penentu KAO. Dari tabel tersebut, terlihat bahwa pada kadar 5,5% dan 6%, campuran sudah memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Sementara itu, pada kadar 4,5%, 5% dan 6,5%, campuran belum memenuhi semua kriteria yang ditetapkan. Katidaksesuaian tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan nilai VIM pada kadar 4,5% dan 6,5% yang melebihi nilai pada rentang 3-6% dengan nilai sebesar 8,626% dan 2,645%, selain itu nilai VFA pada kadar 4,5% kurang dari minimal 65% dengan nilai sebesar 41,86%, selanjutnya nilai *flow* pada kadar 4,5%, 5%, dan 6,5% yang melebihi nilai pada kisaran 2-4 mm dan nilai MQ pada kadar 4,5% dan 5% berada di bawah batas minimal syarat 250 kg/mm.

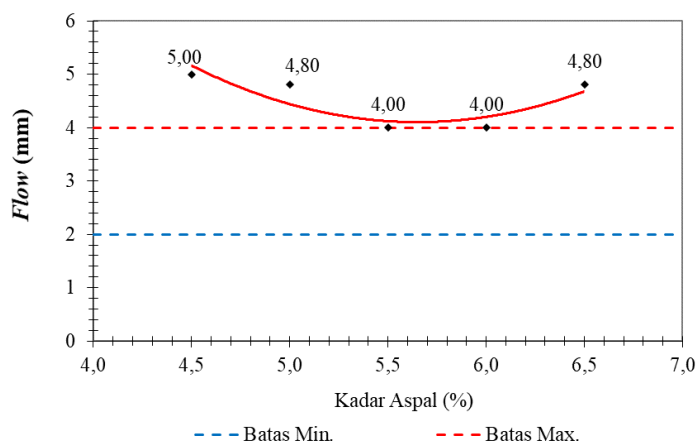
Dari Tabel 4.10 terdapat nilai-nilai yang kemudian dijadikan grafik untuk menggambarkan hubungannya dengan variasi kadar aspal. Setiap karakteristik aspal pada kadar aspal yang berbeda dibuat grafik hubungan antara kadar aspal dengan nilai stabilitas, *flow*, MQ, VFA, VIM, dan VMA. Grafik yang menggambarkan hubungan antara nilai stabilitas dengan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan Stabilitas

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa nilai stabilitas campuran beraspal meningkat seiring dengan peningkatan persentase kadar aspal. Stabilitas campuran dipengaruhi oleh kepadatan campuran, dimana semakin tinggi kepadatan, maka nilai stabilitas juga meningkat. Seluruh benda uji dengan kadar aspal 4,5%, 5%, 5,5%, 6% dan 6,5% memenuhi syarat nilai stabilitas yang telah ditentukan yaitu >800 kg.

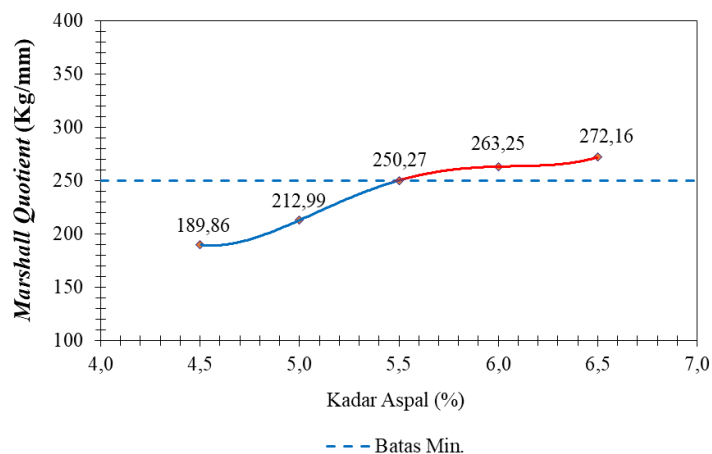
Gambar 4.3 menyajikan grafik hubungan antara *flow* dan kadar aspal dalam campuran beraspal.



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan *Flow*

Gambar 4.3 terlihat bahwa terjadi peningkatan nilai *flow* pada kadar aspal 4,5%, 5%, dan 6,5%. Penyebab dari peningkatan ini adalah karena adanya peningkatan jumlah aspal dalam campuran, sehingga campuran menjadi lebih lembut dan lebih mudah mengalami deformasi plastis ketika dikenakan tekanan. Akan tetapi pada kadar aspal 5,5% dan 6%, nilai *flow* telah memenuhi spesifikasi yang ditetapkan.

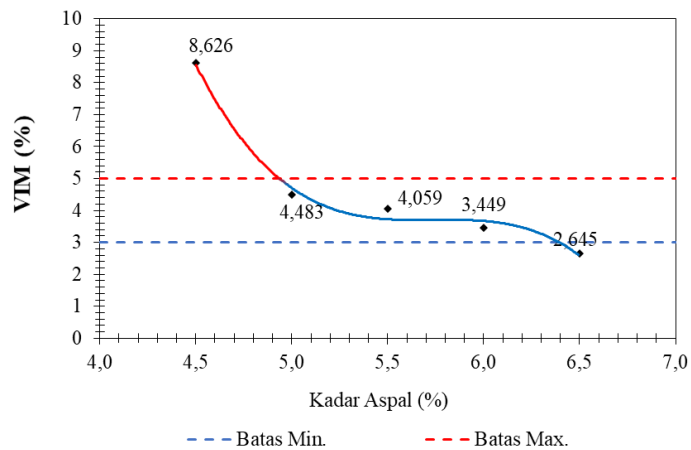
Selain itu, Gambar 4.4 merupakan grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar aspal dan *flow* campuran beraspal.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan MQ

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa pada kadar aspal 5,5%, 6%, dan 6,5% terjadi peningkatan nilai MQ. Penambahan kadar aspal dapat menyebabkan *over-asphalted*, yaitu campuran beraspal yang mengandung aspal berlebihan. Kelebihan aspal ini dapat mengurangi kekuatan ikatan antara agregat dan aspal, serta mengurangi kepadatan campuran. Peningkatan nilai MQ menandakan bahwa campuran beraspal memiliki kekuatan terhadap deformasi yang lebih baik.

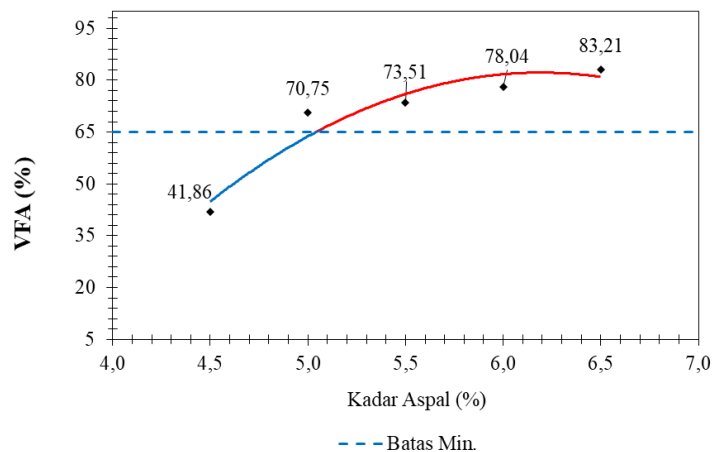
Gambar 4.5 juga terdapat grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan VIM.



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VIM

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa nilai VIM cenderung menurun seiring dengan peningkatan kadar aspal dalam campuran. Pada kadar aspal sebesar 4,5%, nilai VIM melebihi batas yang ditetapkan yaitu 3-5% dan tidak memenuhi spesifikasi. Peningkatan VIM bisa menandakan kurangnya ruang kosong di antara agregat dalam campuran, karena aspal tidak mencukup untuk mengisi seluruh volume campuran

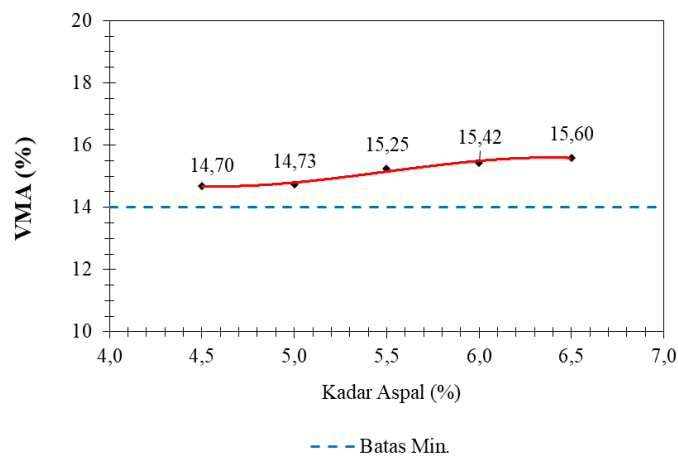
Selanjutnya, pada Gambar 4.6 juga terdapat grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan VFA.



Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VFA

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa persentase VFA paling rendah saat kadar aspal mencapai 4,5%, dan meningkat ketika kadar aspal berada dalam rentang 5% hingga 6,5%, yang masih sesuai dengan spesifikasi. Perubahan ini disebabkan oleh peningkatan jumlah aspal dalam campuran, sehingga pori-pori dalam campuran lebih banyak terisi oleh aspal.

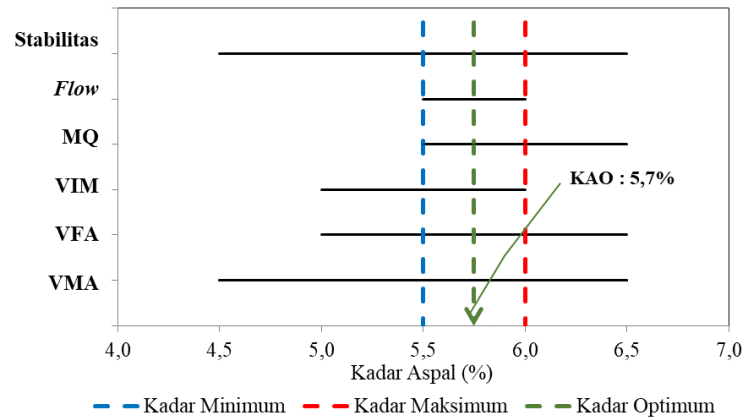
Terakhir merupakan grafik hubungan antara kadar aspal dan VMA dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Kadar Aspal dengan VMA

Gambar 4.7 terlihat bahwa pada berbagai kadar aspal, seperti 4,5%, 5%, 5,5%, 6% dan 6,5%, telah melewati batas minimal yang ditetapkan sebesar 14%. Perubahan ini terjadi seiring dengan peningkatan kadar aspal, yang mengakibatkan pengurangan ruang udara di dalam campuran karena adanya peningkatan pengisian oleh aspal. Semakin banyak aspal yang hadir dalam campuran, semakin sedikit rongga udara yang tersedia diantara partikel agregat. Dengan demikian, hasil grafik yang mempresentasikan nilai VMA pada berbagai kadar aspal menunjukkan bahwa nilai tersebut telah memenuhi spesifikasi.

Dari keseluruhan hasil pengujian pada parameter Marshall dalam menentukan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat ditemukan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Penentuan KAO

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa tidak semua kadar aspal pada benda uji memenuhi semua parameter yang telah ditetapkan. Untuk menentukan nilai KAO, nilai yang memenuhi persyaratan spesifikasi diidentifikasi, dengan kadar aspal minimum adalah 5,5% dan kadar aspal maksimum adalah 6%. Dari data tersebut, diperoleh nilai rata-rata KAO sebesar 5,7%. Sehingga, kadar aspal 5,7% dipilih sebagai kondisi optimal untuk pencampuran beraspal dengan tambahan RCA.

4.5 Hasil dan Analisis Pengujian Campuran Beraspal dengan RCA

Setelah nilai KAO berhasil ditentukan, selanjutnya dilakukan perancangan campuran dengan melakukan substitusi terhadap material agregat dan RCA sesuai dengan proporsi yang telah ditetapkan berdasarkan nilai KAO yang diperoleh. Proses substitusi ini penting untuk memastikan bahwa campuran benda uji yang akan diuji memiliki komposisi yang optimal dan dapat diketahui pengaruhnya terhadap kinerja dan karakteristik campuran aspal. Berikut ini adalah perancangan untuk campuran beraspal dengan tambahan RCA.

4.5.1 Perancangan Campuran Beraspal dengan RCA

Perancangan campuran ini melibatkan penggunaan RCA sebagai substitusi sebagian dari agregat dalam campuran beraspal. Hasil perancangan ini kemudian disajikan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Perancangan Dengan RCA

Kadar Aspal Optimum	Material	Kadar Limbah Terhadap Campuran (%)				
		0%	25%	50%	75%	100%
5,7%	Agregat (gram)	1135,29	851,47	567,64	283,82	0.00
	RCA (gram)	0,00	283,82	567,64	851,47	1135,29
	Aspal (gram)	64,71				
	Berat Benda Uji	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00	1200,00

Tabel 4.11 menunjukkan KAO yang sudah diperoleh dari pengujian sebelumnya yaitu kadar aspal sebesar 5,7% akan dijadikan sebagai kadar aspal yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji campuran beraspal dengan tambahan RCA sebagai bahan substitusi agregat. Contoh perhitungan penggunaan RCA pada 25% dalam gram.

$$\text{Berat RCA 25\%} = \frac{\text{Kadar RCA}}{100} \times \text{Berat Agregat}$$

$$= \frac{25}{100} \times 1135,29$$

$$= 283,82 \text{ gram}$$

$$\text{Berat Agregat} = 1135,29 - 283,82 = 851,47 \text{ gram}$$

$$\text{Berat Aspal} = \frac{\text{Kadar Aspal} \times 1200}{100}$$

$$= \frac{5,39 \times 1200}{100}$$

$$= 64,71 \text{ gram}$$

Tabel 4.11 terlihat bahwa berat kadar aspal untuk kadar limbah 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% secara berturut-turut adalah 5,7%. Pada RCA 0% diperoleh jumlah penggunaan agregat sebanyak 1135,29, kadar 25% penggunaan agregat sebanyak 851,47 gram serta RCA sebanyak 283,82 gram, kadar 50% penggunaan agregat dan RCA sebanyak 567,64, kadar 75% penggunaan agregat sebanyak 283,82 gram serta RCA sebanyak 851,47 dan kadar 100% penggunaan RCA 1135,29 gram. Berat aspal untuk seluruh kadar RCA sebanyak 64,71 gram dengan total berat untuk 1 benda uji sebesar 1200 gram.

4.5.2 Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal dengan RCA

Pengujian berat jenis campuran beraspal dengan substitusi RCA dilakukan pada 10 sampel, yang mewakili kadar RCA yang sudah direncanakan. Data hasil pengujian berat jenis maksimum pada campuran beraspal dengan bahan substitusi RCA dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Data Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal dengan RCA

Kadar Limbah (%)	Sampel Uji	A (gr)	B (gr)	D (gr)	E (gr)	Gmm gr/cm ³	Rata-rata gr/cm ³
0%	1	500	2244,1	2534,1	2507	2,381	2,380
	2	500	2244,8	2534,7	2510,6	2,380	
25%	1	500	2246	2537,5	2479,4	2,398	2,387
	2	500	2246,6	2536,1	2492,2	2,375	
50%	1	500	2243,7	2535,8	2498	2,405	2,390
	2	500	2246,1	2535,5	2512,5	2,374	
75%	1	500	2240,7	2529,8	2455,6	2,371	2,394
	2	500	2236,8	2529,9	2472,6	2,417	
100%	1	500	2245,4	2536,5	2453,8	2,393	2,402
	2	500	2245,1	2537,6	2469,6	2,410	

Berikut adalah contoh perhitungan dilakukan dengan persamaan 2.14 pada kadar RCA 25%.

$$G_{\text{mm}} \text{ sampel 1} = \frac{500}{500 + 2246 - 2479,4} = 2,398 \text{ gr/cm}^3$$

$$G_{\text{mm}} \text{ sampel 2} = \frac{500}{500 + 2246,6 - 2492,2} = 2,375 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{2,398 + 2,375}{2} = 2,387 \text{ gr/cm}^3$$

Tabel 4.12 menyajikan hasil pengujian berat jenis maksimum campuran beraspal dengan penggunaan RCA dalam berbagai kadar. Pada kadar RCA 0%, tercatat bahwa nilai rata-rata berat jenis maksimum campuran adalah sekitar 2,380 gr/cm³. Ketika pada kadar RCA mencapai kadar 25%, rata-rata berat jenis maksimum meningkat menjadi sekitar 2,387 gr/cm³. Sementara itu, pada kadar RCA 50%, terlihat peningkatan rata-rata berat jenis maksimum menjadi sekitar 2,390 gr/cm³. Pada kadar RCA 75%, ditemukan bahwa rata-rata berat jenis maksimum adalah sekitar 2,394 gr/cm³. Selanjutnya, pada kadar RCA 100%, terlihat bahwa rata-rata berat jenis maksimum mencapai sekitar 2,402 gr/cm³. Hasil-hasil ini memberikan gambaran tentang bagaimana pengaruh penggunaan RCA pada berat jenis maksimum campuran dengan berbagai jenis kadar yang berbeda.

4.5.3 Hasil Pengujian Marshall Campuran Beraspal dengan RCA

Dalam penelitian ini, dilakukan pembuatan benda uji dengan menggunakan berat aspal, agregat, dan RCA yang telah ditentukan berdasarkan variasi ukuran dan persentasenya. Hasil dari pembuatan benda uji untuk masing-masing variasi RCA dapat dilihat pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil Pengujian Marshall dengan RCA

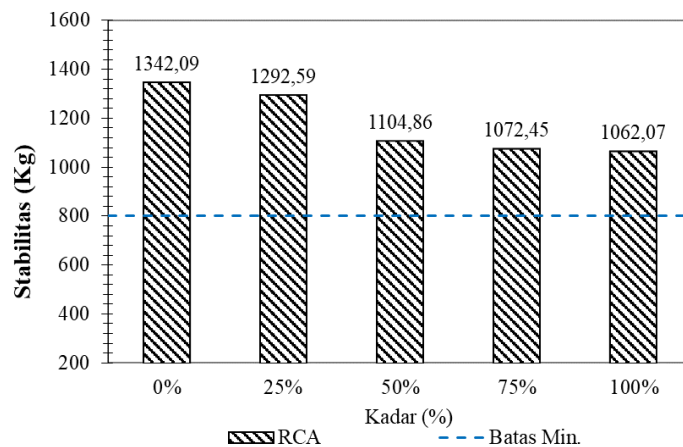
Kode Benda Uji	Sampel	A (%)	B (%)	C (gram)	D (gram)	E (gram)	F (cm ³)	G (gram/mm ³)	H (gram/cm ³)	VIM (%)	VMA (%)	VFA (%)	O (div)	P (kg/div)	Q (Kg)	R (mm)	S (kg/mm)
RCA 0%	1	5,7	5,39	1189,0	1199,6	676,4	523,2	2,273		4,530	58,898	92,309	90	1424,11	1367,15	4	341,79
	2			1169,0	1183,9	663,6	520,3	2,247		5,613	59,364	90,545	82	1297,53	1297,53	4	324,38
	3			1184,0	1196,3	678,6	517,7	2,287		3,922	58,636	93,312	81	1281,70	1281,70	3	427,23
	4			1193,0	1206,5	679,6	526,9	2,264		4,882	59,049	91,733	83	1313,35	1260,82	4	315,20
	5			1183,0	1191,9	672,7	519,2	2,279		4,280	58,790	92,720	95	1503,23	1503,23	5	300,65
Rata-rata								2,270	2,380	4,645	58,948	92,120	59,4	1363,99	1342,09	4,00	341,85
RCA 25%	1	5,7	5,39	1161,0	1185,5	679,8	505,7	2,296		3,807	58,477	93,490	72	1139,29	1184,86	5	236,97
	2			1173,0	1162,9	651,2	511,7	2,292		3,952	58,540	93,248	80	1265,88	1265,88	3	421,96
	3			1183,0	1189,9	668,3	521,6	2,268		4,972	58,980	91,570	77	1218,41	1218,41	4	304,60
	4			1179,0	1194,4	667,3	527,1	2,237		6,282	59,545	89,451	86	1360,82	1306,39	4	326,60
	5			1176,0	1199,5	677,6	521,9	2,253		5,589	59,246	90,567	94	1487,41	1487,41	4	371,85
Rata-rata								2,269	2,387	4,920	58,958	91,654	65,6	1294,36	1292,59	4,00	332,40
RCA 50%	1	5,7	5,39	1162,7	1181,0	672,4	508,6	2,286		4,332	58,654	92,615	72	1139,29	1184,86	4	296,22
	2			1163,4	1174,0	663,1	510,8	2,277		4,701	58,813	92,007	65	1028,53	1028,53	5	205,71
	3			1169,5	1188,0	669,6	518,4	2,256		5,591	59,198	90,555	78	1234,23	1234,23	4	308,56
	4			1161,5	1187,0	670,0	517,0	2,247		5,983	59,367	89,922	65	1028,53	1028,53	6	171,42
	5			1176,1	1197,0	673,6	523,4	2,247		5,965	59,360	89,950	69	1091,82	1048,15	4	262,04
Rata-rata								2,263	2,390	5,314	59,078	91,004	61,0	1104,48	1104,86	4,60	248,79
RCA 75%	1	5,7	5,39	1161,9	1183,7	670,6	513,1	2,264		5,399	59,044	90,856	70	1107,64	1107,64	4	276,91
	2			1169,0	1191,0	673,1	517,9	2,257		5,703	59,176	90,362	68	1076,00	1076,00	4	269,00
	3			1163,2	1196,7	673,7	523,0	2,224		7,086	59,775	88,146	65	1028,53	987,39	4	246,85
	4			1162,4	1198,9	674,7	524,2	2,217		7,362	59,894	87,708	76	1202,59	1154,48	5	230,90
	5			1163,9	1163,0	655,9	507,1	2,295		4,115	58,488	92,964	63	996,88	1036,76	6	172,79
Rata-rata								2,252	2,394	5,933	59,276	89,991	75,4	1082,33	1072,45	4,60	239,29
RCA 100%	1	5,7	5,39	1162,7	1177,9	672,5	505,4	2,301		4,206	58,392	92,797	68	1076,00	1119,04	4	279,76
	2			1161,4	1193,0	680,7	512,3	2,267		5,602	58,998	90,505	70	1107,64	1107,64	6	184,61
	3			1169,5	1181,2	658,0	523,2	2,235		6,924	59,572	88,377	60	949,41	911,43	5	182,29
	4			1161,5	1185,4	659,1	526,3	2,207		8,105	60,085	86,511	74	1170,94	1124,10	4	281,03
	5			1163,1	1175,9	648,0	527,9	2,203		8,257	60,151	86,272	69	1091,82	1048,15	5	209,63
Rata-rata								2,243	2,402	6,619	59,440	88,865	80,8	1079,16	1062,07	4,80	227,46

Tabel 4.13 menampilkan data hasil pengujian parameter Marshall dengan dilakukan perhitungan rata-rata dari hasil pengujian menggunakan 5 benda uji terhadap parameter Marshall stabilitas, *flow*, MQ, VIM, VMA, VFA, dalam campuran beraspal. Data hasil tersebut kemudian dibuat rekapitulasi yang disajikan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Rekapitulasi Data Uji Marshall dengan RCA

Karakteristik campuran	Spesifikasi Bina Marga (2018)	Kadar Limbah (%)				
		0	25	50	75	100
Stabilitas (Kg)	Min. 800	1342,09	1292,59	1104,86	1072,45	1062,07
Flow (mm)	2-4	4,00	4,00	4,60	4,60	4,80
MQ (kg/mm)	Min. 250	341,85	332,40	248,79	239,29	227,46
VIM (%)	3-5	4,65	4,92	5,31	5,93	6,62
VFA (%)	Min. 65	92,12	91,67	91,01	90,01	88,89
VMA (%)	Min. 14	58,95	58,96	59,08	59,28	59,44

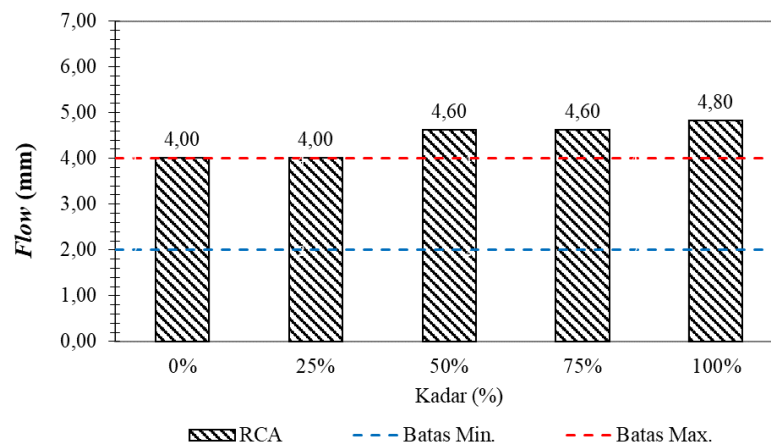
Tabel 4.14 ditemukan bahwa pada kadar limbah 25% menunjukkan nilai yang paling memenuhi untuk semua parameter yang diuji. Pada kadar limbah 25%, diperoleh nilai stabilitas sebesar 1292,59 kg, *flow* sebesar 4 mm, dan MQ sebesar 332,40 kg/mm, VIM sebesar 4,92%, VFA sebesar 91,67% dan VMA sebesar 58,96%. Data tersebut kemudian digunakan untuk membuat grafik hubungan antara nilai stabilitas dengan kadar RCA, yang dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Kadar RCA Terhadap Stabilitas

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa semakin tinggi RCA, maka stabilitas campuran juga semakin menurun. Pada kadar RCA 25%, terdapat nilai stabilitas sebesar 1292,59 kg, sedangkan pada kadar RCA 50%, 75%, dan 100% terjadi penurunan stabilitas secara berturut-turut sebesar 16,99%, 3,02% dan 0,98%. Penggunaan RCA yang memiliki tingkat keausan dalam campuran beraspal, ada kemungkinan terjadinya penurunan stabilitas pada campuran. Hal ini disebabkan oleh kehadiran partikel-partikel beton dalam campuran beraspal, yang dapat mengurangi kualitas ikatan antara agregat dan aspal.

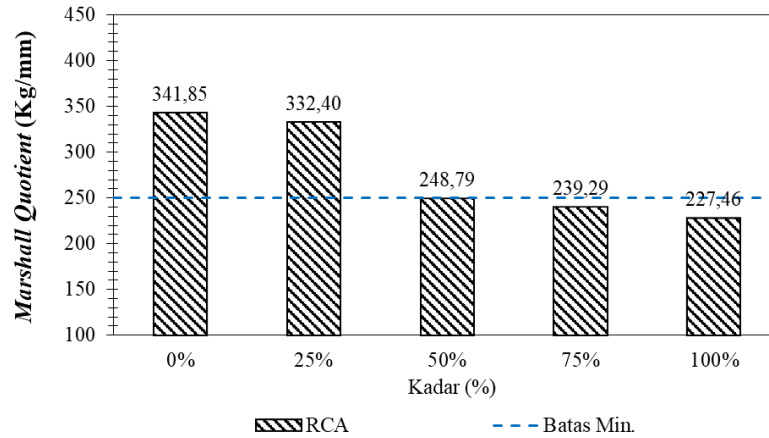
Grafik hubungan antara nilai *flow* terhadap kadar RCA terdapat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Kadar RCA Terhadap *Flow*

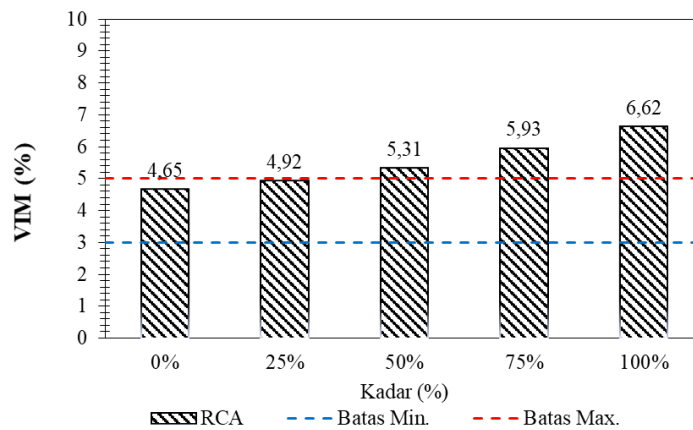
Gambar 4.10 menunjukkan bahwa pada kadar Rca 25%, nilai *flow* telah memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Namun, pada kadar RCA 50%, 75%, dan 100%, terjadi peningkatan nilai *flow* secara berturut-turut sebesar 13,04% hingga 4,17%. Peningkatan nilai *flow* tersebut disebabkan oleh perubahan karakteristik fisik limbah beton yang menghasilkan peningkatan kemampuan pengisian rongga dalam campuran aspal. Hal ini menyatakan bahwa penambahan RCA dapat mempengaruhi kemampuan aliran aspal dalam campuran dan perlu diperhatikan

dalam menentukan proporsi optimal RCA dalam pencampuran beraspal. Grafik nilai *Marshall Quotient* terhadap kadar RCA terdapat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Hubungan RCA Terhadap MQ

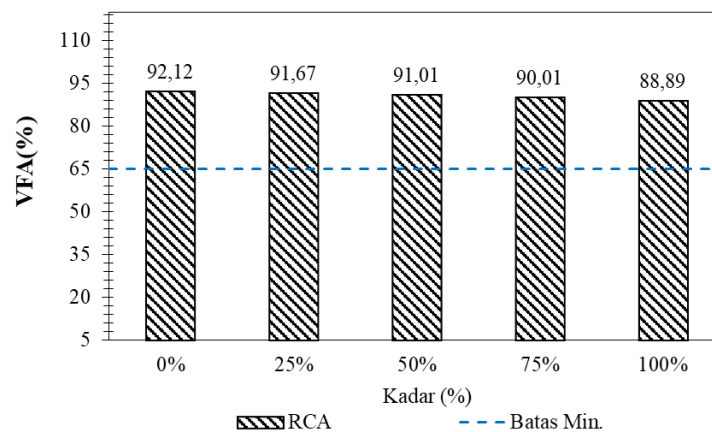
Gambar 4.11 menunjukkan bahwa pada substitusi kadar RCA 25% merupakan nilai MQ tertinggi yaitu sebesar 332,40 kg/mm, sementara pada kadar 50%, 75%, dan 100%, terjadi penurunan masing-masing sebesar 33,61%, 3,97%, dan 5,20% secara berurutan. Hal ini disebabkan oleh perubahan karakteristik RCA yang mempengaruhi kemampuan ikatan antara agregat dan aspal dalam campuran beraspal. Grafik nilai VIM terhadap kadar RCA terdapat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Grafik Hubungan RCA Terhadap VIM

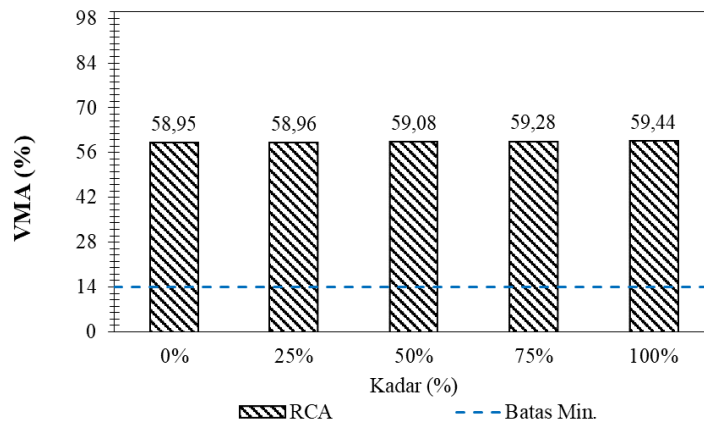
Gambar 4.12 menunjukkan bahwa penggunaan RCA pada kadar 25% naik sebesar 5,59%, sedangkan pada kadar RCA 50%, 75% dan 100%, nilai VIM mengalami peningkatan yang tidak memenuhi spesifikasi masing-masing sebesar 7,42%, 10,43%, dan 10,36% secara berturut-turut. Nilai VIM yang tidak memenuhi persyaratan terjadi karena penggunaan RCA menghasilkan lebih banyak rongga dalam campuran.

Selanjutnya Gambar 4.13 merupakan grafik perbandingan hubungan VFA antara nilai VFA terhadap RCA dalam campuran.



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Kadar RCA Terhadap VFA

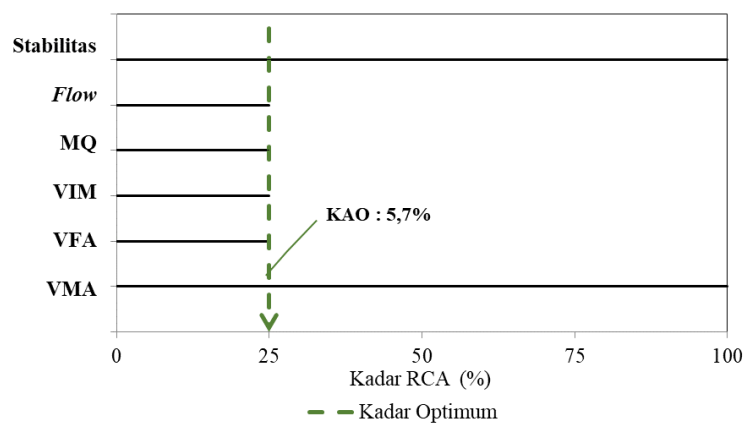
Gambar 4.13 menunjukkan bahwa nilai VFA dengan kadar RCA 25%, 50%, 75%, dan 100% menghasilkan penurunan secara berturut-turut sejumlah 0,50%, 0,72%, 1,11%, dan 1,25%. Hal tersebut terjadi karena semakin besar persentase kadar RCA sebagai pengganti agregat dalam campuran maka dapat mengurangi jumlah pori berat aspal semakin bertambah sehingga rongga udara yang ada pada campuran semakin kecil karena sudah terisi oleh aspal. Gambar 4.14 menunjukkan hubungan antara RCA terhadap nilai VMA dalam campuran.



Gambar 4.14 Grafik Hubungan Kadar RCA Terhadap VMA

Gambar 4.14 menunjukkan bahwa nilai VMA penggunaan RCA pada kadar 25%, 50%, 75%, dan 100%, terjadi peningkatan masing-masing sebanyak 0,02%, 0,20%, 0,33%, dan 0,28%. Hal tersebut terjadi karena semakin besar persentase kadar RCA, berat aspal semakin bertambah sehingga rongga udara yang ada pada campuran semakin kecil karena sudah terisi oleh aspal. Gambar 4.12 adalah grafik hubungan RCA terhadap stabilitas campuran beraspal.

Dari keseluruhan hasil pengujian pada parameter Marshall nilai kadar RCA optimum atau komposisi terbaik dapat ditemukan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Kadar RCA Optimum

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa tidak semua kadar RCA pada benda uji memenuhi semua parameter yang telah ditetapkan. Komposisi terbaik terdapat pada benda uji yang nilai parameternya telah memenuhi persyaratan spesifikasi. Dari hasil pengujian Marshall teridentifikasi, bahwa kadar RCA yang optimum dalam campuran adalah 25%. Sehingga, kadar RCA 25% dipilih sebagai komposisi optimal untuk penggantian sebagian atau substitusi agregat dengan tambahan RCA dalam campuran beraspal.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium dan analisis data, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a. Berdasarkan hasil uji Marshall pada lima variasi kadar aspal, yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5% diperoleh KAO adalah sebesar 5,7%.
- b. Berdasarkan hasil uji Marshall nilai stabilitas optimum adalah 1292,59 kg pada kadar RCA 25%. Sedangkan pada kadar RCA 50%, 75%, dan 100% terjadi penurunan stabilitas secara berturut-turut sebesar 16,99%, 3,02%, dan 0,98%. Adanya kemungkinan penurunan nilai stabilitas diakibatkan oleh nilai abrasi yang cukup tinggi dari material RCA.
- c. Nilai abrasi pada material RCA dan agregat berturut-turut sebesar 38,24% dan 16,67%. Persentase yang lebih besar pada material RCA disebabkan oleh karakteristik homogen dari RCA yang mengakibatkan adanya lebih banyak rongga yang dapat terisi oleh aspal.
- d. Nilai *flow* mengalami peningkatan pada kadar RCA 25%, 50%, 75%, dan 100% berturut-turut sebesar 13,04%, 13,04% dan 16,67%.
- e. Pada kadar RCA 25%, MQ turun sebesar 2,84%. Sedangkan pada benda uji dengan kadar RCA 50%, 75% dan 100%, mengalami penurunan berturut-turut sebesar 37,41%, 42,86%, dan 50,29%.
- f. Pengaruh variasi RCA terhadap rongga pada aspal beton AC-BC menunjukkan bahwa semakin tinggi nilai VIM maka semakin besar rongga dalam campuran,

yang mengakibatkan lebih banyak rongga dalam campuran. Sementara itu, pada penambahan RCA sebanyak 25%, 50%, 75%, dan 100%, VFA mengalami penurunan nilai secara berturut-turut sebesar 91,67%, 91,01%, 90,01%, dan 88,89%. Sedangkan, nilai VMA mengalami peningkatan seiring dengan penambahan RCA. Pada kadar 25%, nilai VMA adalah 58,96%, pada kadar 50% adalah 59,08%, pada kadar 75% adalah 59,28%, dan pada kadar 100% adalah 59,44%.

- g. Pada kadar RCA optimum, yaitu 25%, didapatkan hasil bahwa nilai stabilitas, *flow*, MQ, VIM, VFA, dan VMA berturut-turut sebesar 1292,59 kg, 4 mm, 332,40 kg/mm, 4,92%, 91,67%, dan 58,96%.
- h. Berdasarkan nilai stabilitas campuran beraspal agregat dengan RCA dapat disimpulkan bahwa penggunaan RCA pada mutu beton $f_c'25$ tidak meningkatkan nilai stabilitas.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, maka saran yang dapat berguna untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- a. Mengidentifikasi pengaruh nilai abrasi pada campuran beraspal.
- b. Menggunakan variasi limbah dengan mutu beton yang berbeda.
- c. Menggunakan variasi kadar RCA berbeda sebagai material substitusi agregat.
- d. Mengevaluasi kelayakan dari segi biaya pada penggunaan RCA sebagai pengganti agregat dalam campuran beraspal.

DAFTAR PUSTAKA

- Álvarez, D. A., Aenlle, A. A., Tenza-Abril, A. J., & Ivorra, S. (2020). Influence of partial coarse fraction substitution of natural aggregate by recycled concrete aggregate in hot asphalt mixtures. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/SU12010250>
- Badan Standarisasi Nasional. (2002). *SNI-03-6893-2002. Metode Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2008). *SNI-1969-2008. Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus dan Kasar*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2008). *SNI-2417-2008. Cara Uji Keausan Agregat dengan Mesin Abrasi Los Angeles*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI-2433-2011. Cara Uji Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal dengan Alat Cleveland Open Cup*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI-2434-2011. Cara Uji Titik Lembek Aspal dengan Alat Cincin dan Bola (Ring and Ball)*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI-2439-2011. Cara Uji Penyelimutan dan Pengelupasan pada Campuran Agregat Aspal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *SNI-2432-2011. Cara Uji Penetrasi Aspal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. (2018). *SNI-2489-2018. Metode Pengujian Campuran Aspal Dengan Alat Marshall*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Bastidas-Martínez, J. G., Reyes-Lizcano, F. A., & Rondón-Quintana, H. A. (2022). Use of recycled concrete aggregates in asphalt mixtures for pavements: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 725–741. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.08.001>
- Bina Marga. (2018). *Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan*

Konstruksi Jalan dan Jembatan.

- Iskandar, D., Prawati, E., Hadijah, I., & Nurkholid, M. (2022). *Pemanfaatan Kembali Sampah Konstruksi Untuk Pembangunan Yang Berkelanjutan*. 4, 16–23. <https://prosiding.ummetro.ac.id/index.php/snppm>
- Latief, R. U., & Toengsal, J. (2020). *Pengelolaan Sisa Material Pada Proyek Kostruksi*. CV. Nas Media Pustaka.
- Masudi, M. (2022). Penggunaan Agregat Kasar Berabrasi Tinggi Pada Campuran Beton Aspal (*Ac-Wearing Course*) Untuk Melayani Lalu Lintas Tinggi Dengan Perbaikan Kondisi Fisik Agregat Dan Variasi Nilai Abrasi Agregat. *Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP)*, 1(1). <https://doi.org/10.23960/snip.v1i1.140>
- Subagyo, G. W., & Indramaha, I. (2020). Kinerja Marshall Campuran Beraspal Panas Lapis (Ac-Bc) Menggunakan Limbah Beton. *Indonesian Journal of Construction Engineering and Sustainable Development (Cesd)*, 2(2), 80–86. <https://doi.org/10.25105/cesd.v2i2.6451>
- Sukirman, S. (2007). *Beton Aspal Campuran Panas*. Institut Teknologi Nasional.
- Suwastika, P. M. W., Wedyantadji, B., & Erfan, M. (2019). 3 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Malang. *Jalan Bendungan Sigura-Gura*, 2.
- Weimintoro, A., Ahmad, R. K., Farid, A., & Salsabila, N. S. (2022). Pengaruh Penambahan Limbah Karet Ban Sebagai Substitusi Sebagian Kadar Aspal Terhadap Stabilitas AC-BC Dengan Metode Marshall Test. *Rekayasa: Jurnal Teknik Sipil*, 7(1), 25–30.
- Wirahaji, I. B., & Laintarawan, I. P. (2019). *Karakteristik Marshall Ac-Bc Dengan Substitusi Limbah Beton Pada Agregat Kasar*. 012.

LAMPIRAN 1
Pengujian Material Agregat

FORMULIR PENGUJIAN ANALISIS AGREGAT

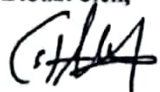

No: 001/15/TIR/V/2023

Nama : GITA TRESHA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 24-05-2023
 Jumlah Sampel : 2
 Berat Sampel : 5000 gr
 Metode Pengujian : SNI - 1948 - 1990

Formulir Pengujian Analisis Saringan Agregat Bin 1

Nomor saringan	Ukuran saringan (mm)	Berat Tertahan (gr)	
		Sampel 1	Sampel 2
1"	25,4	0	0
3/4"	19,050	0	0
1/2"	12,700	2512	2682
3/8"	9,600	1328	1241
4	4,740	1016	1037
8	2,400	147	157
16	1,200	5	6,5
30	0,425	1,5	0,4
50	0,300	0,8	0,3
100	0,150	1,4	0,9
200	0,075	1	0,7
Pan		0,1	0,3
Total Berat Sampel (gr)		5011	5120

Tangerang,

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRESHA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN ANALISIS AGREGAT


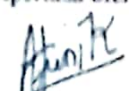
No: 002 / TS / TJR / V / 2023

Nama : GITA TRESNA WIBUNA
 Hari/Tanggal : 24-05-2023
 Jumlah Sampel : 2
 Berat Sampel : 2000 gr
 Metode Pengujian : SM-1968-1990

Formulir Pengujian Analisis Saringan Agregat Bin 2

Nomor saringan	Ukuran saringan (mm)	Berat Tertahan (gr)	
		Sampel 1	Sampel 2
1"	25,4	0	0
3/4"	19,050	0	0
1/2"	12,700	0	0
3/8"	9,600	0	0
4	4,740	1802	1803
8	2,400	592	593
16	1,200	1.7	0.1
30	0,425	0,3	0,2
50	0,300	0,1	0,2
100	0,150	0,3	0,9
200	0,075	0,2	0,1
Pen		0,1	0,3
Total Berat Sampel (gr)		2402,7	2406,4

Tangerang.

Dibuat oleh, 	Dipenksa oleh 
GITA TRESNA WIBUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN ANALISIS AGREGAT



No: 003/ TS /TJR/ V / 2023

Nama : GITA TRESNA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 2A - 05 - 2023
 Jumlah Sampel : 2
 Berat Sampel : 600 gr
 Metode Pengujian : SHI - 1960 - 1990

Formulir Pengujian Analisis Saringan Agregat Bin 3

Nomor saringan	Ukuran saringan (mm)	Berat Tertahan (gr)	
		Sampel 1	Sampel 2
3/4"	9,600	0	0
4	4,740	0	0
8	2,400	598.9	590.8
16	1,200	55	43.30
30	0,425	0,1	0,5
50	0,300	0,4	0,4
100	0,150	0,5	0,3
200	0,075	0,8	0,1
Pan		0,1	0,1
Total Berat Sampel (gr)		656,4	635,5

Tangerang,

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRESNA WIGUNA	AFNI FURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN ANALISIS AGREGAT



No: 004/ 15 / DP/ V / 2023

Nama : GITA TRISHA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 24 - 05 - 2023
 Jumlah Sampel : 2
 Berat Sampel : 800 gr
 Metode Pengujian : SNI - 1968 - 1990

Formulir Pengujian Analisis Saringan Agregat Bin 4

Nomor saringan	Ukuran saringan (mm)	Berat Tertahan (gr)	
		Sampel 1	Sampel 2
4	4,740	0	0
8	2,400	0	0
16	1,200	200,44	273,50
30	0,425	113,5	143,80
50	0,300	100,26	107,70
100	0,150	110,8	108,30
200	0,075	102,89	103,90
Pan		131,75	133,30
Total Berat Sampel (gr)		840	870,5

Tangerang,

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRISHA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT HALUS


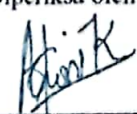
No: 001 / TS / TJR / V / 2023

Nama : GITA TESHA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 19 - 04 - 2023
 Jumlah Sampel : 2
 Berat Sampel : 500 gr
 Metode Pengujian : SN 1970 - 2016

Formulir Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

No.	Parameter	Notasi	Sampel 1	Sampel 2	Satuan
1	Berat benda uji kondisi jenuh kering	S	500	500	gr
2	Berat benda uji kering oven	A	489,5	488	gr
3	Berat piknometer yang berisi air	B	670	670	gr
4	Berat piknometer dengan benda uji dan air sampai batas pembacaan	C	978	979	gr
5	Berat benda uji dalam air (C-B)	D	308	308	gr

Tangerang,

Dibuat oleh. 	Diperiksa oleh 
GITA TESHA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AGREGAT KASAR

No: 001 / TS / TJR / V / 2023

Nama : GITA TRESNA WIBUHA
 Hari/Tanggal : 19 - 09 - 20 23
 Jumlah Sampel : 6
 Berat Sampel : 1000 gr
 Metode Pengujian : SHI - 1469 - 2016

Formulir Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar


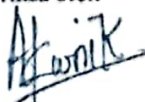
A. Data Pengujian

	Benda Uji					
	Bin 1		Bin 2		Bin 3	
	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 1	Sampel 2
Berat benda uji kering oven (gr)	985,1	974,7	977,7	987,9	975,9	980,2
Berat benda uji SSD (gr)	1009,8	1001,7	1003,7	1009,9	1002,9	1002,7
Berat benda uji dalam air (gr)	617,7	614,6	618,6	620,4	626,8	628,7

B. Perhitungan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

	Benda Uji								
	Bin 1			Bin 2			Bin 3		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat jenis <i>bulk</i>	2,512	2,518	2,515	2,539	2,534	2,538	2,695	2,619	2,607
Berat jenis SSD	2,575	2,588	2,587	2,606	2,593	2,600	2,667	2,683	2,675
Berat jenis semu	2,681	2,707	2,694	2,723	2,688	2,705	2,795	2,799	2,799
Penyerapan (%)	2,509	2,770	2,639	2,659	2,227	2,443	2,767	2,453	2,610

Tangerang.

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRESNA WIBUHA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN KEAUSAN AGREGAT DENGAN MESIN ABRASI LOS ANGELES

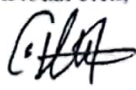

No: 001/TS/TJR/V/2023

Nama : GIYA TRESNA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 31-05-2008
 Jumlah Sampel : 3
 Berat Sampel : 5000 gr
 Metode Pengujian : SH1 - 247 - 2008

Formulir Pengujian Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angeles Limbah Beton

	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3
Berat awal agregat kasar (gram)	5000	5000	5000
Berat agregat kasar tertahan saringan No. 12 (gram)	3098	3107	3059
Keausan (%)	38,04	37,86	38,82
Keausan Rata-rata (%)	38,24		

Tangerang,

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GIYA TRESNA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

**FORMULIR PENGUJIAN KEAUSAN AGREGAT DENGAN MESIN ABRASI LOS
ANGELES**

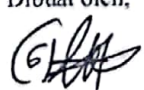

No: 002/ TS / TJE/ V / 2023

Nama : GITA TRESNA WIGUNIA
 Hari/Tanggal : 31 - 05 - 2023
 Jumlah Sampel : 3
 Berat Sampel : 5000 gr
 Metode Pengujian : SNI - 2417 - 2008

Formulir Pengujian Keausan Agregat Dengan Mesin Abrasi Los Angles

	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3
Berat awal agregat kasar (gram)	5000	5000	5000
Berat agregat kasar tertahan saringan No. 12 (gram)	4135	4217	4147
Keausan (%)	17,3	15,66	17,06
Keausan Rata-rata (%)	16,67		

Tangerang,

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRESNA WIGUNIA	AFRI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN BERAT JENIS MAKSIMUM CAMPURAN ASPAL



No: 02 / TS / 08 / V / 2023

Nama : GITA TRESNA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 13 - 08 - 2023
 Jumlah Sampel : 25
 Berat Sampel : 500 gr
 Metode Pengujian : SHI - 6393 - 2002

Formulir Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Aspal

Kadar Aspal (%)	Parameter	Satuan	Sampel		Rata-Rata
			1	2	
4.5	Berat agregat kering udara	gr	501	500	
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2237.6	2241.4	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2493.7	2502.7	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat I	gr	2534.1	2538.8	
	GMM	gr/cm ³	2.420	2.468	2.459
5	Berat agregat kering udara	gr	500	500	
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2216.5	2243.8	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2506.5	2528.8	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat I	gr	2515.7	2540.8	
	GMM	gr/cm ³	2.264	2.463	2.364
5.5	Berat agregat kering udara	gr	500	500	
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2234.9	2233.5	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2434.6	2525.5	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat I	gr	2515.3	2528.1	
	GMM	gr/cm ³	2.279	2.434	2.356
6	Berat agregat kering udara	gr	500	500	
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2240.4	2239.7	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2508.2	2499.2	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat I	gr	2521.6	2532.3	
	GMM	gr/cm ³	2.285	2.411	2.348
6.5	Berat agregat kering udara	gr	500	500	
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2243.7	2242.2	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2507.3	2506.8	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat I	gr	2580.2	2534.2	
	GMM	gr/cm ³	2.237	2.427	2.332

Tangerang.

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRESNA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

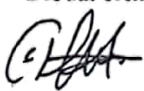
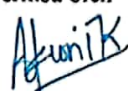
FORMULIR PENGUJIAN BERAT JENIS MAKSIMUM CAMPURAN ASPAL

No: 000/TS /TJR/ V / 2023

Nama : GITA TRESHA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 29-06-2023
 Jumlah Sampel : 10
 Berat Sampel : 500 gr
 Metode Pengujian : SNI-6393-2002

Formulir Pengujian Berat Jenis Maksimum Campuran Aspal

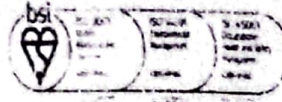
Kadar Limbah (%)	Parameter	Satuan	Sampel		Rata-Rata
			1	2	
0	Berat agregat kering udara	gr	500	500	2.380
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2244.1	2244.8	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2507	2510.6	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 1	gr	2534.1	2534.7	
	GMM	gr/cm ³	2.381	2.380	
25	Berat agregat kering udara	gr	500	500	2.387
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2246	2246.6	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2479	2492.2	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 1	gr	2537.5	2536.1	
	GMM	gr/cm ³	2.398	2.375	
50	Berat agregat kering udara	gr	500	500	2.390
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2243.7	2246.1	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2498	2512.5	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 1	gr	2535.8	2533.6	
	GMM	gr/cm ³	2.405	2.374	
75	Berat agregat kering udara	gr	500	500	2.394
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2240.7	2236.8	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2455.6	2470.6	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 1	gr	2529.8	2529.9	
	GMM	gr/cm ³	2.391	2.417	
100	Berat agregat kering udara	gr	500	500	2.402
	Berat piknometer + tutup + air	gr	2245.4	2245.1	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 0	gr	2453.8	2469.6	
	Berat piknometer + tutup + air + agregat 1	gr	2593	2537.6	
	GMM	gr/cm ³	2.393	2.416	

Dibuat oleh, 	Tangerang, Diperiksa oleh 
GITA TRESHA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

LAMPIRAN 2
Pengujian Material Aspal



Form
Outgoing Quality Report
Asphalt Cement



Laboratory

Ciwandan

AC Grade

60/70

OQR No

OQR/CWD/ ABS/23/0023

Date of sampling

13-Mar-23 / 1.03

Customer/Contract No

DO: 022C02

Date of Testing

13-Mar-23

Date of delivery

30/03/2023

Test Results

Test	Unit	Method	Result	Spec
Penetration at 25 °C	0.1 mm	ASTM D5	66	60-70
Kinematic Viscosity 135 °C	cSt	ASTM D2172	415	≥ 300
Softening Point	°C	ASTM D36	48.8	≥ 48
Ductility at 25 °C	cm	ASTM D113	>150	≥ 100
Flash Point Cleveland Open Cup	°C	ASTM D92	364	≥ 232
Solubility in trichloroethylene	%wt	ASTM D2042	99.89	≥ 99.0
Specific Gravity at 25 °C		ASTM D79	1.0320	≥ 1.0
Thin Film Oven Test				
Weight Loss	%wt	ASTM D1754	0.02	≤ 0.8
Penetration after TFO	%	ASTM D1754/D5	76	≥ 54
Ductility at 25 °C after TFO	cm	ASTM D1754/D113	>150	≥ 50

Validation

Tested by

Heru Herdian

Approved by

Teguh Sudram

(Technical & QC Manager)

Doc No ABS.IV.a/TC-029
Rev No 07
REV DATE 3-Aug-21

LAMPIRAN 3

Pengujian Marshall

FORMULIR PENGUJIAN CAMPURAN ASPAL DENGAN ALAT MARSHALL

No: 001 / TS / TIR / V / 2023

Nama : GITA TRESNA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 09 - 06 - 2023
 Jumlah Sampel : 05
 Berat Sampel : _____
 Metode Pengujian : SH1 - 2089 - 2098

Formulir Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall



BU	A	B	C	D	E	F	O	R
1	4.5 %	4.31	1182	1196	660.3	70.3	73	4
2			1187	1190	666.1	72.7	54	4
3			1187	1192	678.8	78.1	64	7
4			1185	1199	670.0	80.0	55	4
5			1185	1190	671.7	71.1	61	4
Rata-rata							59.4	5
1	5.0%	4.76	1181	1197	660.4	72.4	63	6
2			1184	1199	672.0	78.3	73	4
3			1192	1189	661.8	71.5	54	4
4			1201	1200	674.2	73.2	68	4
5			1199	1193	678.4	70.9	70	5
Rata-rata							65.6	4.8
1	5.5 %	5.21	1195	1207	670.6	80.3	72	5
2			1170	1180	666.4	77.3	52	4
3			1164	1177	661.8	72.7	67	4
4			1184	1198	678.8	71.7	54	3
5			1189	1210	678.9	78.2	66	4
Rata-rata							61	4

Keterangan :

A : % aspal terhadap batuan
 B : % aspal terhadap campuran
 C : berat uji kering (gram)
 D : berat benda uji SSD (gram)

E : berat benda uji dalam air (gram)
 F : tinggi benda uji (mm)
 O : Pembacaan dial *proving ring*
 R : Pembacaan dial kelelahan

Tangerang.

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRESNA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN CAMPURAN ASPAL DENGAN ALAT MARSHALL

No: 002 / TS / DP / V / 2023

Nama : GITA TRESNA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 09 - 06 - 2023
 Jumlah Sampel : 10
 Berat Sampel : _____
 Metode Pengujian : SH1 - 2489 - 2018

Formulir Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall



BU	A	B	C	D	E	F	O	R
1	6.0%	6.66	1170	1191	671.2	73.22	67	4
2			1193	1195	678.1	73.51	66	5
3			1183	1198	669.6	71.8	65	5
4			1188	1199	666.2	71.7	68	3
5			1194	1200	674.3	72.3	61	3
Rata-rata							66.4	4
1	6.5%	6.10	1189	1199	679.6	70.3	89	5
2			1190	1200	678.8	77.9	85	5
3			1191	1200	677.2	78.3	83	5
4			1183	1195	671.2	81.8	90	4
5			1187	1199	669.9	76.8	81	5
Rata-rata							65.6	4.8

Keterangan :

A : % aspal terhadap batuan
 B : % aspal terhadap campuran
 C : berat uji kering (gram)
 D : berat benda uji SSD (gram)

E : berat benda uji dalam air (gram)
 F : tinggi benda uji (mm)
 O : Pembacaan dial *proving ring*
 R : Pembacaan dial kelelahan

Tangerang,

Dibuat oleh, 	Diperiksa oleh 
GITA TRESNA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN CAMPURAN ASPAL DENGAN ALAT MARSHALL

No: 006/TS/DP/V/2023

Nama : GITA TRESNA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 23-06-2023
 Jumlah Sampel : 15
 Berat Sampel : _____
 Metode Pengujian : SMI - 2489 - 2018

Formulir Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall



BU	A	B	Kadar Limbah (%)	C	D	E	F	O	R
1	5.7%	5.39	0	1181	1199.6	676.4	77.9	90	4
2				1169	1183.9	663.6	72.9	82	4
3				1184	1196.3	678.6	71.24	81	3
4				1193	1206.5	679.6	78.3	83	4
5				1183	1191.9	672.7	76.7	95	5
Rata-rata								99.4	4
1	5.7%	5.39	25	1161	1185.5	679.8	74.2	72	5
2				1173	1162.9	661.2	78.3	80	3
3				1183	1189.9	668.3	78.2	77	4
4				1179	1199.4	667.3	72.6	86	4
5				1178	1199.5	677.6	71.9	94	4
Rata-rata								65.6	4
1	5.7%	5.39	50	1162.7	1181	672.4	78.1	72	4
2				1163.4	1179	663.2	78.9	65	5
3				1169.5	1188	669.6	77.8	78	4
4				1161.5	1187	670	77.7	69	6
5				1176.1	1197	673.6	71.7	69	4
Rata-rata								61	4.5

Keterangan :

A : % aspal terhadap batuan
 B : % aspal terhadap campuran
 C : berat uji kering (gram)
 D : berat benda uji SSD (gram)

E : berat benda uji dalam air (gram)
 F : tinggi benda uji (mm)
 O : Pembacaan dial *proving ring*
 R : Pembacaan dial kelelehan

Tangerang,

Dibuat oleh 	Diperiksa oleh 
GITA TRESNA WIGUNA	AFNI KURNIATI TAMBING

FORMULIR PENGUJIAN CAMPURAN ASPAL DENGAN ALAT MARSHALL

No: 004/TS/10P/V/2023

Nama : GITA TRESNA WIGUNA
 Hari/Tanggal : 26 - 6 - 2023
 Jumlah Sampel : 10
 Berat Sampel : _____
 Metode Pengujian : SNI - 2489 - 2018

Formulir Pengujian Campuran Aspal dengan Alat Marshall



BU	A	B	Kadar Limbah (%)	C	D	E	F	O	R
1	5,7%	5,39	75	1161,9	1183,7	670,6	80,6	70	4
2				1169,0	1191	673,1	77,83	68	4
3				1163,2	1196,7	673,7	77,17	65	4
4				1162,9	1198,9	674,7	78,1	76	5
5				1163,1	1163	655,9	77,2	63	6
Rata-rata								75,4	4,6
1	5,7%	5,39	100	1162,7	1177,9	672,5	72,19	68	4
2				1161,4	1193	680,7	72,4	70	6
3				1169,5	1181,2	658	71,45	60	5
4				1161,5	1185,4	659,1	71,53	74	4
5				1163,1	1175,9	648	72,32	69	5
Rata-rata								80,8	4,8

Keterangan :

A : % aspal terhadap batuan
 B : % aspal terhadap campuran
 C : berat uji kering (gram)
 D : berat benda uji SSD (gram)

E : berat benda uji dalam air (gram)
 F : tinggi benda uji (mm)
 O : Pembacaan dial *proving ring*
 R : Pembacaan dial kelelahan

Tangerang,

Dibuat oleh,  GITA TRESNA WIGUNA	Diperiksa oleh  AFNI KURNIATI TAMBING
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Program Studi Teknik Sipil




Universitas Pradita












Scientia Business Park Tower 1, Blok 0/1, Jl. Boulevard Gading Serpong, Kelapa Dua







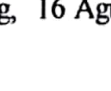
Tangerang, Banten 15810

FORMULIR BIMBINGAN TUGAS AKHIR

Nama : Gita Tresna Wiguna
 NIM : 1810107010
 Bentuk Tugas Akhir : (~~skripsi/tugas akhir/publikasi/karya akhir/proyek akhir~~) *coret yang tidak perlu
 Peminatan : Transportasi
 Pembimbing 1 : Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.
 Pembimbing 2 : Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng
 Judul Tugas Akhir : Studi Eksperimental Pengaruh Penggunaan *Recycled Concrete Aggregate* (RCA) Sebagai Material Substitusi Pada Campuran Beraspal

No	Tanggal	Catatan Bimbingan	Paraf Dosen
1	14/02/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan proposal - Penentuan topik dan judul - Membaca jurnal penelitian terlebih dahulu - Susun proposal BAB I – BAB III	
2	20/02/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan proposal BAB I - Revisi judul - Revisi latar belakang - Revisi rumusan masalah - Revisi tujuan penelitian - Revisi ruang lingkup penelitian - Revisi sistematika penulisan	
3	24/02/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan proposal BAB II – BAB III - Revisi susunan tinjauan pustaka - Revisi kelengkapan metode dalam BAB III - Revisi urutan metode penelitian	

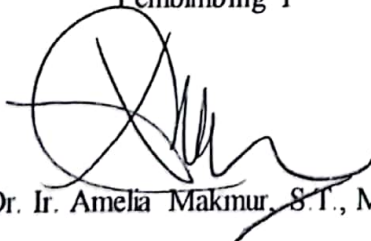
4	17/03/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan proposal BAB I – BAB III - Revisi manfaat penelitian - Revisi kerangka penelitian	
5	28/03/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> Bimbingan proposal BAB I – BAB III - Revisi rumusan masalah - Revisi tujuan penelitian - Revisi manfaat penelitian - Revisi susunan tinjauan pustaka - Revisi susunan metode penelitian	
6	30/03/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan proposal BAB I – BAB III - Revisi rumusan masalah - Revisi kerangka penelitian	
7	03/04/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan proposal BAB I – BAB III - Revisi penulisan - Finalisasi isi proposal	
8	05/04/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Konfirmasi proposal untuk sidang	
9	08/04/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> Bimbingan setelah sidang proposal - Font sub bab berubah - Penyajian hasil dan analisis dibuat secara informatif	
10	11/04/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> Bimbingan setelah sidang proposal - Penyajian hasil dan analisis dibuat secara informatif	
11	12/05/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> Bimbingan proposal BAB III - Revisi penulisan mengenai penyajian hasil dan analisis	
12	17/05/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> ACC pengumpulan proposal penelitian	
13	17/05/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> ACC pengumpulan proposal penelitian	
14	30/06/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> Bimbingan BAB IV - Revisi interpretasi data	

15	13/07/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan hasil pengolahan data	
16	30/07/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan Abstrak, BAB I- IV - Perubahan judul - Revisi penulisan	
17	31/07/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan perubahan judul	
18	03/08/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan Abstrak, BAB 1-5 - Revisi Abstrak - Revisi penulisan sitasi	
19	05/08/2023	<u>Dr. Amelia Makmur, S. T., M.T.</u> Bimbingan BAB 1-5 - Revisi tambah tinjauan pustaka - Revisi lengkapi hasil analisis - Revisi kesimpulan	
20	08/08/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> Bimbingan Abstrak dan Kesimpulan - Revisi Abstrak dan Kesimpulan	
21	15/08/2023	<u>Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng</u> Bimbingan Penulisan	

Tangerang, 16 Agustus 2023

Disetujui Untuk Sidang Tugas Akhir

Pembimbing I



Dr. Ir. Amelia Makmur, S.T., M.T.

Pembimbing II



Bella Koes Paulina Cantik, S.T., M. Eng.