



TUGAS AKHIR

PENGARUH *NATURAL RUBBER LATEX* PADA AC-WC DENGAN PEMANFAATAN RAP TERHADAP KARAKTERISTIK *MARSHALL* DAN KETAHANAN *CANTABRO*

Oleh:

Laura Florensia Tamba	40030522650071
Baihaqi Yusuf	40030522650125

Diajukan sebagai

salah satu syarat dalam menyelesaikan Sarjana Terapan

Program Studi Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur

Universitas Diponegoro

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN
PERANCANGAN ARSITEKTUR
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO**

2026

HALAMAN PENGESAHAN



LAPORAN TUGAS AKHIR

**PENGARUH *NATURAL RUBBER LATEX* PADA AC-WC DENGAN
PEMANFAATAN RAP TERHADAP KARAKTERISTIK *MARSHALL* DAN
KETAHANAN *CANTABRO***

Oleh:

Baihaqi Yusuf 40030522650125

Laura Florensia Tamba 40030522650071

Laporan ini telah disusun berdasarkan masukan Pembimbing dan dinyatakan dapat diajukan
untuk ujian Tugas Akhir pada tanggal.....

Semarang, 7 Juni 2026

Menyetujui,

Dosen Pembimbing 1

(Fardzanela Suwanto, S.T., M.Sc., Ph.D.)
NIP. 198903212015042002

Dosen Pembimbing 2

(Moh. Nur Sholeh, S.T., M.T., Ph.D.)
NIP. 199301012018031001

Mengetahui,

Ketua Program Studi D-IV Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur

(Asri Nurdiana, S.T., M.T.)
NIP. 198512092012122001

HALAMAN PENGESAHAN



LAPORAN TUGAS AKHIR PENGARUH *NATURAL RUBBER LATEX* PADA AC-WC DENGAN PEMANFAATAN RAP TERHADAP KARAKTERISTIK *MARSHALL* DAN KETAHANAN *CANTABRO*

Oleh:

Baihaqi Yusuf 40030522650125

Laura Florensia Tamba 40030522650071

Laporan ini telah diperbaiki dan disempurnakan berdasarkan masukan dan koreksi saat pelaksanaan ujian Tugas Akhir pada tanggal.....

Semarang, 11 Juni 2026

Mahasiswa I

Baihaqi Yusuf

NIM 40030522650125

Mahasiswa II

Laura Florensia Tamba

NIM 40030522650071

Menyetujui,

Dosen Penguji I

Asri Nurdiana, S.T., M.T.
NIP. 198512092012122001

Dosen Penguji II

Fardzanela Suwanto, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198903212015042002

Dosen Penguji III

Anno Mahfuda, S.Pd., M.Eng.
NIP. 199811242024061001

Mengetahui,

Ketua Program Studi D-IV Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur

Asri Nurdiana, S.T., M.T.
NIP. 198512092012122001

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *Natural Rubber Latex* (NRL) pada campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (AC-WC) dengan pemanfaatan *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) terhadap karakteristik Marshall dan ketahanan Cantabro. Material RAP yang digunakan sebesar 30%, sedangkan variasi NRL yang digunakan yaitu 0%, 3%, dan 5%. Pengujian dilakukan melalui pemeriksaan sifat material, ekstraksi RAP, perencanaan gradasi, pengujian Marshall untuk menentukan kadar aspal optimum, serta pengujian Cantabro untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran. Berdasarkan hasil pengujian Marshall, diperoleh kadar aspal optimum sebesar 4,6%. Hasil pengujian Marshall KAO menunjukkan bahwa campuran NRL 0% memiliki stabilitas 1034,44 kg, flow 3,61 mm, dan MQ 288,66 kg/mm. Pada NRL 3%, stabilitas meningkat menjadi 1043,96 kg, namun flow meningkat menjadi 10,3 mm. Hasil Cantabro menunjukkan nilai kehilangan berat rata-rata sebesar 4,51% pada NRL 0%, 2,12% pada NRL 3%, dan 2,26% pada NRL 5%. Dengan demikian, penambahan NRL 3% memberikan ketahanan terbaik terhadap pelepasan butiran.

Kata kunci: AC-WC, RAP, *Natural Rubber Latex*, Marshall, Cantabro.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of Natural Rubber Latex (NRL) addition on Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) mixtures using Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on Marshall characteristics and Cantabro resistance. The RAP content used in this study was 30%, while the NRL variations were 0%, 3%, and 5%. The laboratory testing included material characterization, RAP extraction, gradation design, Marshall testing to determine the optimum asphalt content, and Cantabro testing to evaluate mixture resistance to aggregate loss. Based on the Marshall test results, the optimum asphalt content was obtained at 4.6%. The Marshall test at optimum asphalt content showed that the mixture with 0% NRL had a stability value of 1034.44 kg, flow of 3.61 mm, and Marshall Quotient of 288.66 kg/mm. The mixture with 3% NRL showed an increased stability of 1043.96 kg, but the flow value also increased to 10.3 mm. The Cantabro test results showed average mass loss values of 4.51% for 0% NRL, 2.12% for 3% NRL, and 2.26% for 5% NRL. Therefore, the addition of 3% NRL provided the best resistance to aggregate loss.

Keywords: AC-WC, RAP, Natural Rubber Latex, Marshall, Cantabro.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian yang berjudul “*Pengaruh Natural Rubber Latex Pada Ac-Wc Dengan Pemanfaatan Rap Terhadap Karakteristik Marshall Dan Ketahanan Cantabro*” ini dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan Program Studi S.Tr.T. Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur.

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik *Cantabro Loss Test* dari penggunaan NRL sebagai bahan tambah terhadap *AC-WC* berbasis *RAP*. Penulis menyadari bahwa penyusunan penelitian ini tidak akan berjalan dengan lancar tanpa dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Asri Nurdiana, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi yang telah memberikan dukungan selama proses penyusunan penelitian ini.
2. Ibu Fardzanela Suwanto, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan bimbingan, saran, dan arahan selama proses penyusunan penelitian ini.
3. Bapak Moh Nur Sholeh, S.T., M.T., Ph.D. yang telah memberikan masukan dan dukungan dalam penyusunan penelitian ini.
4. Kedua orang tua penulis yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan motivasi yang tiada henti.
5. Mas Oki dan Mbak Galuh selaku laboran yang telah membantu dan mendukung selama proses pengujian di laboratorium.
6. Alia Zidan dan rekan satu tim penulis yang selalu menjadi partner selama kegiatan laboratorium dan penyusunan tugas akhir.

7. Teman-teman angkatan Baskara Bimantara yang telah memberikan semangat dan dukungan selama proses penyusunan penelitian.

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca serta menjadi referensi yang berguna di bidang konstruksi.

Akhir kata, semoga karya ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang konstruksi.

Penulis,
17 Oktober 2024

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	20
BAB I.....	21
1.1 Latar Belakang.....	21
1.2 Identifikasi Masalah	25
1.3 Rumusan Masalah	26
1.4 Tujuan Penelitian.....	26
1.5 Manfaat Penelitian.....	27
1.6 Batasan Masalah.....	28
BAB II	30
2.1 Aspal.....	30
2.2 Agregat	34
2.3 <i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (RAP).....	35
2.4 <i>Natural rubber latex</i> (NRL)	38
2.5 Uji Kinerja Marshall pada Aspal.....	40
2.6 Pengujian Cantabro Loss	41
2.7 Peneliti Terdahulu	20
BAB III.....	27
3.1 Rencana Penelitian	27
3.2 Pelaksanaan	32
3.2.1 Peralatan dan Material.....	32
3.2.2 Standar Pengujian	52
3.3.3 Pencampuran NRL dan Substitusi <i>RAP</i> dalam Aspal	65
3.3.4 Perancangan dan Pembuatan Benda Uji.....	66
3.3.5 Tahap Pengujian Benda Uji.....	69

3.3 Tahap Analisa dan Pembahasan	73
3.3.1 Penentuan Kadar Aspal Optimum	74
3.3.2 Ekstraksi RAP & Estimasi Aspal Baru	74
3.3.3 Analisis Penambahan Natural Rubber Latex (NRL)	78
BAB IV.....	80
4.1 Hasil Pengujian Sifat Aspal.....	80
4.1.1 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal.....	80
4.1.2 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal	81
4.1.3 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal.....	82
4.1.4 Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen	83
4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat.....	83
4.2.1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar	84
4.2.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus	85
4.3 Hasil Ekstraksi RAP dan Estimasi Aspal Baru	86
4.3.1 Hasil Ekstraksi RAP	86
4.3.2 Estimasi Aspal Baru	87
4.4 Analisis Gradasi dan Komposisi Job Mix Formula 30%	89
4.4.1 Analisis Gradasi.....	91
4.4.2 Komposisi Job Mix Formula RAP 30%.....	94
4.5 Hasil Pengujian Marshall Campuran RAP 30%.....	95
4.5.1 BJ Bulk Campuran	96
4.5.2 Grafik Rongga Udara / VIM.....	97
4.5.3 Rongga Dalam Mineral Agregat / VMA	98
4.5.4 Rongga Terisi Aspal / VFB	99
4.5.5 Stabilitas	100
4.5.6 Kelelehan / Flow.....	101
4.5.7 Marshall Quotient / MQ	102
4.6 Penentuan Kadar Aspal Optimum	88
4.7 Hasil Pengujian Marshall dengan Penambahan NRL	90
4.7.1 BJ Bulk Campuran RAP+NRL	91
4.7.2 Grafik Rongga Udara / VIM RAP+NRL.....	93
4.7.3 Rongga Dalam Mineral Agregat / VMA RAP+NRL	95

4.7.4	Rongga Terisi Aspal / VFB RAP+NRL	97
4.7.5	Stabilitas RAP+NRL	99
4.7.6	Kelelehan / Flow RAP+NRL.....	100
4.7.7	Marshall Quotient / MQ RAP+NRL	101
4.8	Hasil Pengujian Cantabro	109
4.9	Analisis Biaya.....	114
4.9.1	Analisis Biaya Campuran Aspal Konvensional.....	114
4.9.2	Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 0%	115
4.9.3	Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 3%	117
4.9.4	Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 5%	118
4.9.5	Analisis Biaya Campuran	119
BAB V	123
5.1	Kesimpulan.....	123
5.2	Saran	125
DAFTAR PUSTAKA	xi
LAMPIRAN	xx

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian	27
Gambar 3. 2 Gambar Oven.....	33
Gambar 3. 3 High Shear Homogenizer Mixer.....	33
Gambar 3. 4 Marshall Compression Machine	34
Gambar 3. 5 Moulding	35
Gambar 3. 6 Dongkrak	35
Gambar 3. 7 Panci dan Spatula.....	36
Gambar 3. 8 Kompor.....	36
Gambar 3. 9 Termometer.....	37
Gambar 3. 10 Water Bath.....	37
Gambar 3. 11 Asphalt Compactor	38
Gambar 3. 12 Timbangan	39
Gambar 3. 13 Centrifuge Extractor	39
Gambar 3. 14 Cawan	40
Gambar 3. 15 Satu set saringan	40
Gambar 3. 16 Sieve Shaker	41
Gambar 3. 17 Piknometer.....	41
Gambar 3. 18 Gelas Kimia	42
Gambar 3. 19 Pemanas	42
Gambar 3. 20 Cetakan Daktilitas Kuningan.....	43
Gambar 3. 21 Daktilometer	43
Gambar 3. 22 Satu Set Alat Uji Ring and Ball.....	44
Gambar 3. 23 Kuas	44
Gambar 3. 24 Filter Paper Centrifuge Extractor.....	45
Gambar 3. 25 Agregat 3/4	46
Gambar 3. 26 Agregat 1/2	46
Gambar 3. 27 Pasir	47
Gambar 3. 28 Abu Batu.....	48
Gambar 3. 29 RAP 9,5	49
Gambar 3. 30 RAP 9,5 – 4,75	49
Gambar 3. 31 RAP <4,75	50
Gambar 3. 32 Natural Rubber Latex (NRL).....	51
Gambar 3. 33 Gliserin	51
Gambar 3. 34 Memasukkan Jarum penetrasi pada sampel aspal	53
Gambar 3. 35 Memasukkan bola baja ke dalam bejana	55
Gambar 3. 36 Menimbang berat Piknometer + Air + Aspal	58
Gambar 3. 37 Menimbang Agregat dalam air	60
Gambar 3. 38 Memasukkan agregat halus dan air ke dalam piknometer.....	62
Gambar 3. 39 Memasukkan Material yang sudah ditimbang ke dalam wajan.....	67
Gambar 3. 40 pengecekan suhu pencampuran	67
Gambar 3. 41 Proses memasukkan material ke dalam moulding.....	68
Gambar 3. 42 Pelepasan Benda Uji	69

Gambar 3. 43 Proses pengujian Marshall.....	70
Gambar 3. 44 Proses Pengujian Cantabro Lost.....	72
Gambar 3. 45 Sampel sebelum du Uji Cantabro.....	72
Gambar 3. 46 Sampel setelah di Uji Cantabro.....	73
Gambar 3. 47 Proses Ekstraksi RAP.....	78
Gambar 4. 1 KAO Aspal Konvensional.....	88
Gambar 4. 2 Grafik Amplop Gradasi Gabungan.....	93
Gambar 4. 3 Grafik BJ Bulk Campuran.....	96
Gambar 4. 4 Grafik VIM.....	97
Gambar 4. 5 Grafik VMA.....	98
Gambar 4. 6 Grafik VFB.....	99
Gambar 4. 7 Grafik Stabilitas.....	100
Gambar 4. 8 Grafik Flow.....	101
Gambar 4. 9 Grafik MQ.....	102
Gambar 4. 10 Diagram Pemilihan KAO RAP.....	89
Gambar 4. 11 Grafik BJ Bulk Campuran.....	91
Gambar 4. 12 Diagram Bj Bulk.....	92
Gambar 4. 13 Grafik VIM.....	93
Gambar 4. 14 Diagram VIM.....	94
Gambar 4. 15 Grafik VMA.....	95
Gambar 4. 16 Diagram VMA.....	96
Gambar 4. 17 Grafik VFB.....	97
Gambar 4. 18 Diagram VFB.....	98
Gambar 4. 19 Grafik Stabilitas.....	99
Gambar 4. 20 Grafik Flow.....	100
Gambar 4. 21 Grafik MQ.....	101
Gambar 4. 22 Diagram MQ.....	103
Gambar 4. 23 Ketentuan Spesifikasi Khusus Interim Binamarga 2019.....	104
Gambar 4. 24 Grafik Stabilitas Marshall RAP NRL.....	106
Gambar 4. 25 Grafik Flow Marshall RAP NRL.....	106
Gambar 4. 26 Diagram Cantabro 3 sampel per kadar NRL.....	110
Gambar 4. 28 Hasil Cantabro.....	111
Gambar 4. 29 Diagram Cantabro.....	111
Gambar 4. 30 Hasil Rata-rata Cantabro.....	113
Gambar 4. 31 Grafik Analisis Biaya.....	120

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Tabel Perhitungan Ekstraksi Aspal	77
Tabel 3. 2 Kandungan Rap Berdasarkan KAO Aspal Konvesional	77
Tabel 3. 3 Tabel Kebutuhan NRL	79
Tabel 4. 1 Hasil pengujian penetrasi Aspal	80
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal	81
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal.....	82
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen	83
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar	84
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus	85
Tabel 4. 7 Estimasi Aspal Baru	88
Tabel 4. 8 Tabel Analisis Gradasi	91
Tabel 4. 9 Komposisi JMF	95
Tabel 4. 10 Pengujian Marshall Test.....	87
Tabel 4. 11 SKh-1.6.27.3. (2) Ketentuan Sifat Campuran Beraspal Panas Daur Ulang	88
Tabel 4. 12 Kadar Aspal.....	88
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Marshall dengan NRL.....	104
Tabel 4. 14 Tabel Hasil Pengujian Cantabro	109
Tabel 4. 15 Analisis Harga Aspal Konvensional.....	115
Tabel 4. 16 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 0%	116
Tabel 4. 17 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 3%	117
Tabel 4. 18 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 5%	118
Tabel 4. 19 Rekap Analisis Harga	119
Tabel 5. 1 Rekomendasi Kadar NRL Berdasarkan Aspek Analisis	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Lembar asistensi
Lampiran 2	Hasil Pengujian Material
Lampiran 3	Job Mix Design
Lampiran 4	Hasil Pengujian Marshall dan Cantabro

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) hasil pengerukan lapisan aspal lama semakin banyak menumpuk di area proyek maupun AMP. Material RAP yang tidak dimanfaatkan dengan baik dapat menimbulkan masalah lingkungan dan membutuhkan area penyimpanan yang cukup luas. Padahal, RAP masih memiliki kandungan agregat dan aspal yang dapat digunakan kembali sebagai material campuran perkerasan jalan. Penelitian yang menunjukkan bahwa penggunaan RAP pada campuran *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC) masih dapat memenuhi karakteristik Marshall apabila digunakan dengan proporsi yang sesuai (Iduwin et al., 2020). Pemanfaatan RAP juga dapat mengurangi penggunaan material baru dan meningkatkan efisiensi biaya konstruksi jalan. Selain itu, karakteristik RAP sebagai material perkerasan jalan masih memiliki potensi yang baik untuk digunakan kembali pada campuran beraspal (Widayanti et al., 2018)

Seiring meningkatnya kebutuhan pembangunan dan pemeliharaan jalan, penggunaan material baru secara terus-menerus menimbulkan permasalahan ketersediaan sumber daya alam dan biaya konstruksi yang tinggi. Salah satu solusi yang berkembang adalah pemanfaatan RAP dalam campuran beraspal, namun penggunaannya pada kadar tinggi masih menghadapi kendala karena aspal lama di dalam RAP telah mengalami penuaan, oksidasi, dan peningkatan kekakuan (Pasetto et al., 2021). Hal ini sejalan dengan temuan bahwa tingkat penuaan binder RAP menjadi faktor penting yang memengaruhi interaksinya dengan aspal baru maupun bahan peremaja (Costa et al., 2024).

Penggunaan RAP pada campuran AC-WC sudah cukup banyak diteliti, terutama untuk melihat pengaruhnya terhadap stabilitas dan karakteristik Marshall. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan RAP pada AC-WC masih bisa memenuhi spesifikasi pada kadar tertentu, bahkan dapat meningkatkan nilai stabilitas karena campuran menjadi lebih kaku. Di sisi lain, aspal lama yang terkandung dalam RAP telah mengalami proses

penuaan (*aging*), sehingga dapat meningkatkan kekakuan campuran dan menurunkan fleksibilitasnya. Kondisi ini berpotensi menyebabkan campuran lebih rentan terhadap retak dan pelepasan butir, terutama apabila kadar RAP yang digunakan terlalu tinggi. Dengan demikian, pemanfaatan RAP pada lapisan AC-WC perlu dilakukan secara terkendali, terutama dalam penentuan kadar RAP dan pengendalian mutu campuran. Peningkatan kadar RAP yang terlalu tinggi dapat memengaruhi kinerja campuran, sebagaimana ditunjukkan pada campuran AC-WC RAP 50% yang belum memenuhi salah satu parameter spesifikasi, sementara kadar 20%–40% masih layak digunakan sebagai lapis aus (Supranowo et al., 2021).

Penggunaan RAP dalam kadar tinggi juga perlu dievaluasi secara hati-hati karena dapat menimbulkan masalah durabilitas, khususnya terhadap retak lelah dan retak termal, sehingga diperlukan analisis kinerja campuran serta pendekatan desain campuran yang seimbang (Yu et al., 2024). Selain itu, penelitian (Costa et al., 2024) menyatakan bahwa derajat penuaan aspal RAP menjadi faktor penting yang memengaruhi interaksi antara binder lama, binder baru, dan bahan peremaja, sehingga penggunaan RAP tinggi perlu dikontrol dan dipantau selama masa layan.

Pelepasan butir atau *ravelling* merupakan salah satu bentuk kerusakan pada lapis permukaan perkerasan lentur yang ditandai dengan terlepasnya agregat dari permukaan campuran aspal. Kerusakan ini berkaitan erat dengan kegagalan ikatan antara aspal dan agregat, yang dapat dipengaruhi oleh penuaan aspal, lemahnya adhesi aspal-agregat, beban lalu lintas, dan pengaruh air. Pada campuran yang mengandung RAP, binder tua yang telah mengalami oksidasi dapat meningkatkan kekakuan, menurunkan fleksibilitas, serta mengurangi kualitas pelapisan aspal terhadap agregat, sehingga berpotensi meningkatkan kerentanan terhadap kerusakan akibat air dan pelepasan ikatan aspal-agregat. Oleh karena itu, pelepasan butir perlu dijadikan salah satu dasar permasalahan dalam penelitian campuran AC-WC dengan RAP.

Penggunaan RAP dalam campuran beraspal berpotensi memengaruhi kinerja campuran karena aspal lama yang terkandung di dalamnya telah mengalami penuaan. Kondisi tersebut dapat menurunkan kemampuan ikatan antara aspal dan agregat, sehingga aspek adhesi dan kohesi menjadi penting untuk diperhatikan. Adhesi berkaitan dengan

kemampuan aspal melekat pada permukaan agregat, sedangkan kohesi berkaitan dengan kekuatan ikatan internal aspal dalam mempertahankan struktur campuran. Sementara itu, *ravelling* atau pelepasan butir dapat dipengaruhi oleh kegagalan ikatan antara aspal dan agregat, terutama akibat penuaan aspal dan menurunnya kekuatan ikatan pada antarmuka aspal-agregat (Abouelsaad & White, 2022a).

Penggunaan RAP pada campuran beraspal memiliki potensi besar sebagai upaya pemanfaatan material daur ulang. Namun, penerapannya pada lapis aus AC-WC tetap perlu dibatasi dan dikontrol karena material RAP mengandung aspal tua yang telah mengalami penuaan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan binder menjadi lebih kaku, menurunkan durabilitas campuran, serta memengaruhi kemampuan aspal dalam melapisi dan mengikat agregat. Akibatnya, campuran beraspal yang mengandung RAP berpotensi mengalami kerusakan permukaan, salah satunya berupa pelepasan butir atau *raveling*.

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan upaya modifikasi campuran untuk meningkatkan kinerja RAP pada AC-WC. Pada penelitian terdahulu, penggunaan RAP pada campuran perkerasan beraspal telah banyak dikombinasikan dengan berbagai bahan modifikasi untuk meningkatkan kembali kinerja campuran akibat terjadinya penuaan (*aging*) pada aspal RAP. Beberapa jenis polimer yang telah digunakan antara lain Styrene Butadiene Styrene (SBS), Ethylene Vinyl Acetate (EVA), crumb rubber serta *rejuvenator*. Penggunaan SBS diketahui mampu meningkatkan nilai stabilitas, ketahanan deformasi, dan karakteristik Marshall sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap beban lalu lintas berulang (Khairunnisa, 2020). Namun demikian, penggunaan SBS masih memiliki kelemahan berupa harga material yang relatif tinggi, proses pencampuran yang memerlukan suhu lebih terkontrol, serta potensi peningkatan kekakuan campuran apabila kadar yang digunakan terlalu besar (Khairunnisa, 2020).

Selain SBS, polimer EVA juga telah banyak dimanfaatkan sebagai bahan modifikasi campuran beraspal karena mampu meningkatkan stabilitas, ketahanan deformasi permanen, dan durabilitas campuran. Penambahan EVA pada campuran aspal dilaporkan dapat memperbaiki performa lapisan AC-WC dan meningkatkan daya tahan campuran terhadap perubahan temperatur (Suherman, 2013). Akan tetapi, penggunaan EVA memiliki beberapa keterbatasan seperti memerlukan proses *blending* yang lebih

lama, membutuhkan alat pencampur khusus, serta berpotensi meningkatkan biaya produksi akibat penggunaan polimer sintetis ((Yosevina, 2022). Selain penggunaan polimer sintetis, beberapa penelitian RAP juga memanfaatkan bahan *rejuvenator* untuk mengembalikan sifat aspal yang telah mengalami *aging*. Meskipun demikian, penggunaan *rejuvenator* pada kadar yang terlalu tinggi dapat menurunkan stabilitas dan meningkatkan kerentanan campuran terhadap deformasi (Endoriawan & Febriansyah, 2022)

Di sisi lain, NRL memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan modifikasi pada campuran AC-WC berbasis RAP karena termasuk polimer alami yang berasal dari lateks karet. Penggunaan lateks alam diketahui mampu meningkatkan elastisitas aspal, memperbaiki sifat reologi pengikat, serta berpotensi mengurangi dampak penuaan pada aspal RAP (Hermadi & Ronny, 2015) Dibandingkan polimer sintetis seperti SBS dan EVA, NRL memiliki beberapa keunggulan berupa ketersediaan bahan yang melimpah di Indonesia, lebih ramah lingkungan, serta berpotensi menekan biaya modifikasi campuran. Oleh karena itu, penggunaan NRL pada campuran AC-WC berbasis RAP menjadi alternatif yang menarik untuk dikaji lebih lanjut dalam meningkatkan karakteristik Marshall dan ketahanan campuran terhadap pelepasan butir (*ravelling*).

Sementara itu, penambahan lateks karet alam pada binder aspal dapat meningkatkan viskositas, *elastic recovery*, serta berpotensi meningkatkan ketahanan terhadap *rutting*, retak termal, dan *fatigue* (Wen et al., 2017a). Pada konteks campuran beraspal di Indonesia, juga menunjukkan bahwa penggunaan lateks karet alam pada campuran AC-BC dapat meningkatkan stabilitas Marshall dan umur kelelahan campuran (Utami et al., 2020).

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *Natural Rubber Latex* (NRL) terhadap kinerja campuran AC-WC yang mengandung RAP. Penambahan NRL diharapkan dapat memperbaiki sifat ikatan aspal, meningkatkan elastisitas, serta membantu mempertahankan ikatan antara aspal dan agregat, sehingga campuran lebih tahan terhadap *ravelling* atau pelepasan butir. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada evaluasi pengaruh NRL terhadap kinerja

campuran AC-WC berbasis RAP, khususnya dalam meningkatkan ketahanan terhadap pelepasan butir dan mempertahankan durabilitas campuran.

Mengacu pada uraian tersebut, proposal ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan NRL terhadap kinerja campuran AC-WC yang mengandung RAP, khususnya dalam meningkatkan ketahanan campuran terhadap pelepasan butir dan mempertahankan durabilitas campuran

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang dapat diidentifikasi masalah:

1. Penurunan kinerja campuran AC-WC berbasis RAP akibat penuaan aspal dan keterbatasan pemanfaatan RAP tanpa bahan tambah

Material RAP mengandung aspal lama yang telah mengalami proses penuaan akibat oksidasi, paparan lingkungan, dan beban lalu lintas selama masa layan sebelumnya. Penuaan tersebut menyebabkan aspal menjadi lebih keras dan kaku, yang umumnya ditandai dengan menurunnya nilai penetrasi dan daktilitas, serta meningkatnya titik lembek dan viskositas aspal. Kondisi ini dapat menurunkan kemampuan adhesi antara aspal dan agregat serta kohesi internal dalam campuran. Pada campuran AC-WC berbasis RAP, penurunan kinerja juga dapat terlihat dari perubahan parameter Marshall seperti stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), VIM, VMA, dan VFB, serta meningkatnya nilai Cantabro Loss yang menunjukkan berkurangnya ketahanan campuran terhadap pelepasan butir. Oleh karena itu, pemanfaatan RAP dalam campuran beraspal memerlukan bahan tambah yang mampu memperbaiki sifat ikatan, elastisitas, dan durabilitas campuran, salah satunya yaitu NRL.

2. Belum diketahui pengaruh variasi kadar NRL pada campuran AC-WC berbasis RAP terhadap karakteristik Marshall

Penambahan NRL pada campuran AC-WC berbasis RAP perlu dikaji untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik Marshall. Parameter Marshall yang dianalisis meliputi stabilitas, *flow*, MQ, serta parameter volumetrik campuran. Analisis ini diperlukan untuk mengetahui apakah variasi kadar NRL mampu

meningkatkan kemampuan campuran dalam menerima beban serta mempertahankan kinerja strukturalnya.

3. Bagaimana pengaruh variasi kadar NRL terhadap nilai *Cantabro Loss* pada campuran *AC-WC* berbasis *RAP*, serta apakah hasil pengujian tersebut memenuhi spesifikasi atau standar yang berlaku sebagai bentuk validasi hasil penelitian

Selain karakteristik Marshall, pengaruh penambahan NRL juga perlu dianalisis terhadap nilai *Cantabro Loss*. Pengujian *Cantabro* digunakan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap pelepasan butir atau *ravelling*. Dengan demikian, perlu dikaji apakah variasi kadar NRL dapat menurunkan nilai kehilangan berat pada campuran *AC-WC* berbasis *RAP*, sehingga campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pelepasan agregat dan penurunan durabilitas.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan Identifikasi masalah, didapat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja campuran *AC-WC* berbasis *RAP* tanpa penambahan bahan tambah?
2. Bagaimana Campuran *AC-WC* berbasis *RAP* dan *NRL* terhadap karakteristik *marshall test*?
3. Bagaimana pengaruh variasi kadar *NRL* terhadap nilai *Cantabro Loss* pada campuran *AC-WC* berbasis *RAP*?

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan dan latar belakang yang telah diuraikan, penelitian ini memiliki beberapa tujuan yang ingin dicapai sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi kadar *NRL* pada campuran *AC-WC* berbasis *RAP* terhadap karakteristik Marshall sesuai dengan Spesifikasi Umum Binamarga tahun 2025.
2. Membandingkan karakteristik campuran *AC-WC* berbasis *RAP* dengan dan tanpa penambahan *NRL* untuk mengetahui sejauh mana penambahan *NRL* dapat memengaruhi kinerja campuran, khususnya terhadap stabilitas, flow, Marshall Quotient, dan parameter volumetrik campuran.

3. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara kadar NRL yang ditambahkan ke dalam campuran *AC-WC* berbasis *RAP* terhadap ketahanan campuran terhadap raveling berdasarkan hasil uji *Cantabro*. Serta memperoleh kadar NRL yang paling efektif dalam meningkatkan kinerja campuran.
4. Menganalisis aspek biaya penggunaan campuran *AC-WC* berbasis *RAP* dengan penambahan NRL dibandingkan dengan campuran konvensional, untuk mengetahui potensi efisiensi biaya dan kelayakannya sebagai alternatif campuran perkerasan jalan yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemanfaatan *Reclaimed Asphalt Pavement* atau *RAP* sebagai material daur ulang pada campuran *AC-WC*. *RAP* berpotensi mengurangi penggunaan material baru dan limbah perkerasan, tetapi aspal lama yang terkandung di dalamnya dapat meningkatkan kekakuan campuran. Oleh karena itu, penambahan *Natural Rubber Latex* atau *NRL* digunakan sebagai upaya untuk memperbaiki kinerja campuran, terutama terhadap karakteristik Marshall dan ketahanan terhadap pelepasan butir. Berikut Manfaat dalam penelitian ini, yaitu:

1. Mengoptimalkan Pemanfaatan *RAP* dalam Mendukung Kinerja Jalan Secara Struktural

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif pemanfaatan material *Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)* dalam campuran *AC-WC* dengan penambahan *Natural Rubber Latex (NRL)*. Pemanfaatan *RAP* dengan bahan tambah *NRL* diharapkan tidak hanya mampu menghasilkan campuran beraspal yang memenuhi persyaratan teknis, tetapi juga dapat mendukung kinerja jalan secara struktural dan fungsional. Secara struktural, campuran diharapkan memiliki kemampuan yang baik dalam menahan beban lalu lintas melalui peningkatan stabilitas, kekakuan, dan ketahanan terhadap deformasi. Secara fungsional, campuran diharapkan dapat mempertahankan kenyamanan, keamanan, dan durabilitas lapis permukaan melalui peningkatan ketahanan terhadap pelepasan butir, retak, serta penurunan kualitas akibat pengaruh lingkungan dan beban lalu lintas.

2. Meningkatkan Karakteristik Marshall Campuran Beraspal

Penelitian ini bermanfaat untuk mengetahui pengaruh penambahan NRL terhadap karakteristik Marshall pada campuran AC-WC berbasis RAP. Parameter yang ditinjau meliputi stabilitas, kelelahan (*flow*), *Marshall Quotient* (MQ), serta parameter volumetrik campuran. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menunjukkan sejauh mana penambahan NRL mampu memperbaiki kinerja campuran dalam menerima beban lalu lintas.

3. Mengurangi Potensi Kerusakan *Ravelling* pada Permukaan Jalan

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan campuran AC-WC berbasis RAP yang memiliki ketahanan lebih baik terhadap pelepasan butiran agregat atau *ravelling*. Penambahan NRL diharapkan dapat membantu meningkatkan ikatan antara aspal dan agregat, sehingga campuran lebih tahan terhadap kehilangan berat, pelepasan butir, serta penurunan durabilitas akibat pengaruh lalu lintas dan lingkungan.

4. Mendukung Pemanfaatan Material Lokal

Penggunaan NRL sebagai bahan tambah dalam campuran beraspal dapat mendukung pemanfaatan sumber daya lokal, khususnya karet alam. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan kinerja campuran beraspal, tetapi juga mendukung penggunaan material lokal dalam bidang konstruksi jalan.

1.6 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah dalam penelitian penulis adalah:

1. Penelitian ini dilakukan pada lapisan perkerasan AC-WC.
2. Aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70 yang berasal dari laboratorium.
3. Material Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Pemalang Batang Toll Road (PT PBTR).
4. Agregat yang digunakan dalam campuran berasal dari Pasir Muntilan.
5. Penelitian hanya dilakukan sebatas pengujian laboratorium.

6. *Natural Rubber Latex* (NRL) yang digunakan merupakan lateks karet alam dengan kadar *Dry Rubber Content* (DRC) sebesar 60%.
7. Variasi kadar NRL yang digunakan dalam campuran adalah 0%, 3%, dan 5% terhadap berat aspal baru.
8. Pengujian kinerja campuran dibatasi pada pengujian Marshall dan Cantabro Loss.
9. Penelitian ini juga menganalisis perbandingan Harga Pokok Produksi (HPP) antara campuran aspal konvensional dan campuran AC-WC berbasis RAP dengan variasi kadar NRL untuk mengetahui efisiensi biaya penggunaan material modifikasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aspal

Salah satu bangunan sipil yang banyak memanfaatkan aspal sebagai material utama adalah jalan. Jalan memiliki peranan penting sebagai prasarana transportasi darat karena berfungsi menghubungkan berbagai wilayah, pusat kegiatan, dan simpul transportasi, sehingga dapat mendukung mobilitas masyarakat serta distribusi barang dan jasa. Dalam sistem transportasi, jaringan jalan juga berperan dalam memperlancar arus lalu lintas dan meningkatkan efisiensi perjalanan. Hal ini sejalan dengan ketentuan Undang-Undang tentang Jalan yang menyatakan bahwa jalan merupakan bagian dari prasarana transportasi serta memiliki peran penting dalam bidang ekonomi, sosial, budaya, dan kehidupan masyarakat (Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan, 2004).

Perkerasan jalan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat utama dikenal sebagai perkerasan lentur atau *flexible pavement*. Perkerasan lentur merupakan struktur berlapis yang tersusun atas lapis aus (*wearing layer*), lapis pengikat (*binder layer*), lapis pondasi atas (*base course*), lapis pondasi bawah (*subbase course*), dan tanah dasar (*subgrade*), yang bekerja bersama untuk menerima serta menyebarkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya (Mohamed & Al-Sherrawi, 2024). Karena sifatnya yang lebih fleksibel dibandingkan perkerasan kaku, perkerasan lentur mampu menahan lendutan akibat beban kendaraan dan memberikan kenyamanan yang lebih baik bagi pengguna jalan (Marlina et al., 2023).

Aspal merupakan material hidrokarbon berwarna coklat tua hingga hitam yang memiliki kekentalan tinggi dan berperan sebagai bahan pengikat dalam campuran perkerasan. Dalam konstruksi jalan, aspal berfungsi sebagai perekat yang kedap air, termoplastis, dan viskoelastis, sehingga banyak digunakan pada perkerasan jalan, area parkir, landasan pacu, serta infrastruktur transportasi lainnya (Britannica Editors, 2026). Sifat termoplastis aspal ditunjukkan dari kemampuannya melunak ketika dipanaskan dan kembali mengeras saat suhu menurun. Aspal memiliki kepekaan terhadap suhu, di mana sifat viskoelastisnya berubah sesuai dengan perubahan suhu. Dalam kondisi panas, aspal

cenderung menjadi lebih lunak dan mudah mengalami deformasi, sedangkan pada suhu rendah, kekerasannya meningkat. Sifat ini penting dalam perencanaan dan penerapan campuran aspal di berbagai kondisi iklim dan beban lalu lintas di lapangan (Bi et al., 2025)

Aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal penetrasi 60/70 karena merupakan jenis aspal keras yang umum digunakan pada campuran beraspal panas sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Aspal Pen 60/70 dipilih karena memiliki karakteristik yang sesuai untuk kondisi iklim dan lalu lintas di Indonesia serta banyak digunakan pada lapisan AC-WC.

Aspal memiliki beberapa sifat penting yang harus diperhatikan. Berikut adalah sifat-sifat utama aspal menurut tersebut:

1. Daya tahan (Stabilitas)

Stabilitas adalah kemampuan campuran beraspal untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen. Nilai stabilitas menunjukkan kekuatan campuran dalam menahan tekanan sebelum terjadi kerusakan. Pengujian stabilitas umumnya dilakukan dengan metode Marshall sesuai standar yang digunakan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025)

2. Kekentalan (*Viscosity*)

Viskositas adalah ukuran kekentalan aspal yang menunjukkan kemampuan aspal untuk mengalir pada temperatur tertentu. Parameter ini penting dalam proses pencampuran dan pemadatan karena mempengaruhi *workability* campuran beraspal. Pengujian viskositas mengacu pada metode standar seperti SNI 06-6721:2002 (Badan Standarnisasi Nasional, 2002).

3. Penetrasi

Penetrasi adalah ukuran kekerasan atau konsistensi aspal yang dinyatakan dari dalamnya jarum standar yang menembus aspal pada kondisi tertentu. Semakin besar nilai penetrasi, maka aspal semakin lunak. Pengujian ini mengacu pada SNI 2456:2011 (Badan Standarnisasi Nasional, 2011c)

4. Titik lembek (Softening Point)

Titik lembek adalah suhu di mana aspal mulai melunak hingga mencapai kondisi tertentu. Parameter ini menunjukkan ketahanan aspal terhadap temperatur tinggi. Pengujian titik lembek mengacu pada SNI 2434:2011 (Badan Standarnisasi Nasional, 2011b).

5. Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan aspal untuk meregang sebelum putus, yang menunjukkan sifat elastisitas aspal. Nilai daktilitas yang tinggi menunjukkan aspal lebih tahan terhadap retak. Pengujian ini mengacu pada SNI 2432:2011 (Badan Standarnisasi Nasional, 2011a).

6. VIM (*Void in the Mix*)

VIM adalah persentase rongga udara yang terdapat di dalam campuran beraspal setelah dipadatkan. Nilai VIM menunjukkan seberapa banyak ruang kosong dalam campuran yang dapat diisi udara atau air. Jika VIM terlalu besar, campuran akan mudah dimasuki air dan udara sehingga mempercepat kerusakan, sedangkan jika terlalu kecil dapat menyebabkan bleeding. Oleh karena itu, nilai VIM harus berada dalam batas spesifikasi agar campuran memiliki durabilitas yang baik (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

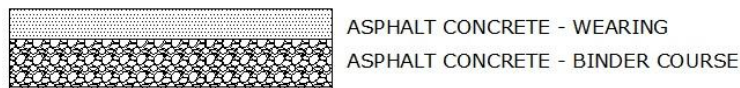
7. VMA (*Void in Mineral Aggregate*)

VMA adalah volume rongga antar butiran agregat dalam campuran yang mencakup rongga udara dan aspal efektif. VMA menunjukkan kemampuan agregat dalam menampung aspal. Nilai VMA yang cukup diperlukan agar aspal dapat menyelimuti agregat dengan baik, sehingga meningkatkan daya tahan dan kekuatan campuran (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

8. VFA (*Voids Filled with asphalt*)

VFA adalah persentase rongga dalam agregat (VMA) yang terisi oleh aspal. Parameter ini menunjukkan seberapa besar rongga agregat yang berhasil diisi oleh

aspal. Nilai VFA yang terlalu rendah menandakan campuran kurang aspal, sedangkan nilai yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu lunak. Oleh karena itu, nilai VFA harus memenuhi spesifikasi agar keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas tetap terjaga (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).



Gambar 2. 1 Gambar Jenis Perkerasan

Berdasarkan Gambar 2.1 jenisnya aspal dibedakan menjadi:

a. *AC-WC*

Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC) atau Laston Lapis Aus merupakan lapisan perkerasan aspal yang ditempatkan pada bagian paling atas struktur jalan. Lapisan ini berfungsi sebagai lapisan permukaan yang langsung berhubungan dengan beban kendaraan dan kondisi lingkungan, seperti air hujan, perubahan suhu, serta gesekan roda kendaraan. Oleh karena itu, AC-WC perlu memiliki karakteristik yang baik dari segi stabilitas, keawetan, kedapangan terhadap air, serta kenyamanan permukaan jalan bagi pengguna. Dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, AC-WC dikategorikan sebagai salah satu jenis Lapis Aspal Beton atau Laston, bersama dengan AC-BC dan AC-Base (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018).

b. *AC-BC*

Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC) atau Laston Lapis Antara merupakan lapisan perkerasan aspal yang berada di antara lapis permukaan dan lapis fondasi. Lapisan ini berfungsi sebagai penghubung sekaligus lapisan struktural yang membantu menyalurkan beban lalu lintas dari lapisan atas ke lapisan di bawahnya. Berbeda dengan AC-WC yang lebih menekankan pada kenyamanan dan ketahanan permukaan, AC-BC lebih diarahkan untuk memberikan kekuatan struktural, stabilitas, dan ketahanan terhadap deformasi akibat beban kendaraan. Menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, AC-BC termasuk ke dalam kelompok

Lapis Aspal Beton atau Laston sebagai lapis antara, dengan tebal nominal minimum 6 cm (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018).

2.2 Agregat

Agregat merupakan material granular berupa butiran mineral seperti batu pecah, kerikil, pasir, maupun bahan pengisi yang digunakan sebagai komponen utama dalam pekerjaan konstruksi, khususnya pada perkerasan jalan. Agregat berfungsi sebagai kerangka utama campuran beraspal yang memengaruhi kekuatan, stabilitas, dan durabilitas lapis perkerasan (Smith & Collis, 2001; Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2). Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat., 2020). Dalam campuran beraspal panas, agregat tidak hanya berfungsi sebagai bahan pengisi, tetapi juga membentuk kerangka utama campuran yang menahan beban lalu lintas. Spesifikasi Bina Marga menjelaskan bahwa agregat untuk campuran beraspal harus memenuhi persyaratan rumusan campuran kerja, disetujui sebelum digunakan, serta memiliki sifat tertentu seperti kebersihan, kekerasan, keawetan, dan bebas dari lempung atau bahan lain yang tidak dikehendaki (Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2020)

Dalam perkerasan aspal, agregat umumnya dibedakan menjadi agregat kasar, agregat halus, dan bahan pengisi atau *filler*. Agregat kasar berperan membentuk struktur rangka campuran yang kuat, sedangkan agregat halus mengisi rongga antarbutiran agregat kasar agar campuran menjadi lebih rapat dan stabil. Agregat merupakan elemen penting dalam konstruksi, pemeliharaan, dan rehabilitasi perkerasan aspal, perkerasan beton, lapis fondasi jalan, serta sistem drainase. Oleh karena itu, pemilihan agregat perlu dipertimbangkan sejak tahap perencanaan dan desain campuran agar kinerja perkerasan dapat bertahan sesuai umur rencana (FHWA, 2024). Dari beberapa pendapat tersebut, agregat dapat diartikan sebagai kumpulan butiran batuan dengan ukuran tertentu yang diperoleh dari alam maupun hasil pemecahan batu, serta digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran konstruksi.

Kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap kinerja campuran aspal, terutama terhadap stabilitas, ketahanan deformasi, keawetan, dan kemampuan campuran dalam menerima beban lalu lintas. Campuran aspal panas pada dasarnya tersusun dari dua bahan utama, yaitu agregat dan bahan pengikat aspal, sehingga proses desain campuran

bertujuan menentukan jenis agregat, jenis aspal, serta komposisi optimum keduanya (HMA Mix Design Fundamentals, 2025). Penelitian internasional juga menunjukkan bahwa gradasi agregat memiliki pengaruh penting terhadap parameter volumetrik dan ketahanan alur (*rutting*) pada campuran aspal; struktur gradasi yang lebih optimal dapat meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan deformasi akibat beban kendaraan (Li et al., 2022; Zhu et al., 2024).

2.3 Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

RAP merupakan material hasil pembongkaran atau penggilingan lapisan perkerasan aspal lama yang dapat digunakan kembali sebagai bahan campuran dalam konstruksi perkerasan jalan baru. RAP terdiri atas agregat yang masih terlapisi oleh aspal lama sehingga masih memiliki nilai guna sebagai material daur ulang dalam campuran beraspal (Widayanti et al., 2020). Pemanfaatan RAP menjadi salah satu alternatif yang efektif dalam mengurangi penggunaan material baru serta mendukung konsep pembangunan berkelanjutan di bidang konstruksi jalan (Nono & Hamdani, 2021).

RAP merupakan material hasil pembongkaran atau penggilingan lapisan perkerasan aspal lama yang telah rusak atau mencapai akhir umur layan, yang kemudian dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan campuran pada perkerasan jalan baru. Material ini diperoleh melalui proses *cold milling* dan masih mengandung agregat serta aspal lama yang melekat pada agregat tersebut sehingga memiliki nilai guna sebagai material daur ulang (Sulaiman & Kurniati, 2025). Pemanfaatan *RAP* menjadi salah satu inovasi dalam konstruksi jalan karena mampu mengurangi kebutuhan material baru serta mendukung efisiensi sumber daya dan pembangunan berkelanjutan (Prawistamandala, 2023).

Namun, aspal yang terdapat dalam RAP telah mengalami proses penuaan (*aging*) akibat paparan suhu, oksidasi, dan beban lalu lintas selama masa pelayanan jalan. Proses penuaan aspal dapat disebabkan oleh penguapan fraksi minyak ringan, oksidasi, serta perubahan temperatur, yang kemudian menyebabkan aspal menjadi lebih keras dan kaku sehingga memengaruhi kinerja campuran (Podungge et al., 2022). Pada material RAP, penuaan selama masa layan menyebabkan sebagian sifat reologi dan mekanik aspal menurun, sehingga campuran yang menggunakan RAP cenderung lebih kaku dan

berpotensi mengalami keretakan (Sepriyanna et al., 2025). Kondisi tersebut berdampak pada penurunan durabilitas campuran, terutama terhadap kerusakan seperti retak dan pelepasan butiran agregat (*raveling*) (National Academies of Sciences, 2025; Podungge et al., 2022) Sumber yang saya temukan menyebut penuaan aspal dapat menyebabkan pengerasan dan kekakuan, serta penuaan jangka panjang selama masa pelayanan membuat aspal lebih keras dan getas. Sumber lain tentang RAP juga menyebut aspal RAP telah mengalami penuaan selama masa layan sehingga kehilangan sebagian sifat reologi dan mekaniknya.

Majidifard et al. (2019) menyatakan bahwa campuran dengan kadar RAP tinggi lebih rentan terhadap retak suhu rendah dan memiliki masalah *workability* akibat meningkatnya kekakuan binder RAP. Kondisi ini dapat berkontribusi pada pelepasan butiran (*ravelling*) jika ikatan agregat–aspal melemah-

Salah satu kelemahan penggunaan RAP dalam campuran beraspal adalah potensi terjadinya penurunan daya lekat antara aspal dan agregat akibat kondisi binder lama yang telah mengalami penuaan. Penurunan daya lekat tersebut dapat menyebabkan ikatan antarbutir agregat menjadi kurang kuat, sehingga campuran lebih rentan mengalami pelepasan butiran pada permukaan perkerasan. Kondisi inilah yang kemudian dapat berkembang menjadi kerusakan berupa *raveling*, terutama apabila komposisi campuran, kadar aspal, dan kemampuan bahan pengikat dalam menyelimuti agregat tidak bekerja secara optimal.

Raveling atau *ravelling* merupakan kerusakan jalan berupa pelepasan butiran agregat pada permukaan perkerasan akibat hilangnya ikatan antara agregat dan aspal. Kerusakan ini dapat terjadi karena menurunnya nilai kohesi dan adhesi pada campuran beraspal, terutama ketika rongga dalam campuran memungkinkan air dan udara masuk sehingga melemahkan ikatan aspal-agregat (Susanto et al., 2021). Ketahanan terhadap *raveling* sangat dipengaruhi oleh kualitas material, komposisi campuran, serta kemampuan bahan pengikat dalam mempertahankan daya lekat antara aspal dan agregat. Penambahan bahan tertentu, seperti limbah plastik polypropylene (PP) atau polivinil klorida (PVC), dilaporkan dapat meningkatkan ketahanan campuran terhadap *ravelling* melalui penurunan nilai abrasi atau *Cantabro Loss* (Helmi, 2025; Susanto et al., 2021)

Penggunaan *RAP* memiliki banyak keuntungan menurut (Widayanti et al., 2018), antara lain:

1. Ekonomis
Mengurangi kebutuhan agregat dan aspal baru.
2. Ramah Lingkungan
Mengurangi limbah konstruksi dan penggunaan sumber daya alam.
3. Efisiensi Energi
Mengurangi energi produksi material baru.

Secara global, *RAP* telah digunakan luas dan menjadi praktik umum dalam konstruksi jalan di berbagai negara. Meskipun memiliki banyak keunggulan, *RAP* juga memiliki keterbatasan menurut (Sepriyanna et al., 2025):

1. Aspal pada *RAP* mengalami penuaan (*aging*) akibat paparan oksigen, sinar matahari, perubahan temperatur, dan beban lalu lintas selama masa pelayanan perkerasan. Proses ini menyebabkan aspal menjadi lebih keras, kaku, dan berkurangnya sifat elastis sehingga dapat memengaruhi kinerja campuran. Menyebabkan campuran menjadi kaku dan rapuh.
2. Variabilitas material *RAP* yang tinggi dipengaruhi oleh kondisi dan sumber perkerasan jalan asal sehingga menyebabkan perbedaan karakteristik material.
3. Ikatan antara aspal dan agregat pada *RAP* mengalami penurunan akibat proses penuaan (*aging*) pada aspal sehingga daya lekat berkurang, yang dapat memengaruhi kinerja campuran dan meningkatkan potensi terjadinya *ravelling*.
4. Penggunaan *RAP* umumnya memerlukan bahan tambahan seperti *rejuvenator* atau *modifier* untuk mengembalikan sifat aspal mendekati kondisi awal

Penelitian menyebutkan bahwa penggunaan bahan peremaja (*rejuvenator*) diperlukan untuk mengembalikan sifat reologi aspal lama.

2.4 *Natural rubber latex (NRL)*

NRL merupakan bahan alami yang berasal dari getah pohon karet (*Hevea brasiliensis*) dalam bentuk sistem koloid dan termasuk material terbarukan. NRL dari *Hevea brasiliensis* dijelaskan sebagai material terbarukan, sementara Wen et al. membahas NRL sebagai modifier berkelanjutan untuk binder aspal (Andrade et al., 2022; Wen et al., 2017b). Dalam konteks perkerasan jalan, penggunaan NRL menjadi salah satu alternatif material modifikasi yang berbasis sumber daya lokal dan ramah lingkungan.

NRL memiliki kandungan utama berupa partikel karet, air, protein, lipid, karbohidrat, serta sejumlah mineral dalam jumlah kecil. Sifat elastomer yang dimiliki menyebabkan NRL mampu memberikan peningkatan fleksibilitas pada bahan pengikat aspal. Penambahan NRL pada campuran beraspal bertujuan untuk meningkatkan kemampuan aspal dalam menerima beban lalu lintas, mengurangi kerusakan akibat deformasi, serta meningkatkan ketahanan campuran terhadap pengaruh lingkungan dan perubahan temperatur. Selain itu, penggunaan bahan berbasis karet alam juga dinilai lebih ramah lingkungan karena berasal dari sumber daya terbarukan dibandingkan bahan modifikasi sintesis (Al-Sabaei et al., 2019).

Sifat elastis yang dimiliki NRL diperkirakan mampu meningkatkan daya lekat (*adhesion*) dan kohesi campuran sehingga ikatan antara agregat dan aspal menjadi lebih baik. Ikatan yang meningkat akan membantu campuran dalam menahan pelepasan agregat akibat gaya gesek maupun beban kendaraan. Oleh karena itu, penggunaan NRL berpotensi meningkatkan ketahanan campuran terhadap kerusakan permukaan seperti *ravelling* dan kehilangan material pada lapisan aus (*wearing course*) (Hermadi et al., 2021; Al-Sabaei et al., 2019).

Penambahan NRL pada campuran beraspal juga dapat mempengaruhi sifat adhesi dan kohesi campuran. Adhesi merupakan kemampuan aspal melekat pada permukaan agregat, sedangkan kohesi berkaitan dengan kekuatan internal pengikat aspal itu sendiri. Kedua sifat tersebut sangat berpengaruh terhadap kualitas lapisan aus karena berhubungan langsung dengan ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran agregat.

Semakin baik nilai adhesi dan kohesi maka potensi terjadinya *ravelling* akan semakin kecil (Mashaan et al., 2013).

Dalam bidang perkerasan jalan, penambahan NRL diketahui dapat meningkatkan karakteristik aspal melalui perubahan sifat reologi binder. Aspal yang dimodifikasi menggunakan bahan berbasis lateks umumnya memiliki elastisitas yang lebih baik sehingga campuran menjadi lebih lentur dan mampu mereduksi kerusakan akibat beban berulang. Peningkatan elastisitas tersebut menyebabkan distribusi tegangan pada lapisan perkerasan menjadi lebih merata sehingga potensi kerusakan seperti retak, deformasi permanen, dan pelepasan agregat dapat dikurangi (Suaryana & Sofyan, 2019).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan NRL pada campuran beraspal memberikan pengaruh positif terhadap karakteristik Marshall. Suaryana dan Sofyan (2019) menjelaskan bahwa penggunaan bahan berbasis lateks pada campuran beraspal mampu meningkatkan stabilitas campuran serta memperbaiki karakteristik mekanis dibandingkan campuran tanpa modifikasi. Peningkatan stabilitas tersebut menunjukkan bahwa campuran memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menerima beban dan mempertahankan bentuknya saat menerima gaya dari lalu lintas kendaraan. Selain itu, penambahan NRL juga berpotensi meningkatkan nilai *Marshall Quotient* yang menunjukkan peningkatan kekakuan dan ketahanan deformasi campuran.

Penambahan NRL atau karet alam pada campuran aspal telah banyak diteliti dengan variasi kadar yang berbeda. Beberapa penelitian menggunakan kadar 3% dan 5% sebagai variasi campuran untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap stabilitas Marshall, modulus resilien, ketahanan deformasi, dan karakteristik mekanik campuran aspal (Chandra et al., 2026; Hoy et al., 2024; Nirwana et al., 2025; Sholichin & Wahjudijanto, 2023; WIDIANTO & FAISAL, 2020). Selain itu, NRL juga dapat meningkatkan daya lekat (*adhesion*) antara aspal dan agregat, sehingga mengurangi potensi terjadinya raveling dan raveling pada permukaan jalan. Pada campuran beraspal, NRL terbukti dapat meningkatkan karakteristik mekanik seperti tensile strength, stiffness modulus, fatigue life, serta kinerja lingkungan dibanding campuran konvensional (Suwarto et al., 2023)

Penggunaan NRL Penggunaan karet alam dalam aspal juga relevan dengan pemanfaatan sumber daya lokal dan peningkatan konsumsi karet alam domestik Bina Marga menyebut teknologi aspal karet dapat meningkatkan ketahanan terhadap temperatur dan deformasi sekaligus meningkatkan konsumsi karet alam dalam negeri; Kemenperin juga menyebut pemanfaatan aspal karet sebagai upaya peningkatan penyerapan karet alam domestik (Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum, 2023; Kementerian Perindustrian Republik Indonesia, 2020). Oleh karena itu, penggunaan NRL tidak hanya memberikan manfaat teknis tetapi juga manfaat ekonomi dan lingkungan.

2.5 Uji Kinerja Marshall pada Aspal

Uji Marshall merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi karakteristik campuran beraspal melalui parameter stabilitas dan keelehan plastis (flow). Pengujian ini mengacu pada prinsip Marshall Stability and Flow, yaitu pengukuran beban maksimum yang mampu diterima benda uji sebelum mengalami keruntuhan serta besarnya deformasi yang terjadi pada saat pembebanan. Berdasarkan standar ASTM D6927-22, hasil uji Marshall dapat digunakan untuk mengevaluasi stabilitas, flow, kepadatan, rongga udara dalam campuran, serta parameter volumetrik lainnya yang berhubungan dengan penentuan kadar aspal optimum pada campuran beraspal (ASTM International, 2022). Dalam pelaksanaannya, alat Marshall dilengkapi dengan sistem pembebanan, proving ring atau load cell, serta flow meter untuk membaca besarnya deformasi plastis benda uji selama proses pembebanan. Parameter utama yang diperoleh dari pengujian Marshall meliputi stabilitas, flow, VIM (Void in Mix), VMA (Void in Mineral Aggregate), VFA (Void Filled with Asphalt), dan Marshall Quotient (MQ).

Setelah dilakukan pengujian Marshall, maka akan diperoleh beberapa parameter yang digunakan untuk mengevaluasi karakteristik campuran beraspal, yaitu sebagai berikut:

1. Stabilitas, yaitu nilai beban maksimum yang mampu diterima oleh benda uji sebelum mengalami keruntuhan. Stabilitas menunjukkan kemampuan campuran aspal dalam menahan beban lalu lintas serta ketahanan terhadap deformasi permanen seperti *rutting* dan *shoving* (Asi et al., 2024; Awan et al., 2022).

2. Kelelahan plastis (*flow*), yaitu besarnya deformasi atau perubahan bentuk benda uji pada saat menerima beban maksimum. Nilai *flow* dinyatakan dalam satuan mm dan digunakan sebagai indikator kelenturan campuran beraspal. Nilai *flow* yang terlalu rendah menunjukkan campuran cenderung kaku dan mudah retak, sedangkan nilai *flow* yang terlalu tinggi menunjukkan campuran terlalu plastis dan mudah mengalami deformasi (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022)
3. VIM (*Void In Mix*), yaitu persentase rongga udara yang terdapat di dalam campuran beraspal yang telah dipadatkan. Nilai VIM menunjukkan tingkat kepadatan campuran dan berpengaruh terhadap durabilitas perkerasan. VIM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran mudah dimasuki air dan udara sehingga mempercepat kerusakan, sedangkan VIM yang terlalu rendah dapat menyebabkan campuran mudah mengalami *bleeding* (ASTM International, 2022; Khan et al., 2025)
4. VMA (*Void in Mineral Agregat*), yaitu persentase rongga antarbutir agregat dalam campuran beraspal yang telah dipadatkan, termasuk rongga yang terisi aspal dan rongga udara. Nilai VMA menunjukkan ruang yang tersedia untuk menampung aspal dalam campuran. VMA yang cukup diperlukan agar aspal dapat menyelimuti agregat dengan baik sehingga campuran memiliki daya lekat dan durabilitas yang baik (ASTM International, 2022; Khan et al., 2025)
5. *Marshall Question*, yaitu nilai perbandingan antara stabilitas dan *flow* yang dinyatakan dalam satuan kg/mm atau kN/mm. Nilai MQ digunakan sebagai pendekatan untuk menunjukkan tingkat kekakuan campuran beraspal dalam menerima beban. Semakin tinggi nilai MQ, maka campuran cenderung semakin kaku, sedangkan nilai MQ yang terlalu rendah menunjukkan campuran lebih plastis dan kurang mampu menahan deformasi (Awan et al., 2022; Khan et al., 2025)

2.6 Pengujian Cantabro Loss

Cantabro Loss merupakan parameter pengujian yang digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap kehilangan massa akibat abrasi, tumbukan, dan pelepasan butiran agregat. Parameter ini berkaitan dengan fenomena raveling, yaitu kerusakan permukaan berupa terlepasnya agregat dari lapisan perkerasan

akibat lemahnya ikatan antara aspal dan agregat, pengaruh beban lalu lintas, penuaan aspal, serta menurunnya daya lekat pada antarmuka aspal-agregat (Abouelsaad & White, 2022b). Pengujian Cantabro dilakukan menggunakan mesin Los Angeles Abrasion tanpa bola baja, kemudian benda uji diputar dalam jumlah putaran tertentu untuk mengetahui persentase kehilangan berat setelah pengujian. Standar AASHTO T 401-22 menjelaskan bahwa pengujian Cantabro digunakan untuk menentukan persentase kehilangan abrasi pada benda uji campuran aspal menggunakan mesin Los Angeles Abrasion (AASHTO, 2022a).

Nilai *Cantabro Loss* dinyatakan sebagai persentase kehilangan berat benda uji sebelum dan sesudah pengujian. Semakin kecil nilai Cantabro Loss, maka semakin baik ketahanan campuran terhadap pelepasan agregat, sedangkan nilai Cantabro Loss yang tinggi menunjukkan bahwa campuran lebih mudah mengalami keausan, disintegrasi, dan kerusakan permukaan. Pada campuran beraspal yang menggunakan material daur ulang seperti RAP, pengujian Cantabro dapat digunakan sebagai indikator durabilitas dan ketahanan aus campuran. Meena et al. (2024) menggunakan Cantabro Abrasion Loss untuk menilai ketahanan kohesi campuran aspal daur ulang berbasis RAP, sedangkan Carruth et al. (2023) menggunakan Cantabro Mass Loss dalam evaluasi campuran berbasis RAP dan bahan pengikat polimer. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian Cantabro relevan digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran beraspal terhadap kehilangan massa, khususnya pada campuran yang mengandung material daur ulang (Carruth et al., 2023; Meena et al., 2024).

Dalam konteks penelitian ini, Cantabro Loss digunakan untuk mengevaluasi ketahanan campuran AC-WC berbasis RAP dengan penambahan NRL terhadap pelepasan agregat. Penambahan NRL pada campuran aspal berfungsi meningkatkan elastisitas, daya lekat, dan karakteristik mekanik campuran, sehingga berpotensi mengurangi kehilangan agregat akibat abrasi dan pembebanan berulang. Ramadhani et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan lateks pravulkanisasi pada campuran AC-WC dapat meningkatkan stabilitas Marshall dan modulus kekakuan campuran (Ramadhani et al., 2024). Selain itu, Udomchai et al. (2024) dan Yeanyong et al. (2024) juga menunjukkan bahwa penggunaan karet alam pada campuran aspal dapat

meningkatkan performa mekanik campuran, seperti stabilitas, kekuatan tarik tidak langsung, modulus resilien, ketahanan terhadap *rutting*, dan ketahanan terhadap kelelahan (Udomchai et al., 2024; Yeanyong et al., 2024). Oleh karena itu, dengan membandingkan nilai Cantabro Loss pada setiap variasi campuran, dapat diketahui sejauh mana efektivitas penambahan NRL dalam meningkatkan durabilitas campuran AC-WC berbasis RAP terhadap pelepasan agregat.

1. Rumus *Cantabro Loss* :

$$CL = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

Keterangan:

W1 = berat awal benda uji

W2 = berat setelah pengujian

2.7 Peneliti Terdahulu

Penelitian sebelumnya terkait Penelitian terdahulu menjadi landasan penelitian ini:

Penelitian	Metode & Material	Hasil Utama	Keterbatasan/Gap
Wang et al., 2023	Eksperimen pembagian gradasi RAP dan penambahan rejuvenator.	Pembagian gradasi RAP membantu mengurangi variasi material dan meningkatkan kinerja campuran daur ulang.	Belum membahas RAP dengan NRL/latex pada AC-WC dan Cantabro.
Song, Lu, Feng, & Wu, 2026	Uji campuran recycled asphalt dengan variasi RAP dan regenerator.	kadar RAP sebaiknya tidak melebihi 30% untuk memastikan kinerja dan stabilitas perkerasan yang memadai.	RAP tinggi tetap berisiko membuat campuran lebih kaku akibat aspal tua.
Suwarto et al., 2025	Analisis mechanistic-empirical design dan life cycle cost pada campuran aspal NRL.	NRL terbukti meningkatkan ketahanan deformasi permanen dan retak lelah pada skala laboratorium.	Belum khusus membahas RAP 30%, AC-WC, dan Cantabro.
Paotong et al., 2020a	Uji UCS dan CBR pada RAP dengan semen dan NRL 5–15%.	RAP dengan semen dan NRL memenuhi spesifikasi UCS dan CBR untuk lapis perkerasan.	Masih untuk base/subbase, bukan lapisan aus AC-WC.

Nirwana et al., 2025	Uji Marshall dengan variasi karet alam 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5%.	Karet alam memengaruhi stabilitas, flow, density, VIM, VMA, VFB, dan MQ.	Belum menggunakan RAP dan belum menguji Cantabro/pengelupasan.
Carruth et al., 2023	Uji rutting, ITS, dan Cantabro mass loss pada RAP basah/kering dengan polymer binder.	RAP dengan polymer binder memiliki ketahanan rutting tinggi dan Cantabro mass loss mendekati campuran dense-graded.	Fokus pada perbaikan kecil lapangan terbang, bukan AC-WC dengan NRL.
Abdel-Jaber et al., 2022	Uji Marshall stability dan flow pada variasi RAP 25%, 50%, dan 75%.	Stabilitas meningkat seiring kenaikan RAP, dengan stabilitas maksimum pada RAP 75%.	Stabilitas tinggi belum tentu paling baik untuk lapis aus karena RAP tinggi dapat menurunkan fleksibilitas.
Nadhifah & Mahardi, 2025	Uji Marshall dan Marshall immersion pada AC-WC dengan RAP sebagai agregat halus.	Substitusi 25% RAP menghasilkan nilai IKS optimum 109%.	Belum memakai NRL/latex dan belum menguji Cantabro.
Xiao et al., 2023	Marshall design pada campuran permeable asphalt dengan RAP 10%, 20%, dan 30%.	RAP 30% digunakan sebagai salah satu variasi dan menunjukkan potensi	Jenis campuran bukan AC-WC, sehingga masih perlu kajian untuk lapisan aus.

		pemanfaatan RAP pada campuran aspal.	
Utami et al., 2020	Uji Marshall, UMATTA resilient modulus, dan four-point fatigue pada AC-BC dengan natural rubber latex 0%, 2%, dan 3%.	Natural rubber latex 3% menghasilkan stabilitas Marshall tertinggi dan menurunkan kadar aspal optimum.	Fokus pada AC-BC, bukan AC-WC berbasis RAP, dan belum menguji Cantabro/pengelupasan.
Al-Saffar et al., 2021	Uji Marshall, ITS, moisture damage, dan Cantabro loss pada 100% RAP dengan rejuvenator 2%, 3%, 4%, dan 5%.	RAP tanpa peremaja memiliki Cantabro loss tinggi, sedangkan penambahan 4% PelletRAP menurunkan Cantabro loss menjadi 7,07%.	Menggunakan rejuvenator komersial, bukan NRL, tetapi sangat relevan untuk pengelupasan RAP.
Prayuda, 2020	Uji Marshall, ITS, IRS, dan Cantabro Loss pada campuran SMA 0/11 dengan RAP dan peremaja 0–5%.	Semua variasi memenuhi syarat Cantabro Loss $\leq 20\%$, dan kadar peremaja 2–3% dapat digunakan pada campuran RAP.	Fokus pada SMA, bukan AC-WC dan bukan NRL, tetapi relevan sebagai dasar uji pengelupasan.

Berdasarkan penelitian terdahulu, RAP memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali sebagai material alternatif dalam campuran perkerasan jalan karena masih mengandung agregat dan aspal lama yang dapat digunakan kembali. Pemanfaatan RAP dapat mengurangi kebutuhan material baru, menekan biaya konstruksi, serta mengurangi limbah hasil pembongkaran perkerasan. Wang et al., 2023 menunjukkan bahwa pengaturan gradasi RAP melalui RAP Gradation Subdivision Method/RGSM mampu menurunkan variasi material, meningkatkan stabilitas, dan memperbaiki ketahanan campuran terhadap deformasi. Hal ini menunjukkan bahwa RAP dapat memberikan kinerja yang baik apabila gradasi dan karakteristik materialnya dikontrol dengan tepat.

Penelitian Song et al., 2026 juga memperkuat bahwa RAP dapat memberikan manfaat teknis, ekonomi, dan lingkungan pada campuran perkerasan. Pada campuran Coarse-Grained Recycled Asphalt Mixture/CRAM, peningkatan kadar RAP mampu memperbaiki ketahanan terhadap deformasi permanen atau rutting. Namun, penggunaan RAP dalam kadar tinggi tetap memiliki kelemahan karena aspal lama pada RAP telah mengalami penuaan sehingga campuran cenderung lebih kaku dan berpotensi menurunkan fleksibilitas serta ketahanan retak. Oleh karena itu, penggunaan RAP perlu dikombinasikan dengan bahan tambahan yang mampu membantu memperbaiki sifat elastis dan daya lekat campuran.

Selain RAP, beberapa penelitian menunjukkan bahwa NRL atau lateks karet alam berpotensi meningkatkan kinerja campuran aspal. (Suwanto et al., 2025) menyatakan bahwa modifikasi aspal menggunakan NRL mampu meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen dan retak lelah dibandingkan aspal konvensional. Campuran dengan NRL juga dinilai memiliki umur layanan yang lebih baik dan kebutuhan pemeliharaan yang lebih rendah, sehingga berpotensi menjadi bahan modifikasi yang ekonomis dan berkelanjutan. Hal ini menjadi dasar bahwa NRL dapat digunakan untuk memperbaiki kelemahan campuran yang cenderung kaku akibat penggunaan RAP.

Penelitian Paotong et al., 2020 tidak dilakukan pada campuran AC-WC, melainkan pada campuran lapisan base course dan subbase course berbasis RAP. Pada campuran RAP dengan semen dan NRL, penambahan NRL pada kadar tertentu mampu

meningkatkan nilai kuat tekan dan daya dukung material, sedangkan kadar NRL yang terlalu tinggi justru dapat menurunkan kekuatan campuran. Oleh karena itu, penelitian tersebut digunakan sebagai acuan awal bahwa kombinasi RAP dan NRL memiliki potensi dalam meningkatkan kualitas material daur ulang. Namun, karena objek penelitian Paotong et al. masih terbatas pada lapisan base course dan subbase course, hasilnya belum dapat digeneralisasikan langsung pada campuran lapis aus AC-WC. Perbedaan fungsi lapisan, gradasi, serta parameter kinerja menjadi alasan perlunya penelitian lebih lanjut pada campuran AC-WC berbasis RAP dengan penambahan NRL.

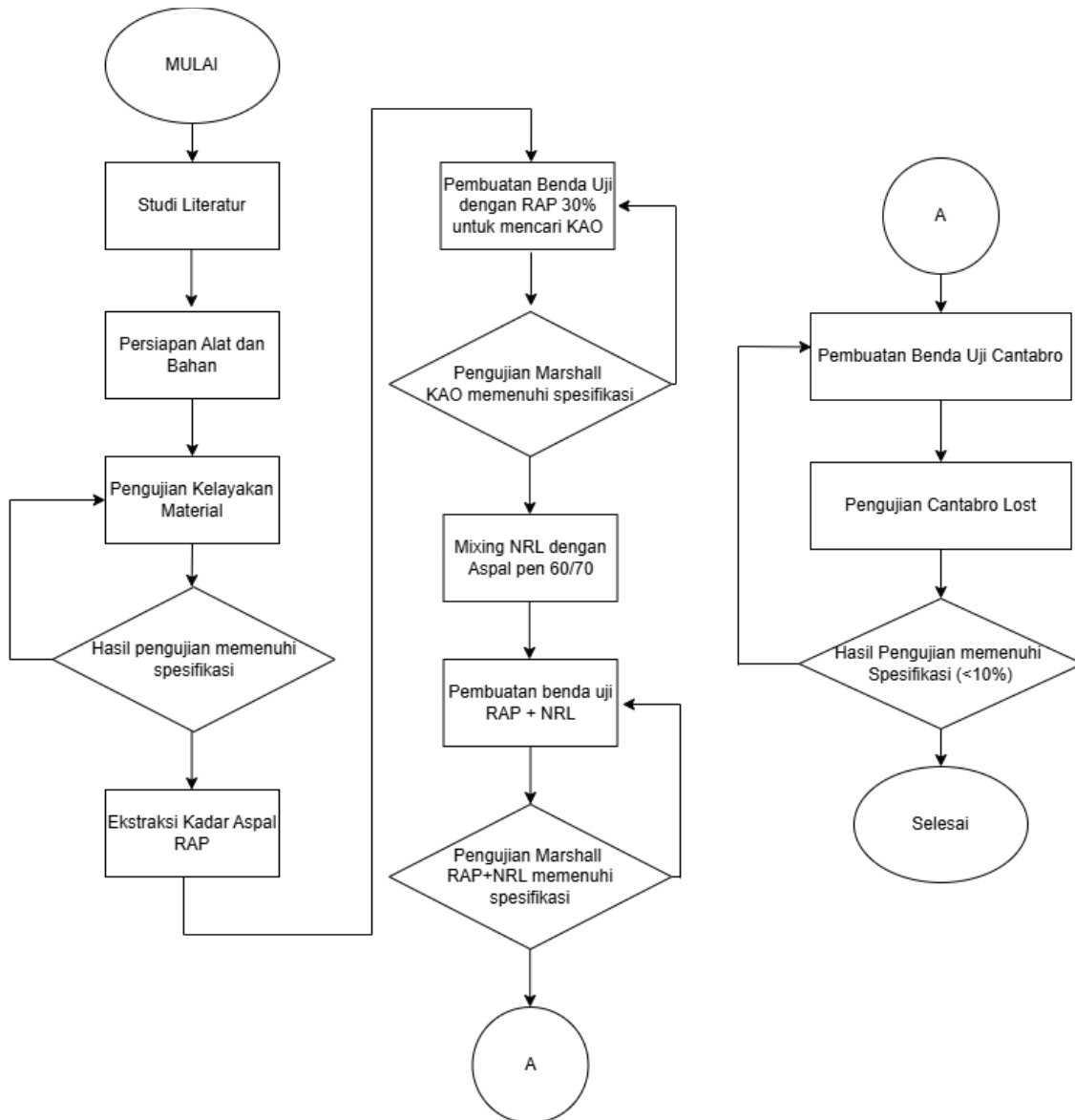
Penelitian lain juga menunjukkan adanya gap yang masih perlu dikaji lebih lanjut. Nirwana et al., (2025) menunjukkan bahwa penggunaan karet alam pada campuran aspal dapat meningkatkan karakteristik Marshall apabila digunakan pada kadar yang tepat, tetapi penelitian tersebut belum menggunakan RAP dan belum mengkaji ketahanan terhadap pelepasan butir melalui uji Cantabro. Sementara itu, Carruth et al., (2023) menunjukkan bahwa RAP yang dimodifikasi dengan bahan pengikat polimer memiliki ketahanan rutting dan ketahanan pelepasan butir yang baik berdasarkan uji Cantabro, namun penelitian tersebut masih difokuskan pada material perbaikan kecil untuk lapangan terbang, bukan pada campuran AC-WC dengan modifikasi NRL. Dengan demikian, pengujian Cantabro penting dilakukan karena lapisan AC-WC berada di permukaan dan lebih rentan terhadap abrasi, pengelupasan, serta kehilangan ikatan antarbutir akibat beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan.

Sementara itu, pemilihan kadar aspal dalam penelitian ini perlu mengacu pada Kadar Aspal Optimum/KAO karena kadar aspal berpengaruh langsung terhadap ikatan antaragregat, stabilitas, rongga campuran, dan potensi pelepasan butir. Kadar aspal yang terlalu rendah dapat menyebabkan ikatan agregat menjadi lemah sehingga risiko pengelupasan meningkat, sedangkan kadar aspal yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis, berpotensi mengalami bleeding, menurunkan stabilitas, dan mengganggu komposisi rongga campuran. Oleh karena itu, kombinasi RAP 30% dan variasi NRL 0%, 3%, dan 5% digunakan untuk mengevaluasi apakah penambahan NRL mampu mempertahankan stabilitas, meningkatkan fleksibilitas, serta memperbaiki

ketahanan campuran AC-WC terhadap pelepasan butir berdasarkan karakteristik Marshall dan uji Cantabro.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Rencana Penelitian



Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada campuran Laston (*AC-WC*) dengan menggunakan aspal penetrasi 60/70. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis pengaruh penggunaan *RAP* dan penambahan NRL terhadap karakteristik campuran aspal berdasarkan parameter *Marshall* dan *Cantabro Loss*.

Pelaksanaan penelitian dilakukan secara bertahap, dimulai dari persiapan material, pengujian karakteristik bahan, perencanaan campuran, pembuatan benda uji, hingga pengujian kinerja campuran.

Pada tahap awal, dilakukan persiapan material yang terdiri dari aspal penetrasi 60/70, agregat kasar, agregat halus, material *RAP*, serta bahan tambah NRL. Seluruh material yang digunakan harus memenuhi spesifikasi yang berlaku sebelum digunakan dalam campuran.

Selanjutnya dilakukan pengujian terhadap masing-masing material. Pengujian aspal meliputi:

- Uji penetrasi mengacu pada SNI 2456:2011 / *ASTM D5* / *AASHTO T49*

Pengujian penetrasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan atau konsistensi aspal. Nilai penetrasi menunjukkan kedalaman masuknya jarum standar ke dalam sampel aspal pada kondisi tertentu. Semakin kecil nilai penetrasi, maka aspal semakin keras; sebaliknya, semakin besar nilai penetrasi, maka aspal semakin lunak. Pengujian ini penting karena kekerasan aspal berpengaruh terhadap kemampuan aspal dalam mengikat agregat dan menahan beban lalu lintas. SNI 2456:2011 secara khusus mencakup penentuan nilai penetrasi bahan bitumen semi-padat dan padat.

- Uji titik lembek (*Ring and Ball*) mengacu pada SNI 2434:2011 / *ASTM D36* / *AASHTO T53*

Pengujian titik lembek dilakukan untuk mengetahui suhu saat aspal mulai mengalami perubahan sifat dari keras menjadi lebih lunak. Nilai titik lembek menunjukkan ketahanan aspal terhadap pengaruh suhu tinggi. Aspal dengan titik lembek yang lebih tinggi umumnya memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap

deformasi akibat suhu dan beban lalu lintas. Pengujian ini dilakukan dengan metode cincin dan bola atau *ring and ball*.

- Uji daktilitas mengacu pada SNI 2432:2011 / *ASTM D113* / *AASHTO T51*

Pengujian daktilitas dilakukan untuk mengetahui kemampuan aspal untuk memanjang atau meregang sebelum putus. Nilai daktilitas menunjukkan sifat elastisitas dan kemampuan aspal dalam mempertahankan ikatan. Aspal dengan daktilitas yang baik diharapkan mampu menahan retak dan deformasi pada campuran beraspal.

- Uji berat jenis aspal mengacu pada SNI 2441:2011 / *ASTM D70* / *AASHTO T228*

Pengujian berat jenis aspal dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara berat aspal terhadap volume tertentu. Nilai berat jenis digunakan dalam perhitungan campuran beraspal, khususnya pada analisis volumetrik campuran seperti VIM, VMA, dan VFB. SNI 2441:2011 mencakup penentuan berat jenis aspal keras menggunakan piknometer dan dapat digunakan untuk aspal keras maupun aspal modifikasi.

Pengujian agregat meliputi:

- Berat jenis dan penyerapan agregat kasar mengacu pada SNI 1969:2008 / *ASTM C127* / *AASHTO T85*
- Berat jenis dan penyerapan agregat halus mengacu pada SNI 1970:2008 / *ASTM C128* / *AASHTO T84*
- Analisa saringan agregat mengacu pada SNI 03-1968-1990 / *ASTM C136* / *AASHTO T27*

Untuk material *RAP* dilakukan pengujian berupa ekstraksi kadar aspal dan analisa gradasi agregat hasil ekstraksi yang mengacu pada:

ASTM D2172 / *AASHTO T164* (ekstraksi kadar aspal campuran beraspal).

Catatan: Untuk *RAP*, SNI spesifik umumnya belum mengatur detail metode ekstraksi seperti ASTM/AASHTO, sehingga standar internasional lebih sering digunakan.

Sedangkan NRL diuji secara visual untuk memastikan homogenitas dan konsistensinya sebelum dicampurkan ke dalam aspal (belum ada standar ASTM/AASHTO/SNI khusus untuk aplikasi NRL di campuran aspal secara langsung, biasanya mengacu pada penelitian sebelumnya).

Setelah seluruh material memenuhi spesifikasi, dilakukan perencanaan campuran berdasarkan hasil analisa gradasi agregat yang mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 untuk campuran *AC-WC*. Variasi kadar aspal yang digunakan dalam penelitian ini adalah 3,5%; 4,0%; 4,5%; dan 5,0%. Berdasarkan variasi tersebut, disusun *Job Mix Formula (JMF)* sebagai dasar pembuatan benda uji.

Pembuatan benda uji dilakukan menggunakan metode Marshall yang mengacu pada:

- SNI 06-2489-1991
- *ASTM D6926 (preparation)*
- *ASTM D6927 (stability & flow)*
- *AASHTO T245*

Pengujian Marshall dilakukan untuk mengetahui karakteristik campuran beraspal, terutama nilai stabilitas dan kelelahan (*flow*) yang menunjukkan kemampuan campuran dalam menahan beban serta mengalami deformasi akibat pembebanan. Pengujian ini mengacu pada SNI 06-2489-1991 tentang metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall, ASTM D6926-20 untuk proses persiapan dan pemadatan benda uji Marshall, ASTM D6927-22 untuk pengujian stabilitas dan *flow*, serta AASHTO T 245-22 yang digunakan untuk mengukur ketahanan campuran beraspal terhadap alir plastis menggunakan alat Marshall.

Variasi campuran yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari empat jenis, yaitu campuran normal, campuran dengan *RAP*, campuran dengan NRL, serta campuran kombinasi *RAP* dan NRL. Pada campuran dengan *RAP* digunakan variasi sebesar 30%.

Pada campuran dengan NRL digunakan variasi sebesar 0,3%. Sedangkan pada campuran kombinasi digunakan variasi *RAP* dan NRL secara bersamaan sesuai proporsi yang telah ditentukan. Jumlah total benda uji dalam penelitian ini adalah sebanyak 16 benda uji.

Setelah benda uji selesai dibuat, dilakukan pengujian Marshall untuk mengetahui karakteristik campuran, meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), Void in Mix (VIM), Void in Mineral Aggregate (VMA), dan Void Filled with Asphalt (VFA). Sebelum pengujian, benda uji direndam dalam waterbath selama ± 30 menit pada suhu 60°C sesuai prosedur standar Marshall.

Berdasarkan hasil pengujian Marshall, selanjutnya ditentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan mempertimbangkan parameter-parameter yang memenuhi spesifikasi.

Setelah diperoleh KAO, dilakukan pengujian lanjutan menggunakan *Cantabro Loss* untuk mengevaluasi ketahanan terhadap raveling. Pengujian ini mengacu pada:

- *ASTM D7064 (Cantabro Loss Test* untuk campuran aspal)

Pengujian *Cantabro Loss* dilakukan untuk mengetahui ketahanan campuran AC-WC berbasis RAP dengan penambahan NRL terhadap pelepasan butir akibat abrasi. Pengujian ini mengacu pada ASTM D7064/D7064M-21, yang digunakan dalam evaluasi durabilitas campuran aspal, khususnya terhadap potensi terjadinya raveling atau lepasnya agregat dari permukaan campuran. Nilai *Cantabro Loss* yang rendah menunjukkan bahwa campuran memiliki ikatan antara aspal dan agregat yang baik, sehingga lebih tahan terhadap keausan dan kerusakan permukaan

Catatan penting: Metode Cantabro umumnya menggunakan standar ASTM (D7064), dan belum terdapat padanan langsung dalam SNI maupun AASHTO, sehingga penggunaan ASTM dalam penelitian ini adalah praktik yang umum dan dapat diterima secara akademis.

Hasil pengujian *Cantabro Loss* digunakan untuk mengevaluasi daya tahan campuran terhadap pelepasan butiran agregat akibat pengaruh lalu lintas. Dengan tahapan tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan gambaran mengenai performa campuran Laston dengan substitusi *RAP* dan penambahan *NRL*, serta menentukan komposisi campuran yang paling optimal.

3.2 Pelaksanaan

3.2.1 Peralatan dan Material

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini meliputi aspal, agregat halus, agregat kasar, *RAP*, dan *NRL* sebagai material utama dalam pembuatan campuran aspal antara lain:

3.2.1.1 Alat

Alat merupakan benda atau perlengkapan yang digunakan untuk mengerjakan suatu kegiatan atau mencapai tujuan tertentu. Dalam penelitian laboratorium, alat berfungsi sebagai sarana untuk menyiapkan bahan, melakukan proses pengujian, mengukur parameter tertentu, serta memperoleh data penelitian secara terkontrol (Jalali et al., 2023). Alat yang digunakan dalam penelitian yang berjudul “Pengaruh *Natural Rubber Latex* pada AC-WC dengan Pemanfaatan *RAP* terhadap Karakteristik *Marshall* dan Ketahanan *Cantabro*.” Adalah sebagai berikut:

1. Oven

Oven merupakan alat yang digunakan untuk memanaskan, mengeringkan, atau menjaga suhu material pada kondisi tertentu selama proses pengujian dan persiapan sampel. Pada penelitian campuran aspal, oven digunakan untuk memanaskan agregat, aspal, maupun *Moulding* agar mencapai suhu yang sesuai sebelum proses pencampuran, pemadatan, dan pengujian dilakukan. Oven bekerja dengan sistem pemanasan yang mampu mempertahankan temperatur secara stabil sehingga material memperoleh kondisi yang seragam dan sesuai dengan standar pengujian.



Gambar 3. 2 Gambar Oven

2. *High Shear Homogenizer Mixer (JRJ300-SH)*

High Shear Homogenizer Mixer merupakan alat yang digunakan untuk mencampur dan menghomogenkan material dengan kecepatan putaran tinggi sehingga menghasilkan campuran yang lebih merata dan stabil. Pada penelitian campuran aspal, alat ini digunakan untuk mencampurkan bahan tambahan seperti NRL dengan aspal agar tercapai distribusi material yang homogen dan meningkatkan interaksi antar bahan. Proses pencampuran menggunakan *high shear homogenizer* membantu mencegah penggumpalan serta menghasilkan campuran dengan karakteristik yang lebih seragam sebelum digunakan pada proses pembuatan benda uji.



Gambar 3. 3 *High Shear Homogenizer Mixer*

3. *Marshall Compression Machine*

Marshall Compression Machine merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengujian stabilitas dan flow pada campuran aspal menggunakan metode Marshall. Alat ini bekerja dengan memberikan beban tekan secara vertikal pada benda uji silinder hingga mencapai kondisi maksimum untuk mengetahui kemampuan campuran dalam menahan beban dan deformasi. Pada penelitian campuran aspal, *Marshall Compression Machine* digunakan untuk menentukan nilai stabilitas, kelelahan (flow), serta mengevaluasi karakteristik campuran agar memenuhi persyaratan teknis yang berlaku.



Gambar 3. 4 *Marshall Compression Machine*

4. *Moulding*

Moulding merupakan alat berupa cetakan yang digunakan untuk membentuk benda uji campuran aspal sesuai dimensi dan spesifikasi standar sebelum dilakukan proses pemadatan dan pengujian. Pada metode Marshall, *moulding* digunakan sebagai wadah campuran aspal panas saat proses pencetakan sehingga menghasilkan benda uji berbentuk silinder dengan ukuran yang seragam. Alat ini berperan penting untuk memastikan dimensi dan kepadatan benda uji sesuai dengan ketentuan pengujian karakteristik campuran aspal.



Gambar 3. 5 *Moulding*

5. Dongkrak

Dongkrak merupakan alat yang digunakan untuk memberikan gaya tekan atau mengangkat beban pada proses tertentu dalam pekerjaan laboratorium maupun pengujian campuran aspal. Pada penelitian perkerasan jalan, *dongkrak* umumnya digunakan untuk membantu proses pelepasan benda uji dari cetakan (*moulding*) setelah pemadatan, sehingga benda uji dapat dikeluarkan dengan aman tanpa merusak bentuk dan dimensinya.



Gambar 3. 6 Dongkrak

6. Set Alat Masak

Set Alat Masak merupakan seperangkat peralatan yang digunakan dalam proses pencampuran campuran aspal untuk memanaskan dan mencampurkan agregat dengan aspal hingga mencapai kondisi homogen. Peralatan ini umumnya terdiri

dari kompor, wadah pemanas, spatula, dan perlengkapan pendukung lainnya yang berfungsi menjaga suhu material selama proses pencampuran. Pada penelitian campuran aspal, set alat masak digunakan untuk mencampurkan agregat, RAP, aspal, dan bahan tambahan agar diperoleh campuran yang merata sebelum dilakukan proses pencetakan dan pemadatan benda uji.



Gambar 3. 7 Panci dan Spatula



Gambar 3. 8 Kompor

7. Termometer

Termometer merupakan alat yang digunakan untuk mengukur dan memantau suhu material selama proses pencampuran dan pembuatan campuran aspal. Pada penelitian ini, termometer digunakan untuk mengontrol temperatur agregat, aspal, RAP, serta campuran aspal agar tetap berada pada suhu yang sesuai selama proses

pemanasan dan pencampuran. Penggunaan termometer bertujuan untuk memastikan temperatur campuran tetap stabil sehingga kualitas campuran dan hasil pengujian dapat terjaga.



Gambar 3. 9 Termometer

8. *Water Bath*

Water Bath merupakan alat yang digunakan untuk menjaga dan mengondisikan suhu benda uji atau material pada temperatur tertentu menggunakan media air. Pada penelitian campuran aspal, *water bath* digunakan untuk merendam benda uji Marshall sebelum dilakukan pengujian stabilitas dan flow, sehingga benda uji mencapai suhu sesuai standar pengujian. Penggunaan *water bath* bertujuan untuk menjaga kestabilan temperatur dan memastikan kondisi benda uji seragam sebelum pengujian dilakukan.



Gambar 3. 10 *Water Bath*

9. *Asphalt Compactor*

Asphalt Compactor merupakan alat yang digunakan untuk memadatkan campuran aspal pada proses pembuatan benda uji agar diperoleh kepadatan sesuai dengan standar pengujian. Alat ini bekerja dengan memberikan tumbukan atau tekanan pada campuran aspal yang berada di dalam cetakan (*moulding*) sehingga terbentuk benda uji dengan dimensi dan kepadatan yang seragam. Pada penelitian campuran aspal, *Asphalt Compactor* digunakan untuk memadatkan campuran agregat, RAP, aspal, dan bahan tambahan sebelum dilakukan pengujian karakteristik campuran.



Gambar 3. 11 *Asphalt Compactor*

10. Timbangan

Timbangan merupakan alat yang digunakan untuk mengukur massa atau berat material dengan tingkat ketelitian tertentu. Pada penelitian campuran aspal, timbangan digunakan untuk menimbang agregat, RAP, aspal, NRL, serta bahan tambahan lainnya sesuai dengan komposisi campuran yang telah direncanakan. Penggunaan timbangan bertujuan untuk memastikan proporsi setiap material sesuai dengan desain campuran sehingga diperoleh hasil pencampuran dan pengujian yang akurat.



Gambar 3. 12 Timbangan

11. *Centrifuge Extractor*

Centrifuge Extractor merupakan alat yang digunakan untuk mengekstraksi atau memisahkan kadar aspal dari campuran beraspal menggunakan prinsip gaya sentrifugal. Pada penelitian campuran aspal, *Centrifuge Extractor* digunakan untuk menentukan kadar aspal pada campuran RAP dengan memisahkan aspal dari agregat menggunakan pelarut tertentu. Hasil ekstraksi digunakan untuk mengetahui kandungan aspal lama pada RAP sehingga dapat dijadikan dasar dalam perencanaan komposisi campuran dan penambahan aspal baru.



Gambar 3. 13 *Centrifuge Extractor*

12. Cawan

Cawan merupakan alat yang digunakan sebagai wadah untuk menampung, memanaskan, menimbang, atau mencampurkan material dalam kegiatan laboratorium. Pada penelitian campuran aspal, cawan digunakan untuk menampung agregat, RAP, aspal, sebelum dan sesudah proses pengujian. Penggunaan cawan membantu menjaga material tetap terpisah, memudahkan proses penimbangan, serta mendukung ketelitian selama persiapan dan pelaksanaan pengujian.



Gambar 3. 14 Cawan

13. Satu set saringan

Satu set saringan digunakan untuk melakukan analisis saringan (*sieve analysis*) guna menentukan distribusi ukuran butiran agregat serta memperoleh gradasi material yang digunakan pada campuran AC-WC. Alat ini terdiri atas beberapa ukuran saringan yang disusun bertingkat untuk memisahkan agregat berdasarkan ukuran partikelnya.



Gambar 3. 15 Satu set saringan

14. Sieve Shaker

Sieve shaker merupakan alat yang digunakan pada pengujian analisis saringan untuk menggetarkan susunan saringan secara otomatis sehingga agregat dapat terpisah berdasarkan ukuran butirnya. Alat ini membantu memperoleh data gradasi agregat dengan lebih cepat, seragam, dan akurat dibandingkan pengayakan manual.



Gambar 3. 16 *Sieve Shaker*

15. Piknometer

Piknometer merupakan alat laboratorium yang digunakan untuk menentukan berat jenis dan massa jenis material. Pada penelitian campuran aspal AC-WC, piknometer digunakan untuk pengujian berat jenis aspal maupun agregat halus, abu batu dan RAP, sehingga diperoleh data yang diperlukan dalam perhitungan karakteristik campuran aspal.



Gambar 3. 17 Piknometer

16. Gelas Kimia 1000ml

Gelas kimia digunakan sebagai wadah dalam proses pengujian berat jenis aspal untuk menampung air maupun bahan yang digunakan selama pengujian. Alat ini membantu proses persiapan sampel dan pemindahan material agar pelaksanaan pengujian dapat dilakukan dengan baik.



Gambar 3. 18 Gelas Kimia

17. Pemanas

Pemanas (*Heater*) digunakan untuk memanaskan aspal selama proses pengujian berat jenis agar material berada dalam kondisi cair dan homogen. Pemanasan dilakukan untuk mempermudah proses pengisian sampel ke dalam piknometer sehingga pengujian berat jenis aspal dapat dilakukan dengan baik.



Gambar 3. 19 Pemanas

18. Cetakan daktilitas kuningan

Cetakan daktilitas kuningan digunakan untuk membentuk benda uji aspal pada pengujian daktilitas. Cetakan ini berfungsi menghasilkan spesimen dengan ukuran

dan bentuk yang sesuai standar sehingga dapat digunakan untuk mengetahui kemampuan aspal dalam mengalami deformasi atau pemanjangan sebelum mengalami putus



Gambar 3. 20 Cetakan Daktilitas Kuningan

19. Daktilometer

Daktilometer digunakan untuk mengukur nilai daktilitas aspal dengan menarik benda uji secara kontinu hingga mengalami putus. Alat bekerja dengan kecepatan penarikan sekitar 5 cm/menit (0,083 cm/detik) sehingga dapat diketahui kemampuan aspal mengalami pemanjangan sebelum putus.



Gambar 3. 21 Daktilometer

20. Satu set alat uji ring and ball

Satu set alat uji Ring and Ball digunakan untuk menentukan nilai titik lembek aspal melalui proses pemanasan bertahap. Alat ini terdiri dari cincin (ring), bola baja (ball), penyangga, gelas bejana, dan media pemanas yang digunakan untuk

mengetahui suhu saat aspal mulai melunak dan mengalami deformasi akibat beban bola baja. Hasil pengujian dinyatakan sebagai temperatur titik lembek aspal dalam satuan derajat Celcius ($^{\circ}\text{C}$).



Gambar 3. 22 Satu Set Alat Uji Ring and Ball

21. Kuas

Kuas digunakan untuk mengoleskan bahan pelapis seperti gliserin, oli, atau bahan lainnya pada peralatan dan *moulding* selama proses pembuatan campuran aspal maupun pengujian material. Penggunaan kuas bertujuan untuk membantu proses pencampuran, mencegah material menempel pada alat, serta mempermudah pelepasan benda uji.



Gambar 3. 23 Kuas

22. Filter Paper Centrifuge Extractor

Filter paper pada *Centrifuge Extractor* digunakan sebagai media penyaring untuk menahan aspal hasil ekstraksi selama proses pemisahan antara aspal dan agregat.

Penggunaan *filter paper* bertujuan agar aspal yang terpisah tidak keluar bersama larutan pelarut sehingga proses ekstraksi dapat berjalan dengan baik dan hasil pengujian kadar aspal menjadi lebih akurat.



Gambar 3. 24 *Filter Paper Centrifuge Extractor*

3.2.1.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian yang berjudul “Pengaruh *Natural Rubber Latex* pada AC-WC dengan Pemanfaatan RAP terhadap Karakteristik *Marshall* dan Ketahanan *Cantabro*” adalah sebagai berikut:

1. Agregat $\frac{3}{4}$

Agregat $\frac{3}{4}$ merupakan material batu pecah dengan ukuran maksimum sekitar 19 mm ($\frac{3}{4}$ inci) yang digunakan sebagai agregat kasar dalam campuran aspal. Pada penelitian campuran aspal, agregat $\frac{3}{4}$ berfungsi sebagai penyusun utama yang memberikan kekuatan, stabilitas, dan daya dukung terhadap campuran. Penggunaan agregat ini bertujuan untuk membentuk struktur rangka agregat sehingga campuran aspal memiliki ketahanan yang baik terhadap beban lalu lintas dan deformasi. Material agregat $\frac{3}{4}$ yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *quarry* Muntilan sebagai sumber agregat untuk campuran AC-WC (Federal Highway Administration, 2011, 2020).



Gambar 3. 25 Agregat 3/4

2. Agregat $\frac{1}{2}$

Agregat $\frac{1}{2}$ merupakan material batu pecah dengan ukuran maksimum sekitar 12,5 mm ($\frac{1}{2}$ inci) yang digunakan sebagai agregat kasar dalam campuran aspal. Pada penelitian campuran aspal, agregat $\frac{1}{2}$ berfungsi untuk membentuk susunan gradasi campuran, meningkatkan stabilitas, serta membantu distribusi beban pada lapisan perkerasan. Penggunaan agregat ini berperan dalam menghasilkan campuran yang padat, kuat, dan memiliki ketahanan yang baik terhadap deformasi maupun kerusakan akibat lalu lintas. Material agregat $\frac{1}{2}$ yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *quarry* Muntilan sebagai sumber agregat untuk campuran AC-WC (ASTM International, 2024; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).



Gambar 3. 26 Agregat $\frac{1}{2}$

3. Pasir

Pasir merupakan material agregat halus yang digunakan sebagai bahan penyusun campuran aspal untuk mengisi rongga antar agregat kasar dan membantu membentuk gradasi campuran yang baik. Pada penelitian campuran aspal, pasir berfungsi untuk meningkatkan kepadatan, stabilitas, serta memperbaiki ikatan antara agregat dan aspal sehingga diperoleh campuran yang lebih homogen dan memiliki ketahanan yang baik terhadap beban lalu lintas. Material pasir yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *quarry* Muntilan sebagai sumber agregat untuk campuran AC-WC (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).



Gambar 3. 27 Pasir

4. Abu Batu

Abu batu merupakan material agregat halus hasil pemecahan batu yang memiliki ukuran sangat kecil dan digunakan sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam campuran aspal. Pada penelitian campuran aspal, abu batu berfungsi untuk mengisi rongga antar agregat, memperbaiki gradasi campuran, meningkatkan kepadatan, serta membantu memperkuat ikatan antara agregat dan aspal. Penggunaan abu batu bertujuan untuk menghasilkan campuran yang lebih stabil, padat, dan memiliki ketahanan yang baik terhadap beban lalu lintas. Material Abu Batu yang

digunakan dalam penelitian ini berasal dari *quarry* Muntilan sebagai sumber agregat untuk campuran AC-WC (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020).



Gambar 3. 28 Abu Batu

5. RAP >9.5

RAP >9,5 mm (3/8 inch) merupakan material hasil pengerukan atau pembongkaran lapisan perkerasan aspal lama dengan ukuran butiran lebih besar dari 9,5 mm yang digunakan kembali sebagai bahan campuran aspal. Pada penelitian ini, RAP >9,5 mm berfungsi sebagai pengganti sebagian agregat dan sumber aspal lama yang masih melekat pada material. Material RAP >9,5 yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengupasan (*milling*) lapisan perkerasan jalan pada proyek Jalan Tol Pemalang–Batang Tol Road (PBTR) dan dimanfaatkan kembali sebagai material campuran AC-WC (Federal Highway Administration, 2011, 2020).



Gambar 3. 29 RAP 9,5

6. RAP 9.5 – 4.75

RAP 9,5–4,75 mm merupakan material hasil pengerukan atau pembongkaran lapisan perkerasan aspal lama dengan ukuran butiran antara 9,5 mm hingga 4,75 mm yang digunakan kembali dalam campuran aspal. Pada penelitian ini, RAP 9,5–4,75 mm berfungsi sebagai pengganti sebagian agregat sekaligus memanfaatkan aspal lama yang masih melekat pada material. Material RAP 9,5 – 4,75 yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengupasan (*milling*) lapisan perkerasan jalan pada proyek Jalan Tol Pematang–Batang Tol Road (PBTR) dan dimanfaatkan kembali sebagai material campuran AC-WC (ASTM International, 2024; Direktorat Jenderal Bina Marga, 2020; Federal Highway Administration, 2020).



Gambar 3. 30 RAP 9,5 – 4,75

7. RAP <4.75

RAP <4,75 mm (no.4) merupakan material hasil pengerukan atau pembongkaran lapisan perkerasan aspal lama dengan ukuran butiran lebih kecil dari 4,75 mm yang tergolong sebagai agregat halus dalam campuran aspal. Pada penelitian ini, RAP <4,75 mm berfungsi sebagai pengganti sebagian agregat halus dan memanfaatkan kandungan aspal lama yang masih melekat pada material. Material RAP <4,75pe yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari hasil pengupasan (*milling*) lapisan perkerasan jalan pada proyek Jalan Tol Pemalang–Batang Tol Road (PBTR) dan dimanfaatkan kembali sebagai material campuran AC-WC (ASTM International, 2024; Federal Highway Administration, 2011, 2020).



Gambar 3. 31 RAP <4,75

8. NRL

NRL merupakan bahan tambahan yang berasal dari getah karet alam dalam bentuk emulsi cair yang digunakan sebagai bahan modifikasi pada campuran aspal. Pada penelitian ini, NRL digunakan sebagai bahan aditif untuk meningkatkan sifat pengikat aspal, memperbaiki elastisitas, serta meningkatkan ketahanan campuran terhadap kerusakan seperti *raveling*, retak, dan deformasi. Penambahan NRL pada campuran aspal juga bertujuan untuk meningkatkan kinerja campuran berbasis RAP sehingga diperoleh campuran yang lebih stabil dan memiliki daya tahan yang lebih baik.



Gambar 3. 32 *Natural Rubber Latex (NRL)*

9. Gliserin

Gliserin digunakan sebagai bahan pelapis pada permukaan bagian dalam *moulding* sebelum proses pencetakan benda uji. Penggunaan gliserin bertujuan untuk mengurangi daya lekat antara campuran aspal dan *moulding* sehingga memudahkan proses pelepasan benda uji serta mencegah kerusakan pada permukaan benda uji.



Gambar 3. 33 Gliserin

3.2.2 Standar Pengujian

Pengujian akan dilakukan terhadap seluruh material yang akan digunakan. Pengujian yang dimaksud adalah pengujian terhadap aspal, agregat halus dan kasar. Beberapa uji yang akan dilakukan antara lain:

3.2.2.1 Pemeriksaan Penetrasi Aspal

Pengujian penetrasi merupakan metode yang digunakan untuk menentukan mutu aspal sesuai dengan standar SNI 2456:2011 (Nasional, 2011c). Pengujian ini dilakukan dengan cara menekan jarum penetrasi ke permukaan sampel aspal hingga kedalaman tertentu dalam waktu 5 detik.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat kekerasan bitumen, apakah berada dalam kondisi keras (solid) atau lunak (semi-solid). Semakin besar nilai penetrasi yang diperoleh, maka aspal tersebut semakin lunak. Sebaliknya, semakin kecil nilai penetrasi, maka aspal semakin keras.

Persiapan Benda Uji:

1. Menyiapkan bahan berupa aspal yang telah dipanaskan hingga kondisi cair, dengan suhu tidak melebihi 90°C dan waktu pemanasan tidak lebih dari 60 menit.
2. Menuangkan aspal ke dalam dua buah cawan hingga memenuhi wadah.

Prosedur Pengujian:

1. Aspal cair panas dituangkan ke dalam cawan dengan ketebalan sekitar 2 cm.
2. Sampel dibiarkan hingga mencapai suhu ruang.
3. Benda uji yang telah mencapai suhu ruang kemudian direndam dalam water bath selama kurang lebih 60 menit.
4. Setelah itu, benda uji dikeluarkan dan ditempatkan pada wadah berisi air hingga seluruh permukaan sampel terendam.
5. Pada alat penetrometer dipasang beban sebesar 50 gram, kemudian jarum diatur hingga menyentuh permukaan atas benda uji.

6. Pengujian dilakukan selama 5 detik dengan menekan dial pada alat.
7. Nilai penetrasi dicatat berdasarkan angka yang terbaca pada penetrometer, dengan pengujian dilakukan pada lima titik berbeda untuk setiap benda uji.



Gambar 3. 34 Memasukkan Jarum penetrasi pada sampel aspal

3.2.2.2 Titik Lembek Aspal

Pengujian titik lembek merupakan metode untuk menentukan suhu pada saat aspal mulai melunak, yaitu ketika bola baja dengan beban tertentu menekan lapisan aspal yang berada dalam cincin hingga menyentuh pelat dasar pada jarak 25,4 mm akibat pemanasan bertahap.

Pengujian ini didasarkan pada sifat aspal yang tidak mengalami perubahan dari padat ke lunak secara tiba-tiba pada satu suhu tertentu, melainkan melalui proses bertahap seiring kenaikan temperatur. Oleh karena itu, dalam pelaksanaannya, peningkatan suhu harus dilakukan secara gradual dan terkontrol. Metode yang umum digunakan adalah metode *Ring and Ball*, yang dapat digunakan untuk menentukan titik lembek bahan aspal dalam kondisi semi padat hingga padat.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui suhu saat aspal mulai melunak. Nilai tersebut menjadi acuan dalam evaluasi kinerja aspal di lapangan, khususnya dalam menahan temperatur tinggi agar tidak mudah mengalami pelembekan yang dapat menurunkan daya lekat.

Persiapan Benda Uji:

1. Aspal dipanaskan secara perlahan sambil diaduk hingga mencair sempurna, dengan tujuan mencegah terbentuknya gelembung udara.
2. Suhu pemanasan dijaga agar tidak melebihi 111°C di atas perkiraan titik leleh aspal.
3. Waktu pemanasan dibatasi, yaitu maksimum 30 menit untuk ter dan tidak lebih dari 120 menit untuk aspal.
4. Dua buah cincin dipanaskan hingga suhu tertentu, kemudian diletakkan di atas pelat kuningan yang telah dilapisi campuran talk dan gliserol.
5. Aspal cair dituangkan ke dalam kedua cincin, kemudian didiamkan pada suhu di bawah 8°C selama minimal 30 menit hingga mengeras.
6. Setelah dingin, permukaan benda uji dalam cincin diratakan menggunakan pisau yang telah dipanaskan.

Prosedur Pengujian:

1. Gelas kimia diisi air hingga $\pm\frac{3}{4}$ dari volumenya.
2. Es batu ditambahkan ke dalam air hingga memenuhi gelas kimia.
3. Suhu air diukur menggunakan termometer hingga mencapai $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
4. Cincin berisi aspal ditempatkan ke dalam gelas kimia.
5. Gelas kimia kemudian diletakkan di atas alat pemanas.
6. Pemanas dinyalakan untuk meningkatkan suhu secara bertahap.
7. Suhu dicatat setiap kenaikan 5°C hingga aspal dalam cincin melunak dan bola baja jatuh menyentuh dasar gelas.



Gambar 3. 35 Memasukkan bola baja ke dalam bejana

3.2.3.3 Pemeriksaan Daktilitas Aspal

Pengujian daktilitas aspal merupakan metode untuk menentukan sifat elastisitas aspal dengan mengukur panjang maksimum saat benda uji ditarik hingga putus. Pengujian dilakukan pada suhu 25°C dengan toleransi $\pm 5\%$ dan kecepatan penarikan sebesar 50 mm/menit. Sifat reologis ini menggambarkan kemampuan aspal dalam menahan deformasi tarik, sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi ketahanan terhadap retak pada lapisan perkerasan.

Nilai daktilitas yang tinggi menunjukkan bahwa aspal memiliki kemampuan regangan yang baik sehingga lebih tahan terhadap retak, sedangkan nilai yang rendah mengindikasikan aspal cenderung getas dan mudah mengalami keretakan. Secara umum, nilai daktilitas yang memenuhi standar untuk pengujian keretakan berada pada rentang 100–200 cm. Klasifikasi elastisitas aspal berdasarkan nilai daktilitas adalah sebagai berikut:

- ≤ 100 cm: getas
- 100–200 cm: plastis
- ≥ 200 cm: sangat plastis

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui panjang maksimum regangan yang dapat dicapai oleh benda uji aspal sebelum putus, dengan kondisi suhu dan kecepatan penarikan yang telah ditentukan.

Persiapan Benda Uji:

1. Cetakan daktilitas dan permukaan plat dasar dilapisi dengan campuran gliserin untuk mencegah lengket.
2. Aspal dipanaskan hingga mencair sambil diaduk agar suhu merata.
3. Aspal cair dituangkan ke dalam cetakan daktilitas hingga penuh.
4. Benda uji didinginkan pada suhu ruang selama $\pm 30-40$ menit, kemudian ditempatkan dalam bak perendam.

Prosedur Pengujian:

Benda uji direndam dalam bak air dengan suhu 25°C selama ± 60 menit, kemudian dilepas dari plat dasar cetakan.

Benda uji dipasang pada alat uji daktilitas dan ditarik dengan kecepatan sesuai standar.

Pengujian dilakukan hingga aspal putus, kemudian panjang regangan saat putus dicatat sebagai nilai daktilitas. Selama pengujian, benda uji harus tetap terendam air dengan ketinggian minimal 2,5 cm di atas permukaan sampel.

3.2.3.4 Pemeriksaan Berat Jenis Bitumen

Aspal merupakan material hidrokarbon berwarna hitam yang berfungsi sebagai bahan perekat dalam campuran perkerasan jalan. Aspal memiliki sifat viskoelastis, yaitu akan melunak atau mencair saat dipanaskan dan kembali mengeras pada suhu ruang. Material ini umumnya diperoleh dari hasil penyulingan minyak bumi.

Dalam penggunaannya, aspal berperan sebagai pengikat agregat yang sangat menentukan kualitas campuran beraspal. Oleh karena itu, diperlukan pengujian untuk mengetahui karakteristiknya, salah satunya melalui pengujian berat jenis. Secara sederhana, berat jenis dapat diidentifikasi secara kualitatif dengan membandingkannya terhadap air. Namun, untuk hasil yang lebih akurat, dilakukan pengujian menggunakan alat piknometer.

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan berat jenis dan berat isi aspal keras dengan menggunakan piknometer.

Persiapan Benda Uji:

A. Persiapan Alat

1. Gelas kimia berkapasitas 600 mL diisi dengan aquades yang telah dididihkan dan didinginkan hingga mencapai suhu pengujian, dengan tinggi permukaan air minimal 40 mm di atas piknometer.
2. Gelas kimia ditempatkan dalam bak perendam hingga bagian bawahnya terendam minimal 100 mm, sementara bagian atas tetap berada di atas permukaan air.
3. Suhu air dalam bak perendam diatur dan dijaga agar tidak menyimpang lebih dari $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ dari suhu pengujian.

B. Kalibrasi Piknometer

1. Piknometer yang bersih dan kering ditimbang dengan ketelitian 1 mg dan dicatat sebagai massa A.
2. Piknometer diisi aquades yang telah dididihkan dan didinginkan hingga suhu pengujian, kemudian ditutup tanpa adanya gelembung udara.
3. Piknometer direndam dalam gelas kimia selama minimal 30 menit, kemudian diangkat, dikeringkan bagian luarnya, dan ditimbang untuk memperoleh massa B.

C. Persiapan Benda Uji

1. Sampel aspal dipanaskan secara hati-hati sambil diaduk agar panas merata dan menghindari pemanasan lokal.
2. Suhu pemanasan tidak boleh melebihi 110°C di atas titik leleh aspal yang diperkirakan.
3. Waktu pemanasan dibatasi, yaitu maksimal 60 menit di atas api langsung atau 120 menit dalam oven.
4. Selama proses, dihindari terbentuknya gelembung udara dalam sampel.

Prosedur Pengujian:

1. Piknometer kosong ditimbang untuk memperoleh massa awal (A).
2. Piknometer diisi air suling, kemudian direndam dalam bak perendam dan ditimbang untuk mendapatkan massa (B).
3. Piknometer dikeringkan, lalu diisi aspal hingga $\pm 3/4$ volume, didinginkan pada suhu ruang selama ± 40 menit, dan ditimbang untuk memperoleh massa (C).
4. Piknometer yang telah berisi aspal kemudian ditambahkan air suling hingga penuh, direndam kembali, dan ditimbang untuk mendapatkan massa (D).

Perhitungan:

Berat jenis aspal dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$G = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \quad (3.1)$$

Keterangan:

A = massa piknometer kosong (gram)

B = massa piknometer berisi air (gram)

C = massa piknometer berisi aspal (gram)

D = massa piknometer berisi aspal dan air (gram)



Gambar 3. 36 Menimbang berat Piknometer + Air + Aspal

3.2.3.5 Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Tujuan:

Menentukan berat jenis (*bulk*), berat jenis kering permukaan jenuh (*Saturated Surface Dry/SSD*), dan berat jenis semu (*apparent*) agregat kasar.

Persiapan Benda Uji:

1. Material yang lolos saringan 4,75 mm (No. 4) dipisahkan melalui penyaringan kering, kemudian dibersihkan dari debu dan kotoran.
2. Berat minimum contoh uji ditentukan berdasarkan ukuran nominal maksimum agregat. Apabila terdapat lebih dari 15% material tertahan pada saringan 37,5 mm, maka pengujian dilakukan per fraksi ukuran.

Prosedur:

1. Ambil agregat kasar ukuran ½” dan ¾” masing-masing sebanyak 1000 gram, lalu tempatkan dalam cawan (dua kali pengujian).
2. Keringkan permukaan agregat hingga kondisi SSD menggunakan kain.
3. Timbang agregat dalam kondisi terendam air untuk memperoleh berat dalam air.
4. Keringkan sampel dalam oven selama ±24 jam, kemudian timbang untuk mendapatkan berat kering oven.

Perhitungan:

- Berat Jenis (Bulk):

$$G = \frac{BK}{Bj - Ba} \quad (3.2)$$

- Berat Jenis SSD:

$$G_{SSD} = \frac{Bj}{Bj - Ba} \quad (3.3)$$

- Berat Jenis Semu (Apparent):

$$G_{app} = \frac{BK}{BK - Ba} \quad (3.4)$$

- Penyerapan:

$$Abs = \frac{Bj - BK}{BK} \times 100\% \quad (3.5)$$

Keterangan:

BK = berat kering oven

Bj = berat jenuh kering permukaan (SSD)

Ba = berat dalam air



Gambar 3. 37 Menimbang Agregat dalam air

3.2.3.6 Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Tujuan:

Pengujian ini bertujuan untuk Menentukan berat jenis (*bulk*), SSD, dan semu dari agregat halus. Nilai tersebut diperlukan untuk mengevaluasi kualitas agregat halus dan mendukung perhitungan proporsi material dalam campuran beraspal.

Persiapan Benda Uji:

1. Agregat halus yang lolos saringan 4,75 mm dipisahkan dan dibersihkan.
2. Jumlah benda uji disesuaikan dengan standar, umumnya sekitar 500 gram.

Prosedur:

1. Siapkan alat dan bahan, termasuk air pada suhu ruang.
2. Ambil dua sampel masing-masing 500 gram (untuk pengujian dan oven).
3. Sampel dikeringkan dalam oven selama ± 24 jam.
4. Timbang piknometer berisi air (B).
5. Masukkan agregat ke dalam piknometer, kemudian tambahkan air hingga batas.
6. Hilangkan gelembung udara dengan menggoyangkan piknometer.
7. Timbang piknometer berisi agregat dan air (Bt).
8. Timbang agregat setelah oven untuk mendapatkan berat kering (BK).

Perhitungan:

- Berat Jenis (Bulk):

$$G = \frac{BK}{B+Bj-Bt} \quad (3.6)$$

- Berat Jenis SSD:

$$G_{SSD} = \frac{Bj}{B+Bj-Bt} \quad (3.7)$$

- Berat Jenis Semu:

$$G_{app} = \frac{BK}{B+BK-Bt} \quad (3.8)$$

- Penyerapan:

$$Abs = \frac{B_j - BK}{BK} \times 100\% \quad (3.9)$$

Keterangan:

BK = berat kering oven

B_j = berat SSD

B = berat piknometer berisi air

B_t = berat piknometer berisi agregat dan air



Gambar 3. 38 Memasukkan agregat halus dan air ke dalam piknometer

3.2.3.7 Analisa Butiran (Gradasi Agregat)

Pengujian analisa butiran dilakukan untuk menentukan distribusi ukuran partikel agregat melalui metode penyaringan. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian gradasi agregat terhadap spesifikasi yang berlaku serta sebagai dasar dalam perencanaan campuran (*job mix design*). Selain itu, data gradasi juga berkaitan dengan sifat porositas dan tingkat pemadatan material.

Tujuan:

Mengetahui distribusi ukuran butiran agregat halus dan kasar agar memenuhi spesifikasi Bina Marga untuk campuran perkerasan jalan (Laston).

Persiapan Benda Uji:

1. Pengambilan sampel dilakukan sesuai standar ASTM D75 / SNI 03-6889-2002.
2. Pengurangan sampel dilakukan sesuai ASTM C702 / SNI 13-6717-2002.
3. Jumlah sampel minimum:
 - Agregat halus: ± 300 gram
 - Agregat kasar: sesuai ukuran nominal maksimum

Prosedur:

1. Sampel agregat dimasukkan ke dalam rangkaian saringan sesuai ukuran.
2. Saringan dipasang pada alat penggetar (*sieve shaker*).
3. Penggetaran dilakukan selama ± 15 menit.
4. Setelah selesai, setiap fraksi agregat yang tertahan ditimbang.
5. Hasil penimbangan dicatat dan diolah dalam bentuk tabel.
6. Data kemudian digunakan untuk membuat grafik gradasi dan menentukan kombinasi campuran sesuai spesifikasi.

3.2.3.8 Analisa Butiran Gradasi RAP

Pengujian analisa gradasi RAP dilakukan untuk menentukan distribusi ukuran butiran material RAP melalui metode penyaringan. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengetahui persentase material yang tertahan dan lolos pada setiap ukuran saringan, sehingga dapat dievaluasi kesesuaian gradasi RAP terhadap spesifikasi campuran perkerasan jalan, khususnya campuran Laston. Selain itu, data gradasi RAP juga digunakan sebagai dasar dalam perencanaan campuran (*job mix design*) karena ukuran butiran RAP dapat memengaruhi kepadatan, rongga udara, kadar aspal efektif, stabilitas, serta kinerja campuran aspal daur ulang.

Tujuan:

Mengetahui distribusi ukuran butiran material RAP agar dapat digunakan sebagai bahan

campuran perkerasan jalan dan memenuhi spesifikasi Bina Marga untuk campuran Laston.

Persiapan Benda Uji:

1. Pengambilan sampel RAP dilakukan dari material hasil bongkaran atau hasil *milling* perkerasan jalan lama.
2. Sampel RAP yang diambil harus mewakili kondisi material secara keseluruhan.
3. Pengurangan sampel dilakukan hingga diperoleh jumlah benda uji yang sesuai untuk pengujian gradasi.
4. Sampel RAP dikeringkan terlebih dahulu untuk mengurangi kadar air yang dapat memengaruhi hasil penimbangan.
5. Gumpalan RAP yang terlalu besar dipisahkan atau dihancurkan secara hati-hati agar tidak merusak butiran agregat aslinya.
6. Jumlah sampel yang digunakan disesuaikan dengan ukuran nominal maksimum material RAP.

Prosedur:

1. Sampel RAP yang telah disiapkan ditimbang untuk memperoleh berat awal benda uji.
2. Sampel dimasukkan ke dalam rangkaian saringan yang disusun dari ukuran terbesar hingga terkecil.
3. Rangkaian saringan dipasang pada alat penggetar (*sieve shaker*).
4. Penggetaran dilakukan selama ± 15 menit agar material RAP terpisah berdasarkan ukuran butirannya.
5. Setelah proses penyaringan selesai, material RAP yang tertahan pada setiap saringan ditimbang.
6. Hasil penimbangan setiap fraksi dicatat dan diolah dalam bentuk tabel.

7. Data hasil pengujian dihitung untuk memperoleh berat tertahan, persen tertahan, persen tertahan kumulatif, dan persen lolos.
8. Hasil perhitungan kemudian digunakan untuk membuat grafik gradasi RAP.
9. Grafik gradasi dibandingkan dengan spesifikasi Bina Marga untuk mengetahui kesesuaian material RAP terhadap campuran Laston.
10. Apabila gradasi RAP belum memenuhi spesifikasi, maka dilakukan penyesuaian komposisi dengan agregat baru agar diperoleh gradasi campuran yang sesuai.

3.3.3 Pencampuran NRL dan Substitusi *RAP* dalam Aspal

Pencampuran NRL dan penggunaan *RAP* dalam campuran aspal merupakan salah satu upaya modifikasi material untuk meningkatkan kinerja perkerasan jalan sekaligus mendukung efisiensi dan keberlanjutan penggunaan material.

NRL merupakan bahan polimer alami yang memiliki sifat elastis tinggi, sehingga penambahannya ke dalam aspal bertujuan untuk meningkatkan fleksibilitas, ketahanan terhadap retak, serta memperbaiki sifat adhesi antara aspal dan agregat. Pencampuran NRL dilakukan dengan metode pencampuran basah (*wet process*), yaitu dengan menambahkan NRL ke dalam aspal panas pada suhu tertentu ($\pm 140\text{--}160^\circ\text{C}$) secara bertahap sambil dilakukan pengadukan hingga diperoleh campuran yang homogen. Proses ini bertujuan agar partikel karet terdistribusi merata dalam aspal sehingga mampu meningkatkan sifat viskoelastisnya.

Di sisi lain, *RAP* merupakan material hasil daur ulang perkerasan lama yang masih mengandung agregat dan aspal. Penggunaan *RAP* dalam campuran aspal dilakukan sebagai substitusi sebagian agregat dan aspal baru. Aspal yang terdapat dalam *RAP* umumnya telah mengalami penuaan (*aging*), sehingga memiliki sifat lebih kaku. Oleh karena itu, dalam penggunaannya perlu dilakukan penyesuaian, seperti penambahan aspal baru atau bahan peremaja agar sifat campuran tetap memenuhi spesifikasi.

Dalam penelitian ini, *RAP* digunakan sebagai pengganti sebagian material agregat dan aspal baru dengan proporsi tertentu. Sementara itu, NRL ditambahkan sebagai bahan modifikasi untuk meningkatkan elastisitas campuran yang cenderung menurun akibat

penggunaan *RAP*. Dengan demikian, kombinasi antara *RAP* dan NRL diharapkan dapat menghasilkan campuran aspal yang memiliki keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas.

Penggunaan *RAP* memberikan keuntungan berupa pengurangan kebutuhan material baru, efisiensi biaya, serta pengurangan dampak lingkungan. Namun, peningkatan kadar *RAP* dapat menyebabkan campuran menjadi lebih kaku dan berpotensi menurunkan ketahanan terhadap retak. Oleh karena itu, penambahan NRL diharapkan dapat mengimbangi sifat tersebut dengan meningkatkan kemampuan regangan dan ketahanan terhadap retak.

Dengan perencanaan komposisi yang tepat, pencampuran NRL dan substitusi *RAP* dalam aspal diharapkan mampu meningkatkan kinerja campuran, baik dari segi stabilitas, durabilitas, maupun fleksibilitas, sehingga dapat memperpanjang umur layanan perkerasan jalan.

3.3.4 Perancangan dan Pembuatan Benda Uji

Setelah dilakukan analisis terhadap material, tahap selanjutnya adalah pembuatan benda uji sesuai dengan jumlah dan variasi yang telah direncanakan dalam penelitian. Pembuatan benda uji dilakukan sebanyak empat variasi, yaitu berdasarkan perbedaan kadar aspal, styrofoam, dan boraks.

Prosedur Pembuatan Benda Uji

1) Persiapan Campuran

Untuk setiap benda uji digunakan agregat sebanyak ± 1200 gram, sehingga diperoleh tinggi benda uji sekitar $6,25 \text{ cm} \pm 0,125 \text{ cm}$ ($2,5'' \pm 0,05''$). Panci pencampur dan agregat dipanaskan hingga mencapai suhu sekitar 28°C di atas suhu pencampuran untuk aspal panas. Sedangkan untuk aspal dingin, pemanasan dilakukan hingga sekitar 14°C di atas suhu pencampuran. Pemanasan ini bertujuan agar proses pencampuran dapat berlangsung secara optimal.

Aspal dipanaskan hingga mencapai suhu pencampuran, kemudian dituangkan ke dalam agregat yang telah dipanaskan sesuai dengan kadar yang direncanakan. Campuran

tersebut kemudian diaduk secara cepat dan merata hingga seluruh permukaan agregat terlapisi aspal dengan baik.



Gambar 3. 39 Memasukkan Material yang sudah ditimbang ke dalam wajan



Gambar 3. 40 pengecekan suhu pencampuran

2) Pemasakan Benda Uji

Seluruh perlengkapan cetakan dan permukaan penumbuk dibersihkan terlebih dahulu, kemudian dipanaskan pada suhu antara $93,3^{\circ}\text{C}$ hingga $148,9^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya, kertas saring yang telah dipotong sesuai ukuran cetakan diletakkan pada dasar cetakan. Campuran aspal dimasukkan ke dalam cetakan, kemudian dilakukan penusukan menggunakan spatula yang telah dipanaskan sebanyak 15 kali di bagian tepi dan 10 kali

di bagian tengah untuk memastikan distribusi campuran merata dan mengurangi rongga udara.

Permukaan campuran diratakan menggunakan sendok semen hingga membentuk sedikit cembung. Suhu campuran saat pemadatan harus berada dalam rentang suhu pemadatan yang telah ditentukan.

Cetakan kemudian ditempatkan pada landasan pematat, dan dilakukan pemadatan menggunakan alat penumbuk dengan jumlah tumbukan sebanyak 75, 50, atau 35 kali sesuai kebutuhan, dengan tinggi jatuh sebesar 45 cm (18 inci). Selama proses pemadatan, posisi alat penumbuk dijaga agar tetap tegak lurus terhadap cetakan. Setelah pemadatan sisi pertama selesai, cetakan dibalik dan dilakukan pemadatan pada sisi lainnya dengan jumlah tumbukan yang sama. Selanjutnya, benda uji dikeluarkan dari cetakan secara hati-hati menggunakan alat pengeluar. Benda uji yang telah terbentuk kemudian diletakkan pada permukaan datar dan halus, serta didiamkan selama ± 24 jam pada suhu ruang sebelum dilakukan pengujian lebih lanjut.



Gambar 3. 41 Proses memasukkan material ke dalam *moulding*



Gambar 3. 42 Pelepasan Benda Uji

3.3.5 Tahap Pengujian Benda Uji

Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap benda uji untuk mengetahui karakteristik campuran aspal. Pengujian yang digunakan meliputi uji Marshall dan uji Cantabro. Pengujian Marshall dilakukan dua tahap, yaitu pada variasi kadar aspal dan setelah perendaman untuk mengevaluasi ketahanan terhadap air. Sementara itu, uji Cantabro digunakan untuk menilai ketahanan campuran terhadap kehilangan butir akibat abrasi.

3.3.5.1 Pengujian Marshall

Tujuan:

Menentukan nilai stabilitas dan kelelahan plastis (*flow*) dari campuran aspal serta mengevaluasi ketahanan campuran terhadap pengaruh air.

Prosedur:

1. Membersihkan benda uji dari kotoran yang menempel.
2. Memberikan kode atau tanda pengenalan pada setiap benda uji.
3. Mengukur dimensi benda uji dengan ketelitian 0,1 mm.
4. Menimbang benda uji dalam kondisi kering.
5. Merendam benda uji selama ± 24 jam pada suhu ruang.

6. Menimbang benda uji dalam air untuk menentukan volumenya.
7. Menimbang benda uji dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD).
8. Merendam benda uji dalam bak air pada suhu $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$ selama 30–40 menit untuk aspal panas, atau pada suhu $(38 \pm 1)^\circ\text{C}$ untuk tar. Untuk aspal dingin, benda uji dipanaskan dalam oven pada suhu $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ selama minimal 2jam.
9. Membersihkan dan melumasi batang penuntun (*guide rod*) serta memastikan kepala penekan (*breaking head*) dapat bergerak bebas.
10. Menempatkan benda uji pada alat Marshall, kemudian memasang arloji pengukur flow dan mengatur posisi awal pada nol.
11. Memberikan beban dengan kecepatan konstan sebesar 50 mm/menit hingga mencapai beban maksimum.
12. Mencatat nilai stabilitas maksimum yang ditunjukkan oleh alat.
13. Mencatat nilai *flow* saat beban maksimum tercapai.
14. Waktu pengujian sejak benda uji diangkat dari perendaman hingga pembebanan maksimum tidak boleh melebihi 30 detik.



Gambar 3. 43 Proses pengujian Marshall

3.3.5.2 Pengujian Cantabro

Tujuan:

Menentukan ketahanan campuran aspal terhadap kehilangan butir (*ravelling*) akibat gaya abrasi tanpa adanya beban penekan, yang umumnya digunakan untuk mengevaluasi durabilitas campuran beraspal.

Prosedur:

1. Menimbang berat awal benda uji kering (W_1).
2. Memasukkan benda uji ke dalam mesin *Los Angeles Abrasion* tanpa bola baja.
3. Memutar mesin dengan jumlah putaran tertentu (umumnya 300 putaran) sesuai standar pengujian.
4. Mengeluarkan benda uji dari mesin, kemudian membersihkan sisa material lepas.
5. Menimbang kembali benda uji untuk mendapatkan berat akhir (W_2).
6. Perhitungan Nilai Cantabro Loss:

Persentase kehilangan berat dihitung dengan persamaan:

$$CL = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (3.10)$$

Keterangan:

W_1 = berat awal benda uji (gram)

W_2 = berat akhir benda uji setelah pengujian (gram)

Nilai Cantabro yang kecil menunjukkan campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap pelepasan butir, sedangkan nilai yang besar menunjukkan campuran mudah mengalami kerusakan (*ravelling*).

Keterkaitan Pengujian dengan Penelitian

Pengujian Marshall digunakan untuk mengevaluasi stabilitas dan fleksibilitas campuran akibat variasi kadar aspal, NRL, dan *RAP*. Sementara itu, uji Cantabro digunakan untuk menilai durabilitas campuran terhadap kehilangan butir. Kombinasi kedua pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai

kinerja campuran aspal yang diteliti, khususnya dalam hal ketahanan terhadap deformasi, retak, dan pelepasan agregat.



Gambar 3. 44 Proses Pengujian Cantabro Lost



Gambar 3. 45 Sampel sebelum du Uji Cantabro



Gambar 3. 46 Sampel setelah di Uji Cantabro

3.3 Tahap Analisa dan Pembahasan

Analisis pada tahap ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara hasil ekstraksi RAP, nilai Kadar Aspal Optimum (KAO), kebutuhan aspal baru, serta penambahan Natural Rubber Latex (NRL) dalam campuran. Pengujian ekstraksi RAP dilakukan untuk mengetahui kadar aspal lama yang masih terkandung dalam material Reclaimed Asphalt Pavement. Nilai kadar aspal RAP hasil ekstraksi kemudian digunakan untuk menghitung besarnya kandungan aspal lama yang ikut masuk ke dalam campuran.

Setelah kadar aspal RAP diketahui, dilakukan perhitungan estimasi kebutuhan aspal baru berdasarkan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian Marshall. KAO digunakan sebagai acuan kadar aspal total yang dibutuhkan dalam campuran. Karena material RAP telah mengandung aspal lama, maka jumlah aspal baru yang ditambahkan tidak dapat langsung sebesar nilai KAO, tetapi harus dikurangi dengan kandungan aspal lama yang berasal dari RAP.

Selanjutnya, dilakukan penambahan Natural Rubber Latex (NRL) sebagai bahan tambah pada campuran beraspal. Penambahan NRL bertujuan untuk meningkatkan kinerja campuran, khususnya dalam memperbaiki sifat elastisitas dan daya ikat aspal terhadap agregat. Penggunaan NRL dalam campuran dianalisis berdasarkan hasil pengujian Marshall, sehingga dapat diketahui pengaruhnya terhadap parameter campuran seperti stabilitas, kelelahan (flow), Marshall Quotient (MQ), serta parameter volumetrik campuran.

Seluruh data hasil ekstraksi RAP, perhitungan KAO, estimasi kebutuhan aspal baru, dan penambahan NRL kemudian diolah menggunakan Microsoft Excel. Hasil pengolahan data tersebut digunakan untuk menyusun komposisi Job Mix Formula serta mengevaluasi pengaruh penggunaan RAP dan penambahan NRL terhadap kinerja campuran aspal beton. Dengan demikian, analisis ini menjadi dasar dalam menentukan komposisi campuran yang sesuai agar tetap memenuhi kadar aspal optimum dan menghasilkan campuran yang stabil serta memiliki durabilitas yang baik.

3.3.1 Penentuan Kadar Aspal Optimum

Penentuan kadar aspal optimum dilakukan berdasarkan hasil pengujian Marshall terhadap beberapa variasi kadar aspal. Analisis ini bertujuan untuk memperoleh kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter karakteristik campuran beraspal sesuai dengan spesifikasi yang digunakan. Parameter yang dianalisis meliputi stabilitas, flow, rongga udara dalam campuran atau VIM, rongga dalam mineral agregat atau VMA, rongga terisi aspal atau VFB, serta Marshall Quotient.

Kadar aspal optimum ditentukan dari rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh persyaratan parameter Marshall. Nilai kadar aspal optimum diperoleh dari nilai tengah antara batas bawah dan batas atas kadar aspal yang memenuhi spesifikasi. Rumus penentuan kadar aspal optimum adalah sebagai berikut:

$$\text{KAO} = (\text{KA batas bawah} + \text{KA batas atas}) / 2 \quad (3.11)$$

Keterangan:

KAO = Kadar Aspal Optimum

KA batas bawah = kadar aspal terendah yang memenuhi spesifikasi

KA batas atas = kadar aspal tertinggi yang memenuhi spesifikasi

Nilai kadar aspal optimum yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pembuatan benda uji campuran dengan penggunaan material RAP dan penambahan bahan Natural Rubber Latex (NRL).

3.3.2 Ekstraksi RAP & Estimasi Aspal Baru

Ekstraksi RAP dilakukan untuk mengetahui kadar aspal lama yang terkandung dalam material Reclaimed Asphalt Pavement. Hasil ekstraksi ini digunakan sebagai dasar untuk

menghitung kandungan aspal lama dari RAP yang masuk ke dalam campuran, sehingga kebutuhan aspal baru dapat ditentukan dengan tepat.

Kadar aspal RAP dihitung dari perbandingan antara berat aspal hasil ekstraksi dengan berat sampel RAP yang digunakan. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$KRAP = \frac{W_a}{W_s} \times 100\% \quad (3.12)$$

Keterangan:

KRAP = kadar aspal RAP hasil ekstraksi (%)

W_a = berat aspal hasil ekstraksi (gram)

W_s = berat sampel RAP (gram)

Apabila pengujian ekstraksi dilakukan pada lebih dari satu sampel, maka nilai kadar aspal RAP yang digunakan adalah nilai rata-rata dari seluruh sampel. Rumus rata-rata kadar aspal RAP adalah sebagai berikut:

$$KRAP \text{ rata-rata} = \frac{(KRAP1 + KRAP2)}{n} \quad (3.13)$$

Keterangan:

KRAP rata-rata = kadar aspal RAP rata-rata (%)

KRAP1 = kadar aspal RAP pada sampel 1 (%)

KRAP2 = kadar aspal RAP pada sampel 2 (%)

n = jumlah sampel yang diuji

Setelah kadar aspal RAP rata-rata diketahui, selanjutnya dihitung kandungan aspal lama dari RAP yang terdapat dalam campuran. Perhitungan ini dilakukan dengan memperhitungkan nilai Kadar Aspal Optimum, persentase penggunaan RAP, dan kadar aspal RAP hasil ekstraksi. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$ARAP = ((100 - KAO) / 100) \times (PRAP / 100) \times KRAP \quad (3.14)$$

Keterangan:

ARAP = kandungan aspal lama dari RAP dalam campuran (%)

KAO = Kadar Aspal Optimum (%)

PRAP = persentase penggunaan RAP terhadap total agregat (%)

KRAP = kadar aspal RAP rata-rata hasil ekstraksi (%)

Dengan rumus tersebut, kandungan aspal lama dari RAP dapat dihitung sesuai dengan jumlah RAP yang digunakan dalam campuran. Setelah nilai ARAP diperoleh, kebutuhan aspal baru dihitung dengan mengurangi nilai Kadar Aspal Optimum dengan kandungan aspal lama dari RAP. Rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Ab = KAO - ARAP \quad (3.15)$$

Keterangan:

Ab = kadar aspal baru yang perlu ditambahkan ke dalam campuran (%)

KAO = Kadar Aspal Optimum (%)

ARAP = kandungan aspal lama dari RAP dalam campuran (%)

Perhitungan ini dilakukan karena material RAP telah mengandung aspal lama, sehingga penambahan aspal baru tidak dapat langsung menggunakan nilai KAO secara penuh. Kandungan aspal lama dari RAP harus diperhitungkan agar total kadar aspal dalam campuran tetap sesuai dengan Kadar Aspal Optimum yang direncanakan. Hasil perhitungan kebutuhan aspal baru selanjutnya digunakan dalam perancangan Job Mix Formula campuran dengan substitusi RAP dan penambahan NRL.

Pengujian ekstraksi dilakukan untuk mengetahui kadar aspal yang masih terkandung dalam material RAP. Dua sampel masing-masing menggunakan berat sampel 1000 gram. Hasil ekstraksi menunjukkan kadar aspal sampel 1 sebesar 4,41% dan sampel 2 sebesar 4,54%, sehingga rata-rata kadar aspal RAP adalah 4,475% yang ditunjukkan oleh Tabel 3. 1 Tabel Perhitungan Ekstraksi Aspal:

Tabel 3. 1 Tabel Perhitungan Ekstraksi Aspal

NO.	Berat		Sampel 1	Sampel 2	Satuan
1	W sample	=	1000	1000	gr
2	W penyaring	=	29,1	29,4	gr
3	W sampel + penyaring	=	1029,1	1029,4	gr
4	W mineral + penyaring	=	985	984	gr
5	W aspal	=	44,1	45,4	gr
6	Kadar Aspal	=	4,41	4,54	%
7	Rata-rata	=	4,475		%

Tabel 3. 2 Kandungan Rap Berdasarkan KAO Aspal Konvensional

Kandungan RAP				
Agg	KAO	RAP	Kadar Aspal RAP	Aspal RAP
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
100%	5,9%	30%	4,475%	1,26%

Berdasarkan, kadar aspal optimum atau KAO pada campuran aspal konvensional diperoleh sebesar 5,9%. Pada perencanaan campuran dengan penggunaan material RAP, persentase RAP yang digunakan adalah sebesar 30% dari total agregat. Material RAP tersebut masih mengandung aspal lama dengan kadar aspal RAP sebesar 4,475%.



Gambar 3. 47 Proses Ekstraksi RAP

3.3.3 Analisis Penambahan Natural Rubber Latex (NRL)

Analisis penambahan Natural Rubber Latex (NRL) dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kadar NRL terhadap karakteristik campuran beraspal yang menggunakan material RAP. Penambahan NRL bertujuan untuk meningkatkan kinerja campuran, khususnya dalam memperbaiki sifat elastisitas, ketahanan terhadap deformasi, serta daya ikat antara aspal dan agregat.

Pada penelitian ini, variasi kadar NRL yang digunakan yaitu 0%, 3%, dan 5% terhadap kadar aspal dengan kadar NRL 60 DRC. Campuran dengan kadar NRL 0% digunakan sebagai campuran pembanding, sedangkan campuran dengan penambahan NRL 3% dan 5% digunakan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik campuran akibat adanya bahan tambah NRL.

Hasil pengujian campuran dengan variasi NRL dianalisis berdasarkan parameter Marshall, yaitu stabilitas, flow, VIM, VMA, VFB, dan Marshall Quotient. Selain itu, pengujian Cantabro juga digunakan untuk mengetahui tingkat kehilangan berat campuran akibat pelepasan butiran agregat. Analisis ini dilakukan untuk menilai kemampuan NRL dalam meningkatkan durabilitas campuran, terutama terhadap pengaruh perendaman dan kondisi lingkungan.

Data hasil pengujian dari setiap variasi kadar NRL kemudian dibandingkan dengan campuran tanpa penambahan NRL. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui

kadar NRL yang memberikan kinerja campuran paling baik dan memenuhi spesifikasi yang berlaku.

Tabel 3. 3 Tabel Kebutuhan NRL

NRL 60 DRC	Kebutuhan	Berat aspal	Aspal	NRL Murni	berat total	Kebutuhan NRL	
60%	0%	1512,9	100%	0	1512,900	0	gr
60%	3%	1506,6	97%	45,198	1553,196	77,65979	gr
60%	5%	1500,3	95%	75,015	1579,263	131,6053	gr

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Sifat Aspal

Pengujian sifat aspal dilakukan untuk memastikan bahwa bahan pengikat memiliki karakteristik dasar yang layak digunakan pada campuran. Pengujian yang tersedia dalam workbook meliputi penetrasi, titik lembek, berat jenis aspal, dan daktilitas.

4.1.1 Hasil Pengujian Penetrasi Aspal

Tabel 4. 1 Hasil pengujian penetrasi Aspal

Penetrasi pada suhu 25° C	Penetrasi	
	I	II
100 gram, 5 detik		
Pengamatan 1	65	64
Pengamatan 2	64	62
Pengamatan 3	62	65
Pengamatan 4	61	60
Pengamatan 5	62	61
Rerata	62,8	62,4
Rata - Rata	62,6	

Berdasarkan tabel 4.1 hasil pengujian penetrasi, diperoleh nilai rata-rata penetrasi aspal sebesar 62,6. Nilai ini berada dalam rentang aspal penetrasi 60/70, sehingga aspal yang digunakan termasuk dalam kategori aspal keras yang masih sesuai untuk campuran beraspal panas. Secara teknis, nilai penetrasi menunjukkan tingkat kekerasan atau konsistensi aspal. Semakin besar nilai penetrasi, maka aspal semakin lunak, sedangkan semakin kecil nilai penetrasi, maka aspal semakin keras. Nilai penetrasi 62,6 menunjukkan bahwa aspal tidak terlalu keras dan tidak terlalu lunak, sehingga masih mampu memberikan keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas pada campuran AC-WC.

Kondisi ini penting karena AC-WC merupakan lapisan aus yang menerima beban lalu lintas secara langsung sekaligus terpapar perubahan suhu dan air. Aspal yang terlalu keras dapat menyebabkan campuran menjadi getas dan mudah retak, sedangkan aspal yang terlalu lunak dapat meningkatkan risiko deformasi permanen seperti alur atau rutting. Oleh karena itu, nilai penetrasi yang berada pada rentang 60/70 menunjukkan

bahwa bahan pengikat memiliki karakteristik awal yang layak untuk digunakan dalam campuran AC-WC. Hal ini sesuai dengan fungsi penetrasi sebagai indikator konsistensi dan kekerasan aspal dalam pengujian sifat dasar bahan pengikat (Badan Standarnisasi Nasional, 2011c; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.1.2 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Titik Lembek Aspal

No	Suhu Yang Diamati		Waktu (menit)		SuhuTitik Lembek (°C)	
	°C	°F	I	II	I	II
1	5	41	0:00:00	0:00:00	55	57
2	10	50	5:10:00	5:10:00		
3	15	59	7:55:00	7:55:00		
4	20	68	10:01:00	10:01:00		
5	25	77	12:16:00	12:16:00		
6	30	86	14:42:00	14:42:00		
7	35	95	17:05:00	17:05:00		
8	40	104	18:48:00	18:48:00		
9	45	113	20:57:00	20:57:00		
10	50	122	23:04:00	23:04:00		
11	55	131	25:06:00	25:06:00		
12	55	132,8	25:17:00	25:17:00		
13	57	134,6	25:45:00	25:45:00		
Rata-Rata Titik Lembek (°C)					56	

Berdasarkan Tabel 4.2 hasil pengujian titik lembek, diperoleh nilai rata-rata sebesar 56°C. Nilai ini menunjukkan bahwa aspal memiliki ketahanan yang cukup baik terhadap perubahan temperatur tinggi. Titik lembek menggambarkan suhu saat aspal mulai mengalami pelunakan akibat pemanasan. Semakin tinggi nilai titik lembek, maka semakin baik kemampuan aspal dalam mempertahankan konsistensi dan tidak mudah melunak pada kondisi temperatur tinggi.

Secara teknis, nilai titik lembek yang relatif tinggi bermanfaat untuk meningkatkan stabilitas campuran, terutama pada lapisan AC-WC yang berada di permukaan perkerasan dan langsung menerima panas matahari serta beban kendaraan. Jika titik lembek terlalu rendah, aspal dapat menjadi terlalu lunak saat suhu lapangan meningkat, sehingga campuran berpotensi mengalami bleeding, deformasi plastis, atau rutting. Dengan nilai titik lembek 56°C, aspal yang digunakan memiliki ketahanan termal

yang cukup baik untuk mendukung kinerja campuran beraspal panas. Hal ini sejalan dengan konsep bahwa titik lembek merupakan parameter yang menunjukkan ketahanan aspal terhadap pengaruh temperatur tinggi (Badan Standarnisasi Nasional, 2011b; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.1.3 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Daktilitas Aspal

Daktilitas Pada Suhu 25°C 5 cm/menit	Pembacaan Pengukuran Pada Alat		Satuan
	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
Pengamatan 1	43	88	cm
Pengamatan 2	98	102,5	cm
Rata-Rata	70,5	95,25	cm

Berdasarkan Tabel 4. 3 Hasil pengujian daktilitas menunjukkan nilai rata-rata pada benda uji 1 sebesar 70,5 cm dan benda uji 2 sebesar 95,25 cm, sehingga diperoleh rerata gabungan sebesar 82,875 cm. Nilai daktilitas menunjukkan kemampuan aspal untuk mengalami pemanjangan sebelum putus. Semakin tinggi nilai daktilitas, maka semakin baik kemampuan aspal dalam menahan deformasi tarik dan semakin besar potensi aspal untuk menahan retak pada campuran perkerasan.

Nilai daktilitas yang diperoleh menunjukkan bahwa aspal masih memiliki kemampuan regangan, tetapi nilainya perlu dicermati karena tidak mencapai 100 cm apabila mengacu pada batas daktilitas yang umum digunakan untuk menunjukkan kelenturan aspal yang baik. Secara teknis, nilai daktilitas yang relatif rendah dapat disebabkan oleh kondisi aspal yang cenderung lebih kaku, pengaruh pemanasan saat persiapan sampel, atau kemungkinan penurunan sifat elastis selama proses pengujian. Hal ini penting karena campuran AC-WC memerlukan aspal yang tidak hanya kuat menahan beban, tetapi juga cukup lentur dalam menerima deformasi akibat lalu lintas berulang. Oleh karena itu, hasil daktilitas ini menjadi salah satu alasan mengapa penambahan NRL diperlukan, karena NRL berpotensi meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas bahan pengikat (Badan Standarnisasi Nasional, 2011a; Suwanto et al., 2023; Wen et al., 2017b).

4.1.4 Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis Bitumen

Pengujian		1	2	Satuan
Berat Picnometer Kosong	A	43,10	42,80	gram
Berat Picnometer + Air	B	68,50	68,60	gram
Berat Picnometer + Aspal	C	58,40	57,40	gram
Berat Picnometer + Air + Aspal	D	69,20	68,90	gram
Berat Aspal	C - A	15,30	14,60	gram
Isi Aspal	(B - A) - (D - C)	14,60	14,30	gram
Berat Jenis Aspal	(C - A)	1,05	1,02	gram
	(B - A) - (D - C)			
Berat Jenis Aspal Rerata	(Uji 1 + Uji 2)	1,03		gram
	2			

Berdasarkan Tabel 4. 4 hasil pengujian berat jenis bitumen, diperoleh nilai berat jenis rata-rata sebesar 1,034. Nilai ini menunjukkan bahwa berat jenis aspal lebih besar dari air dan masih berada pada kisaran yang umum untuk aspal keras. Berat jenis aspal diperlukan dalam perhitungan volumetrik campuran, terutama untuk menentukan hubungan antara volume aspal, rongga udara, rongga dalam agregat, dan kadar aspal efektif.

Secara teknis, berat jenis bitumen yang sesuai menunjukkan bahwa aspal memiliki kepadatan material yang baik dan dapat digunakan dalam perhitungan campuran Marshall. Apabila berat jenis aspal tidak akurat, maka perhitungan volumetrik seperti VIM, VMA, dan VFB juga dapat terpengaruh. Hal ini karena parameter volumetrik campuran sangat bergantung pada nilai berat jenis masing-masing material penyusun. Dengan demikian, nilai berat jenis bitumen sebesar 1,034 dapat digunakan sebagai dasar perencanaan campuran AC-WC berbasis RAP secara lebih tepat (ASTM, 2021; Badan Standardisasi Nasional, 2011a; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat

Berat jenis dan penyerapan agregat digunakan dalam perhitungan volumetrik campuran, terutama untuk memperoleh nilai berat jenis bulk agregat (G_{sb}), berat jenis semu (G_{sa}), dan parameter rongga pada pengujian Marshall. Workbook memuat dua sheet berat jenis agregat.

4.2.1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Material	Jenis	BJ Bulk (gram)	BJ SSD (gram)	BJ Semu (gram)	Penyerapan (%)
Agregat 3/4	Kasar	2,4372	2,5321	2,505	3,897
Agregat 1/2	Kasar	2,7117	2,7744	2,42	2,308
RAP >9,5	Kasar RAP	2,4027	2,4424	2,5023	1,652
RAP 9,5-4	Kasar RAP	2,7374	2,7972	2,9149	2,161

Berdasarkan Tabel 4. 5 dan hasil pengujian, agregat kasar 3/4 memiliki nilai berat jenis bulk sebesar 2,4372, berat jenis SSD sebesar 2,5321, dan berat jenis semu sebesar 2,505, dengan nilai penyerapan sebesar 3,897%. Nilai ini menunjukkan bahwa agregat 3/4 memiliki kemampuan menyerap air yang relatif lebih tinggi dibandingkan material lainnya.

Pada agregat kasar 1/2, diperoleh nilai berat jenis bulk sebesar 2,7117, berat jenis SSD sebesar 2,7744, dan berat jenis semu sebesar 2,42, sedangkan nilai penyerapan sebesar 2,308%. Hasil ini menunjukkan bahwa agregat 1/2 memiliki berat jenis yang cukup tinggi dengan tingkat penyerapan yang lebih rendah dibandingkan agregat 3/4.

Untuk material RAP >9,5, hasil pengujian menunjukkan nilai berat jenis bulk sebesar 2,4027, berat jenis SSD sebesar 2,4424, dan berat jenis semu sebesar 2,5023, dengan nilai penyerapan sebesar 1,652%. Dari data tersebut terlihat bahwa material RAP >9,5 memiliki nilai penyerapan paling rendah, sehingga dapat dikatakan memiliki daya serap air yang lebih kecil dibandingkan material lainnya.

Sementara itu, pada material RAP 9,5–4, diperoleh nilai berat jenis bulk sebesar 2,7374, berat jenis SSD sebesar 2,7972, dan berat jenis semu sebesar 2,9149, dengan nilai penyerapan sebesar 2,161%. Nilai ini menunjukkan bahwa RAP 9,5–4 memiliki berat jenis paling tinggi di antara seluruh material yang diuji, sedangkan nilai penyerapannya masih berada pada tingkat sedang.

Agregat 3/4 memiliki nilai penyerapan paling tinggi dibandingkan agregat kasar lainnya. Hal ini dapat disebabkan oleh tekstur permukaan yang lebih kasar, porositas lebih besar, atau kondisi batuan yang lebih terbuka terhadap masuknya air. Dalam campuran aspal, agregat dengan penyerapan tinggi dapat meningkatkan kebutuhan aspal efektif karena sebagian aspal berpotensi terserap ke dalam pori agregat. Sebaliknya, material RAP >9,5 memiliki penyerapan lebih rendah karena permukaan agregat masih terselimuti oleh aspal lama, sehingga pori agregat tidak sepenuhnya terbuka. Kondisi ini menjelaskan mengapa RAP dapat menyumbang aspal lama dalam campuran, tetapi juga perlu dikontrol karena aspal lama pada RAP telah mengalami penuaan. Karakteristik berat jenis dan penyerapan agregat sangat berpengaruh terhadap perhitungan volumetrik campuran, terutama VIM, VMA, dan VFB (ASTM, 2025a; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.2.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Material	Jenis	BJ Bulk (gram)	BJ SSD (gram)	BJ Semu (gram)	Penyerapan (%)
Pasir lolos #4	Halus	2,7338	2,9686	2,605	8,581
Abu batu lolos #4	Halus	2,7582	2,8821	2,54	4,494
RAP lolos #4	Halus RAP	2,43	2,208	2,2949	3,097

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus, diperoleh bahwa material pasir lolos #4 memiliki nilai BJ bulk sebesar 2,7338, BJ SSD sebesar 2,9686, dan BJ semu sebesar 2,605, dengan nilai penyerapan sebesar 8,581%. Nilai penyerapan tersebut merupakan yang paling tinggi dibandingkan material lainnya, sehingga menunjukkan bahwa pasir lolos #4 memiliki kemampuan menyerap air yang cukup besar.

Pada material abu batu lolos #4, diperoleh nilai BJ bulk sebesar 2,7582, BJ SSD sebesar 2,8821, dan BJ semu sebesar 2,54, dengan nilai penyerapan sebesar 4,494%. Nilai ini menunjukkan bahwa abu batu memiliki berat jenis yang cukup tinggi dengan tingkat penyerapan yang lebih rendah dibandingkan pasir lolos #4.

Material RAP lolos #4 memiliki nilai penyerapan yang lebih rendah dibandingkan beberapa agregat halus baru. Hal ini kemungkinan terjadi karena agregat RAP masih diselimuti aspal lama, sehingga daya serap airnya lebih kecil. Namun, aspal lama pada RAP memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan aspal baru karena telah mengalami aging. Binder RAP yang telah menua cenderung lebih keras dan kaku, sehingga meskipun penyerapan airnya rendah, kemampuan adhesi dan fleksibilitasnya tetap perlu diperbaiki. Oleh karena itu, penggunaan NRL dalam penelitian ini menjadi relevan untuk membantu meningkatkan daya ikat dan elastisitas campuran berbasis RAP (Costa et al., 2024; Pasetto et al., 2021; Sepriyanna et al., 2025).

4.3 Hasil Ekstraksi RAP dan Estimasi Aspal Baru

Pengujian ekstraksi RAP dilakukan untuk mengetahui kandungan aspal lama yang masih terdapat pada material RAP. Hasil ekstraksi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menghitung estimasi kebutuhan aspal baru pada campuran agar kadar aspal total tetap sesuai dengan KAO yang direncanakan.

4.3.1 Hasil Ekstraksi RAP

Dari hasil perhitungan rumus 3.12; 3.13; 3.14 dan 3.15, diperoleh kandungan aspal yang berasal dari RAP sebesar 1,26%. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian kebutuhan aspal dalam campuran telah dipenuhi oleh aspal lama yang masih terkandung di dalam material RAP. Dengan demikian, penggunaan RAP dapat mengurangi kebutuhan aspal baru pada campuran.

Kandungan aspal RAP ini perlu diperhitungkan dalam penentuan kadar aspal tambahan, agar jumlah aspal total dalam campuran tetap sesuai dengan kadar aspal optimum yang telah direncanakan. Apabila KAO campuran konvensional sebesar 5,9%, maka kontribusi aspal dari RAP sebesar 1,26% dapat digunakan sebagai dasar untuk menyesuaikan kebutuhan aspal baru.

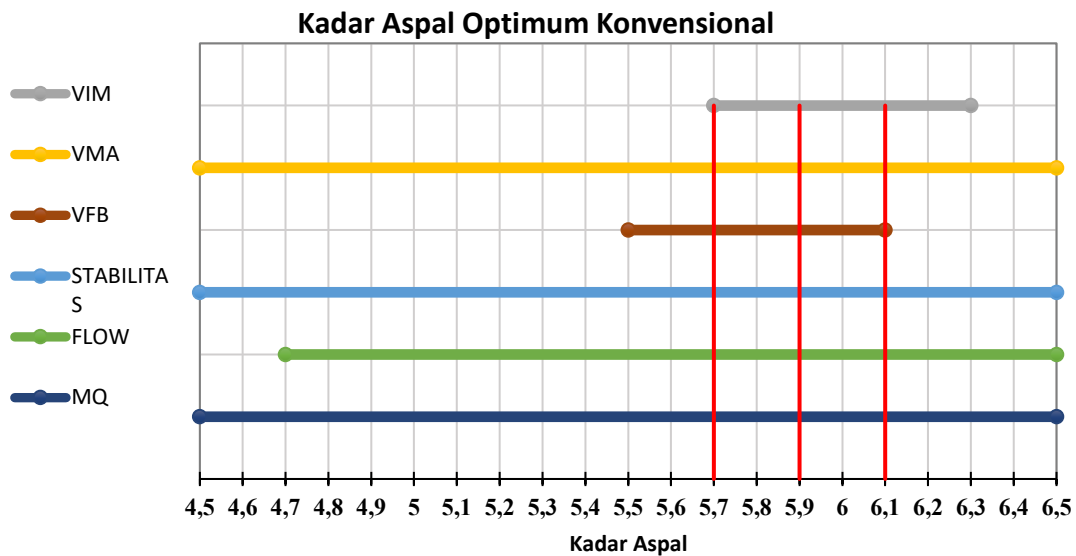
Secara teknis, kandungan aspal lama pada RAP menjadi keuntungan karena dapat mengurangi kebutuhan aspal baru. Akan tetapi, aspal lama pada RAP tidak dapat dianggap memiliki sifat yang sama dengan aspal baru karena telah mengalami penuaan akibat oksidasi, perubahan temperatur, dan beban lalu lintas selama masa layanan. Proses

penuaan menyebabkan binder menjadi lebih keras, lebih kaku, dan kehilangan sebagian sifat elastisnya. Oleh karena itu, meskipun RAP memberikan kontribusi terhadap kadar aspal total, kualitas binder RAP tetap perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi fleksibilitas, durabilitas, dan ketahanan campuran terhadap retak maupun ravelling (Costa et al., 2024; Pasetto et al., 2021; Podungge et al., 2022).

4.3.2 Estimasi Aspal Baru

Berdasarkan hasil perhitungan kandungan aspal dari material RAP pada tabel sebelumnya, diperoleh bahwa kandungan aspal RAP dalam campuran adalah sebesar 1,26%. Nilai tersebut merupakan kontribusi aspal lama yang berasal dari material RAP terhadap total kebutuhan aspal dalam campuran.

Berdasarkan hasil analisis Marshall campuran aspal konvensional, diperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 5,9%. Nilai ini digunakan sebagai acuan kebutuhan total aspal dalam campuran AC-WC. Pada campuran yang menggunakan RAP 30%, sebagian kebutuhan aspal telah dipenuhi oleh aspal lama yang masih melekat pada material RAP. Hasil pengujian ekstraksi menunjukkan bahwa RAP mengandung aspal sebesar 4,20%, sehingga kontribusi aspal RAP dalam campuran sebesar 1,26% ($30\% \times 4,20\%$). Oleh karena itu, kebutuhan aspal baru tidak lagi sebesar 5,9%, melainkan dikurangi dengan kontribusi aspal dari RAP. Dengan demikian, kadar aspal baru yang perlu ditambahkan 4,64% untuk mencapai kebutuhan total aspal yang setara dengan KAO campuran konvensional, yaitu 5,9%.



Gambar 4. 1 KAO Aspal Konvensional

Nilai aspal baru tersebut diperoleh dari selisih antara KAO aspal konvensional dengan kandungan aspal yang berasal dari RAP, yaitu:

Tabel 4. 7 Estimasi Aspal Baru

ESTIMASI ASPAL BARU		
KANDUNGAN RAP (%)	KAO (%)	ASPAL BARU (%)
1,26%	5,9%	4,64%

Berdasarkan Tabel 4. 7 menunjukkan bahwa penggunaan RAP dalam campuran dapat mengurangi kebutuhan aspal baru. Dengan adanya kandungan aspal lama pada material RAP, sebagian kebutuhan bahan pengikat sudah terpenuhi, sehingga penambahan aspal baru menjadi lebih rendah dibandingkan campuran tanpa RAP.

Secara teknik perkerasan, pengurangan aspal baru harus dilakukan secara hati-hati. Jika kontribusi aspal RAP tidak diperhitungkan, campuran dapat mengalami kelebihan kadar aspal yang berpotensi menyebabkan bleeding, flow tinggi, dan deformasi plastis. Sebaliknya, jika aspal RAP terlalu dianggap aktif seluruhnya, campuran dapat kekurangan aspal efektif karena sebagian binder RAP sudah tua dan tidak sepenuhnya mampu berinteraksi dengan agregat baru. Oleh karena itu, estimasi aspal baru sebesar 4,64% menjadi penting agar kadar aspal total tetap mendekati kebutuhan optimum dan

campuran tetap memiliki keseimbangan antara stabilitas, rongga udara, dan durabilitas (Costa et al., 2024; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

4.4 Analisis Gradasi dan Komposisi Job Mix Formula 30%

Analisis gradasi dan komposisi Job Mix Formula (JMF) dilakukan untuk menentukan susunan material agregat yang digunakan dalam campuran aspal, sehingga diperoleh gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi AC-WC. Pada penelitian ini, campuran direncanakan dengan penambahan material RAP sebesar 30% dari total agregat, sedangkan sisanya sebesar 70% berasal dari agregat baru.

Komposisi agregat baru terdiri dari agregat 3/4 sebesar 20%, agregat 1/2 sebesar 15%, pasir No. 4 sebesar 10%, dan abu batu No. 4 sebesar 25%. Sementara itu, komposisi RAP sebesar 30% dibagi menjadi tiga fraksi, yaitu RAP >9,5 sebesar 7%, RAP 9,5–4 sebesar 10%, dan RAP <4 sebesar 13%. Pembagian fraksi RAP ini dilakukan agar material RAP dapat tercampur secara merata dengan agregat baru dan menghasilkan gradasi gabungan yang memenuhi batas spesifikasi.

Dengan penggunaan 30% RAP, material hasil daur ulang perkerasan lama dimanfaatkan sebagai bagian dari campuran agregat sekaligus sebagai sumber aspal lama yang masih terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, dalam penyusunan JMF, penggunaan RAP tidak hanya diperhitungkan dari sisi gradasi agregat, tetapi juga dari kandungan aspal yang terdapat pada material RAP. Hal ini penting agar kebutuhan aspal baru dapat disesuaikan dan kadar aspal total dalam campuran tetap sesuai dengan kadar aspal optimum yang direncanakan.

Berdasarkan hasil analisis, gradasi yang terlalu kasar dapat menghasilkan rongga udara yang besar sehingga campuran lebih mudah dimasuki air dan udara. Kondisi tersebut dapat mempercepat oksidasi binder dan meningkatkan risiko ravelling. Sebaliknya, gradasi yang terlalu halus dapat menyebabkan campuran terlalu rapat, menurunkan rongga udara, dan meningkatkan risiko bleeding. Oleh karena itu, gradasi gabungan yang berada dalam amplop spesifikasi menunjukkan bahwa campuran memiliki potensi untuk mencapai kepadatan dan stabilitas yang baik. Penelitian sebelumnya juga menyatakan bahwa struktur gradasi agregat berpengaruh penting

terhadap parameter volumetrik dan ketahanan deformasi campuran aspal ((Li et al., 2022; Zhu et al., 2024).

4.4.1 Analisis Gradasi

Tabel 4. 8 Tabel Analisis Gradasi

PENENTUAN PERSENTASE KOMPOSISI FRAKSI AGREGAT											
Saringan		Agregat Kasar		Agregat Halus		RAP			Kombinasi Agregat	AC-WC	
No	Ukuran	3/4"	1/2"	Pasir	Abu Batu	>9,5	9,5-4	<4		Spesifikasi	
	(mm)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	Bawah	Atas
3/4"	19,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100
1/2"	12,500	71,35	100,00	100,00	100,00	41,80	100,00	100,00	90,20	90	100
3/8"	9,500	59,95	76,42	100,00	100,00	0,82	99,22	100,00	81,43	77	90
#4	4,750	28,40	42,93	100,00	100,00	0,82	0,05	100,00	60,18	53	69
#8	2,360	3,32	18,07	93,47	82,46	0,82	0,05	42,44	38,92	33	53
#16	1,180	2,71	5,14	81,23	67,82	0,82	0,05	13,04	28,15	21	40
#30	0,600	2,30	5,07	53,86	41,49	0,82	0,05	7,60	18,03	14	30
#50	0,300	2,26	4,87	30,54	27,23	0,82	0,05	2,91	11,48	9	22
#100	0,150	2,23	3,37	14,50	17,27	0,82	0,05	0,74	6,88	6	15
#200	0,075	1,54	2,50	12,22	11,35	0,82	0,05	0,04	4,81	4	9
PAN	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Perbandingan campuran dari persentase berat total agregat		Agregat 3/4"						=	20	%	
		Agregat 1/2"						=	15	%	
		Pasir No. 4						=	10	%	
		Abu Batu No. 4						=	25	%	
		RAP >9,5						=	7	%	
		RAP 9,5-4						=	10	%	
		RAP <4						=	13	%	
		Total						=	100	%	

Berdasarkan hasil analisis gradasi pada Tabel 4. 8, dilakukan penentuan persentase komposisi fraksi agregat untuk memperoleh gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi campuran AC-WC. Material yang digunakan dalam penyusunan gradasi gabungan terdiri dari agregat kasar, agregat halus, serta material RAP.

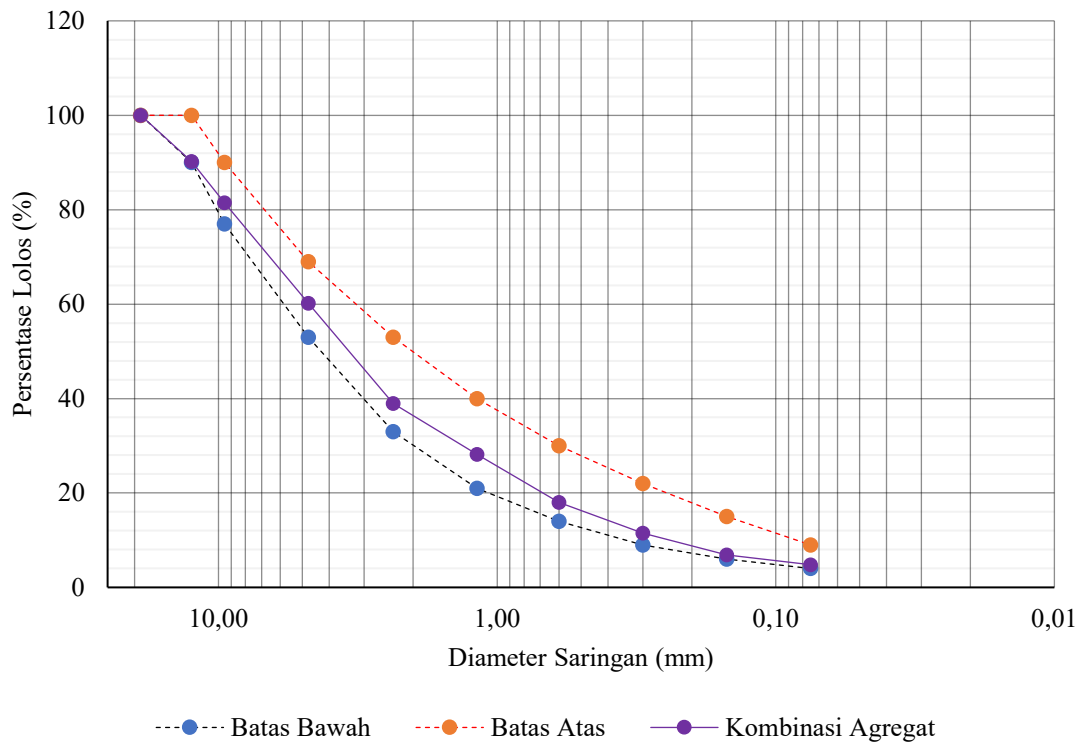
Komposisi campuran agregat yang digunakan terdiri dari agregat 3/4 sebesar 20%, agregat 1/2 sebesar 15%, pasir No. 4 sebesar 10%, abu batu No. 4 sebesar 25%, RAP >9,5 sebesar 7%, RAP 9,5-4 sebesar 10%, dan RAP <4 sebesar 13%. Dari keseluruhan komposisi tersebut diperoleh total campuran agregat sebesar 100%. Perbandingan ini digunakan untuk menghasilkan gradasi gabungan yang memenuhi batas spesifikasi yang telah ditentukan.

Hasil gradasi gabungan menunjukkan bahwa pada saringan 3/4 inci atau 19,00 mm, persentase lolos sebesar 100%, sesuai dengan batas spesifikasi yaitu 100%. Pada saringan 1/2 inci atau 12,50 mm, diperoleh persentase lolos sebesar 90,20%, yang masih berada dalam rentang spesifikasi 90–100%. Selanjutnya, pada saringan 3/8 inci atau 9,50 mm, nilai gradasi gabungan sebesar 81,43%, masih berada dalam batas spesifikasi 77–90%.

Pada saringan No. 4 atau 4,750 mm, persentase lolos agregat gabungan sebesar 60,18%, berada dalam rentang spesifikasi 53–69%. Pada saringan No. 8 atau 2,360 mm, diperoleh nilai sebesar 38,92%, yang juga masih memenuhi spesifikasi 33–53%. Kemudian pada saringan No. 16 atau 1,180 mm, persentase lolos sebesar 28,15%, berada dalam rentang spesifikasi 21–40%.

Untuk saringan yang lebih halus, yaitu No. 30 atau 0,600 mm, nilai gradasi gabungan sebesar 18,03%, masih berada dalam batas spesifikasi 14–30%. Pada saringan No. 50 atau 0,300 mm, diperoleh nilai sebesar 11,48%, sesuai dengan spesifikasi 9–22%. Selanjutnya, pada saringan No. 100 atau 0,150 mm, nilai persentase lolos sebesar 6,88%, berada dalam rentang spesifikasi 6–15%. Pada saringan No. 200 atau 0,075 mm, diperoleh nilai sebesar 4,81%, yang masih memenuhi spesifikasi 4–9%.

Berdasarkan hasil tersebut, seluruh nilai gradasi gabungan berada di antara batas bawah dan batas atas spesifikasi AC-WC. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi agregat yang digunakan telah memenuhi persyaratan gradasi yang ditentukan. Dengan demikian, komposisi campuran agregat tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam penyusunan Job Mix Formula.



Gambar 4. 2 Grafik Amplop Gradasi Gabungan

Selain ditampilkan dalam bentuk tabel, hasil analisis gradasi juga disajikan dalam bentuk grafik gradasi gabungan dalam Gambar 4.2 Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara ukuran diameter saringan dengan persentase agregat yang lolos. Kurva gradasi gabungan terlihat berada di antara garis batas bawah dan batas atas spesifikasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran agregat memiliki distribusi ukuran butiran yang baik dan sesuai dengan amplop gradasi yang disyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2025).

Nantinya, pada bagian amplop gradasi, grafik gradasi gabungan dapat digunakan untuk memperjelas bahwa kurva kombinasi agregat tidak keluar dari batas spesifikasi. Amplop gradasi berfungsi sebagai batas kontrol untuk memastikan bahwa gradasi campuran berada dalam rentang yang diizinkan. Apabila kurva gradasi gabungan berada di dalam amplop gradasi, maka campuran agregat dapat dikatakan memenuhi syarat dan layak digunakan dalam perencanaan campuran beraspal AC-WC.

Secara umum, hasil analisis gradasi menunjukkan bahwa kombinasi agregat kasar, agregat halus, dan RAP yang digunakan telah menghasilkan gradasi gabungan yang sesuai dengan spesifikasi. Hal ini penting karena gradasi agregat berpengaruh terhadap kepadatan campuran, stabilitas, rongga udara, serta kemampuan campuran dalam menerima beban lalu lintas. Gradasi yang baik akan membantu menghasilkan campuran aspal yang lebih stabil, padat, dan memiliki kinerja yang optimal di lapangan.

4.4.2 Komposisi Job Mix Formula RAP 30%

Perencanaan Job Mix Formula (JMF) dengan penggunaan RAP sebesar 30% dilakukan untuk mengetahui komposisi campuran yang paling optimal berdasarkan variasi kadar aspal. Pada tahap ini digunakan beberapa variasi kadar aspal, yaitu 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, dan 5,5%, yang nantinya diuji untuk menentukan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran dengan tambahan RAP 30%.

Variasi kadar aspal tersebut digunakan agar dapat dilihat pengaruh penambahan aspal terhadap karakteristik campuran, seperti stabilitas, flow, VIM, VMA, VFA, dan parameter Marshall lainnya. Hasil dari pengujian setiap variasi kadar aspal kemudian menjadi dasar dalam menentukan kadar aspal yang paling sesuai untuk campuran beraspal dengan pemanfaatan material RAP.

Tabel 4. 9 Komposisi JMF

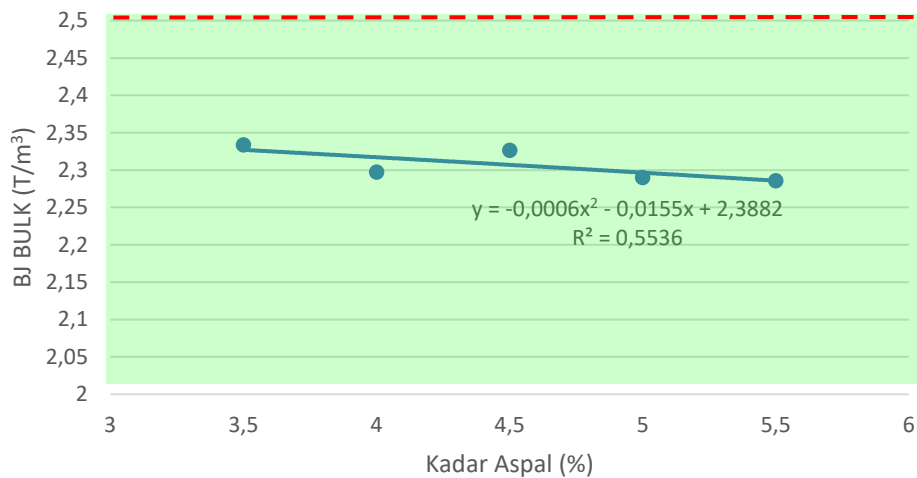
Kadar Aspal	Berat Aspal	Berat Agregat	Berat Total Benda Uji
3,5%	42 gram	1158 gram	1200 gram
4,0%	48 gram	1152 gram	1200 gram
4,5%	54 gram	1146 gram	1200 gram
5,0%	60 gram	1140 gram	1200 gram
5,5%	66 gram	1134 gram	1200 gram
6,0%	72 gram	1128 gram	1200 gram
6,5%	78 gram	1122 gram	1200 gram

4.5 Hasil Pengujian Marshall Campuran RAP 30%

Pengujian Marshall pada campuran RAP 30% dilakukan untuk mengevaluasi parameter volumetrik dan mekanik campuran. Parameter yang dianalisis meliputi berat jenis bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ).

Pengujian Marshall pada campuran RAP 30% dilakukan untuk mengevaluasi parameter volumetrik dan mekanik campuran. Parameter yang dianalisis meliputi berat jenis bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ).

4.5.1 BJ Bulk Campuran



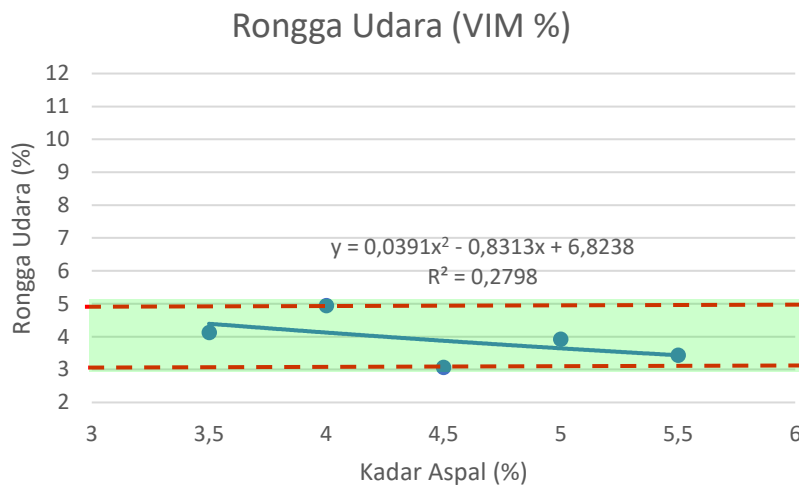
Gambar 4. 3 Grafik BJ Bulk Campuran

Berdasarkan Gambar 4.3 nilai BJ Bulk campuran RAP 30% cenderung menurun seiring bertambahnya kadar aspal. Nilai tertinggi diperoleh pada kadar aspal 3,5% sebesar 2,334 t/m³, sedangkan nilai terendah terjadi pada kadar aspal 5,5% sebesar 2,286 t/m³. Penurunan BJ Bulk menunjukkan bahwa penambahan kadar aspal tidak selalu meningkatkan kepadatan campuran. Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -0,0006x^2 - 0,0155x + 2,3882$ dengan $R^2 = 0,5536$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) dalam campuran, sedangkan x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan BJ Bulk bersifat polinomial. Koefisien negatif mengindikasikan bahwa peningkatan kadar aspal cenderung menurunkan nilai BJ Bulk. Nilai $R^2 = 0,5536$ menunjukkan bahwa 55,36% variasi BJ Bulk dapat dijelaskan oleh perubahan kadar aspal, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

Secara teknis, pada kadar aspal rendah, aspal berfungsi sebagai pelumas antaragregat sehingga membantu proses pemadatan. Namun, apabila kadar aspal terus meningkat, aspal yang berlebihan dapat mengganggu kontak antarbutiran agregat dan menyebabkan struktur agregat menjadi kurang terkunci. Kondisi ini dapat menurunkan kepadatan efektif campuran. Pada campuran berbasis RAP, fenomena ini juga dapat dipengaruhi oleh keberadaan aspal lama yang melekat pada agregat RAP. Jika aspal baru dan aspal lama tidak berinteraksi secara merata, maka distribusi binder dapat menjadi kurang homogen dan memengaruhi berat jenis bulk campuran. Parameter BJ Bulk penting

karena berkaitan langsung dengan kepadatan dan nilai rongga dalam campuran (Khan et al., 2025).

4.5.2 Grafik Rongga Udara / VIM



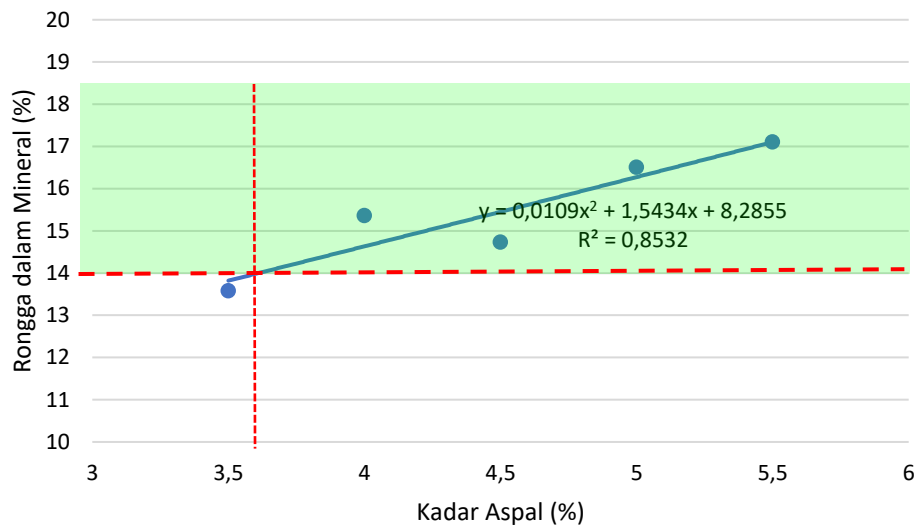
Gambar 4. 4 Grafik VIM

Berdasarkan Gambar 4.4, Nilai VIM menunjukkan persentase rongga udara dalam campuran setelah dipadatkan. Pada campuran RAP 30%, nilai VIM berada dalam rentang spesifikasi, yaitu sekitar 3–5%. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran memiliki rongga udara yang cukup untuk mengakomodasi pemadatan lanjutan akibat lalu lintas, tetapi tidak terlalu besar sehingga masih dapat membatasi masuknya air dan udara ke dalam campuran. Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 0,0391x^2 - 0,8313x + 6,8238$ dengan $R^2 = 0,2798$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) dalam campuran, sedangkan x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai VIM bersifat polinomial. Nilai $R^2 = 0,2798$ menunjukkan bahwa 27,98% variasi nilai VIM dapat dijelaskan oleh perubahan kadar aspal, sedangkan 72,02% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

Secara teknis, nilai VIM yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran mudah mengalami oksidasi, kerusakan akibat air, dan pelepasan butir karena air dapat masuk ke dalam rongga campuran. Sebaliknya, nilai VIM yang terlalu rendah dapat menyebabkan campuran terlalu padat dan berisiko mengalami bleeding ketika menerima beban lalu lintas dan temperatur tinggi. Oleh karena itu, nilai VIM yang memenuhi spesifikasi

menunjukkan bahwa kadar aspal dan gradasi campuran RAP 30% masih berada pada kondisi yang cukup seimbang. Hal ini sesuai dengan fungsi VIM sebagai indikator durabilitas dan tingkat kepadatan campuran beraspal (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025).

4.5.3 Rongga Dalam Mineral Agregat / VMA



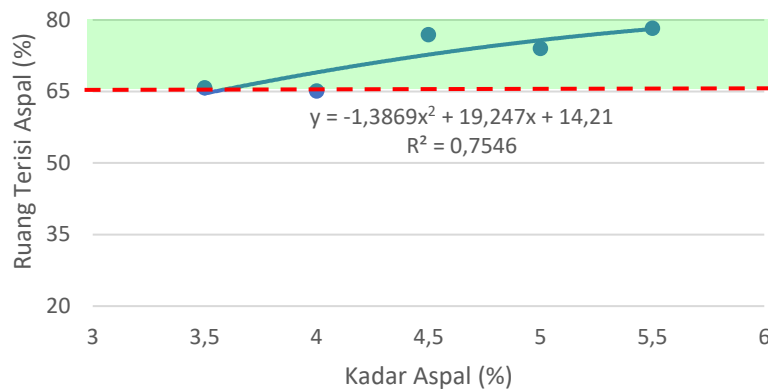
Gambar 4. 5 Grafik VMA

Berdasarkan Gambar 4.5 yaitu grafik VMA, terlihat bahwa nilai rongga dalam mineral agregat cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Pada kadar aspal 3,5%, nilai VMA berada pada nilai terendah, yaitu 13,58%, kemudian mengalami peningkatan pada kadar aspal berikutnya. Peningkatan nilai VMA menunjukkan bahwa volume rongga di antara partikel agregat semakin besar dan dapat terisi oleh aspal serta udara. Nilai VMA yang memenuhi spesifikasi sangat penting karena berpengaruh terhadap kemampuan campuran dalam menampung aspal. Apabila nilai VMA terlalu kecil, maka kadar aspal efektif dalam campuran menjadi kurang, sehingga campuran dapat menjadi kurang awet. Dari hasil grafik, sebagian besar nilai VMA telah memenuhi batas minimum yang disyaratkan, sehingga campuran dinilai cukup baik dari segi rongga antar agregat (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 0,0109x^2 + 1,5434x + 8,2855$ dengan $R^2 = 0,8532$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) dalam campuran, sedangkan x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai

VMA bersifat polinomial. Nilai $R^2 = 0,8532$ menunjukkan bahwa 85,32% variasi nilai VMA dapat dijelaskan oleh perubahan kadar aspal, sedangkan 14,68% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

4.5.4 Rongga Terisi Aspal / VFB



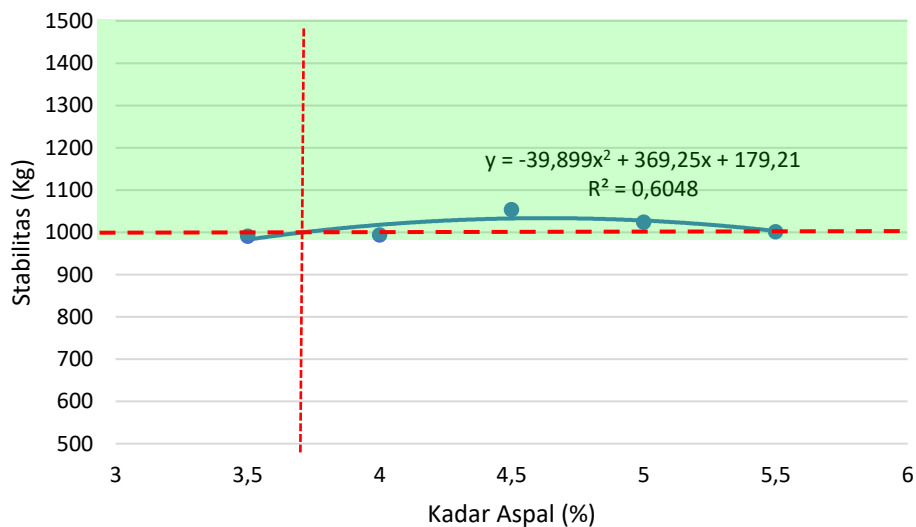
Gambar 4. 6 Grafik VFB

Berdasarkan Gambar 4.6, yaitu Grafik VFB menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan persentase rongga yang terisi oleh aspal. Berdasarkan hasil pengujian, nilai VFB cenderung meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kadar aspal yang digunakan, maka semakin banyak rongga dalam campuran yang terisi oleh aspal. Nilai VFB pada seluruh variasi kadar aspal berada di atas batas minimum spesifikasi, yaitu 65%. Kondisi ini menunjukkan bahwa campuran memiliki kadar aspal yang cukup untuk mengisi rongga antar agregat. Namun, kadar aspal yang terlalu tinggi juga perlu dihindari karena dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis dan berpotensi mengalami bleeding. Dengan demikian, nilai VFB yang diperoleh menunjukkan bahwa campuran masih berada dalam kondisi yang memenuhi persyaratan (Costa et al., 2024; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -1,3869x^2 + 19,247x + 14,21$ dengan $R^2 = 0,7546$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan

bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai VFB tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai VFB tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,7546$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu menjelaskan 75,46% variasi nilai VFB akibat perubahan kadar aspal, sedangkan 24,54% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

4.5.5 Stabilitas

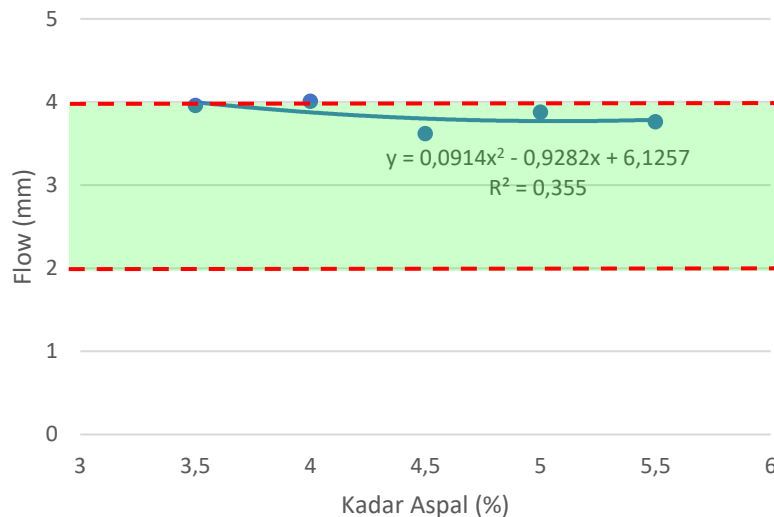


Gambar 4. 7 Grafik Stabilitas

Berdasarkan Gambar 4.7 yaitu grafik hubungan antara kadar aspal dan stabilitas, terlihat bahwa nilai stabilitas mengalami peningkatan hingga kadar aspal tertentu, kemudian mengalami penurunan kembali. Nilai stabilitas terendah diperoleh pada kadar aspal 3,5% sebesar 991,30 kg, sedangkan nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar aspal 4,5% sebesar 1053,50 kg. Peningkatan stabilitas sampai kadar aspal 4,5% menunjukkan bahwa penambahan aspal dapat meningkatkan ikatan antar agregat sehingga campuran menjadi lebih kuat dalam menerima beban. Namun, setelah melewati kadar aspal tersebut, nilai stabilitas mengalami penurunan karena kadar aspal yang berlebih dapat membuat campuran menjadi lebih plastis dan mengurangi kekuatan antar agregat. Dengan demikian, kadar aspal 4,5% memberikan nilai stabilitas paling baik dibandingkan variasi kadar aspal lainnya. Oleh karena itu, stabilitas yang tinggi perlu tetap dianalisis bersama flow dan MQ agar tidak menghasilkan campuran yang terlalu kaku atau terlalu plastis (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022; Pasetto et al., 2021).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -39,899x^2 + 369,25x + 179,21$ dengan $R^2 = 0,6048$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai stabilitas tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai stabilitas tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,6048$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu menjelaskan 60,48% variasi nilai stabilitas akibat perubahan kadar aspal, sedangkan 39,52% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model.

4.5.6 Kelelehan / Flow



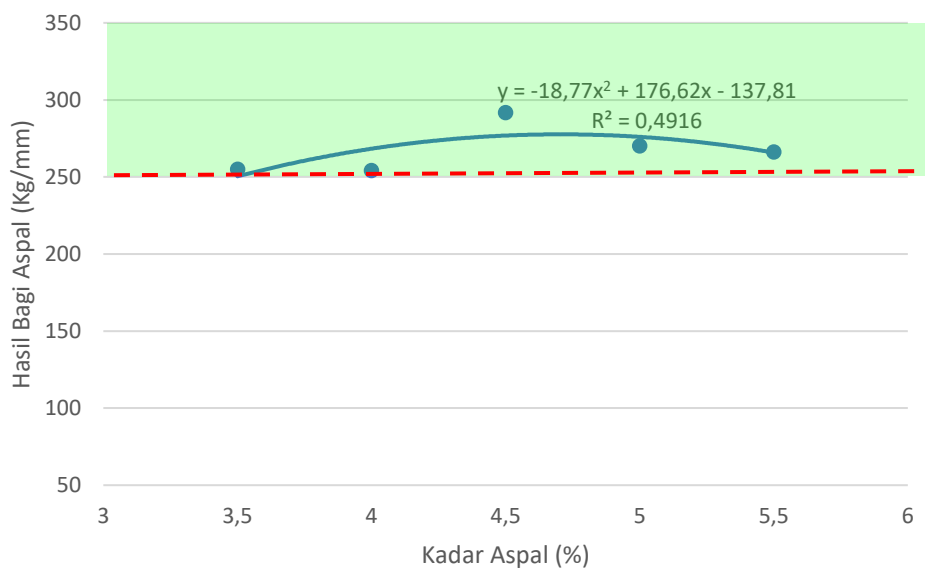
Gambar 4. 8 Grafik *Flow*

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat grafik kelelehan atau flow menunjukkan bahwa nilai flow pada setiap variasi kadar aspal berada dalam rentang spesifikasi yang disyaratkan. Nilai flow tertinggi diperoleh pada kadar aspal 4% sebesar 4,010 mm, sedangkan nilai terendah diperoleh pada kadar aspal 4,5% sebesar 3,620 mm. Secara umum, nilai flow menunjukkan tingkat kelenturan campuran terhadap beban. Nilai flow yang terlalu rendah menunjukkan campuran bersifat kaku dan mudah retak, sedangkan nilai flow yang terlalu tinggi menunjukkan campuran terlalu plastis dan mudah mengalami deformasi. Berdasarkan hasil pengujian, nilai flow yang diperoleh masih menunjukkan bahwa

campuran memiliki kelenturan yang cukup baik dan memenuhi persyaratan (Awan et al., 2022; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 0,0914x^2 - 0,9282x + 6,1257$ dengan $R^2 = 0,355$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai flow (kelelahan) tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai flow tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,355$ menunjukkan bahwa persamaan trendline tersebut mampu merepresentasikan sekitar 35,5% dari variasi data hasil pengujian, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar variasi kadar aspal yang diamati dalam penelitian ini.

4.5.7 Marshall Quotient / MQ



Gambar 4. 9 Grafik MQ

Berdasarkan gambar 4.9 yaitu grafik Marshall Quotient, terlihat bahwa nilai MQ mengalami peningkatan sampai kadar aspal 4,5%, kemudian menurun pada kadar aspal 5% dan 5,5%. Nilai MQ tertinggi diperoleh pada kadar aspal 4,5% sebesar 291,72 kg/mm, sedangkan nilai MQ terendah diperoleh pada kadar aspal 4% sebesar 254,29 kg/mm. Nilai Marshall Quotient menunjukkan perbandingan antara stabilitas dan flow, sehingga dapat

menggambarkan tingkat kekakuan campuran. Nilai MQ yang terlalu rendah menunjukkan campuran terlalu lentur, sedangkan nilai MQ yang terlalu tinggi menunjukkan campuran terlalu kaku. Dari hasil pengujian, seluruh nilai MQ masih berada di atas batas minimum yang disyaratkan, sehingga campuran dapat dikatakan memiliki kekakuan yang cukup baik.

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -18,77x^2 + 176,62x - 137,81$ dengan $R^2 = 0,4916$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar aspal (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar aspal yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar aspal dan nilai Marshall Quotient (MQ) tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai MQ tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan kadar aspal. Nilai $R^2 = 0,4916$ menunjukkan bahwa persamaan trendline tersebut mampu merepresentasikan sekitar 49,16% dari variasi data hasil pengujian, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar variasi kadar aspal yang diamati dalam penelitian ini.

Berdasarkan hasil analisis grafik parameter Marshall, dapat disimpulkan bahwa kadar aspal memiliki pengaruh terhadap kinerja campuran RAP 30%. Nilai-nilai yang diperoleh menunjukkan adanya perubahan karakteristik campuran pada setiap variasi kadar aspal. Oleh karena itu, penentuan kadar aspal optimum dilakukan dengan mempertimbangkan seluruh parameter Marshall, yaitu berat jenis bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient, agar diperoleh campuran yang memenuhi spesifikasi dan memiliki kinerja yang baik (Awan et al., 2022; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025).

Berdasarkan hasil pengujian Marshall RAP 30% dengan beberapa variasi kadar aspal didapatkan sebagai berikut pada Tabel 4.12:

Tabel 4. 10 Pengujian Marshall Test

Nomor Benda Uji	Kadar Aspal	Bj Maks Campuran	Isi Benda Uji	Berat (Gram)			Bj Bulk Campuran	Rongga Udara (Vim)	Rongga Dalam Min Agg (Vma)	Rongga Terisi Aspal (Vfb)	Stabilitas		Kelelahan Plastis	Hasil Bagi Maksimal	Flow	Hasil (Mq)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	3,5	2,434	503,93	1176	678,33	1182,27	2,334	4,121	13,579	65,826	104	991,302	0,040	24997,016	3,960	254,970	0,985
2	4	2,417	510,03	1171,5	668,33	1178,37	2,297	4,943	15,361	65,100	107	994,029	0,040	24930,421	4,010	254,290	0,960
3	4,5	2,400	503,33	1171	670	1173,33	2,327	3,061	14,733	76,962	110,33	1053,496	0,036	28600,176	3,620	291,722	0,986
4	5	2,383	515,10	1179,6	666,67	1181,77	2,290	3,915	16,508	74,026	107,67	1024,337	0,039	26498,637	3,877	270,286	0,983
5	5,5	2,367	515,27	1177,6	661,67	1176,93	2,286	3,438	17,108	78,273	105,67	1001,554	0,038	26097,349	3,763	266,193	0,979

4.6 Penentuan Kadar Aspal Optimum

Tabel 4. 11 SKh-1.6.27.3. (2) Ketentuan Sifat Campuran Beraspal Panas Daur Ulang

Sifat-sifat campuran	Standar uji	LTBA BRAP		ACRAP		
		Gradiasi halus	Gradiasi kasar	WC RAP	BC RAP	Base RAP
Jumlah tumbukan per bidang	ASTM D6926-10	75	75	75	75	112(1)
Rasio abu terhadap aspal	AASHTO M323	0,6–1,6	0,6–1,6	0,6–1,2	0,6–1,2	0,6–1,2
Rongga dalam campuran (VIM), %	AASHTO M323	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)	3,0–5,0(2)
Rongga dalam mineral agregat (VMA), %	AASHTO M323	Min. 15	Min. 15	Min. 14	Min. 13	Min. 12
Rongga terisi aspal (VFB), %	AASHTO M323	Min. 65	Min. 65	Min. 65	Min. 65	Min. 65
Stabilitas Marshall, kg	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	Min. 900	Min. 900	Min. 1000	Min. 1000	Min. 2250(1)
Pelelehan, mm	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	2,0–4,5	2,0–4,5	2,0–4,0	2,0–4,0	3,0(1)–6,0(1)
Stabilitas Marshall sisa, %	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	Min. 90	Min. 90	Min. 90	Min. 90	Min. 90
Stabilitas Dinamis, Lintasan/mm (3)	JRA-1980	Min. 2000	Min. 2000	Min. 2500	Min. 2500	Min. 2500

Pada Tabel 4.11 terdapat Spesifikasi Campuran Beraspal Panas Daur Ulang Pencampuran Di Unit Produksi Campuran Aspal menurut Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga agar dapat menentukan Kadar Aspal Optimum AC-WC RAP maka spesifikasi menjadi acuan (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2019).

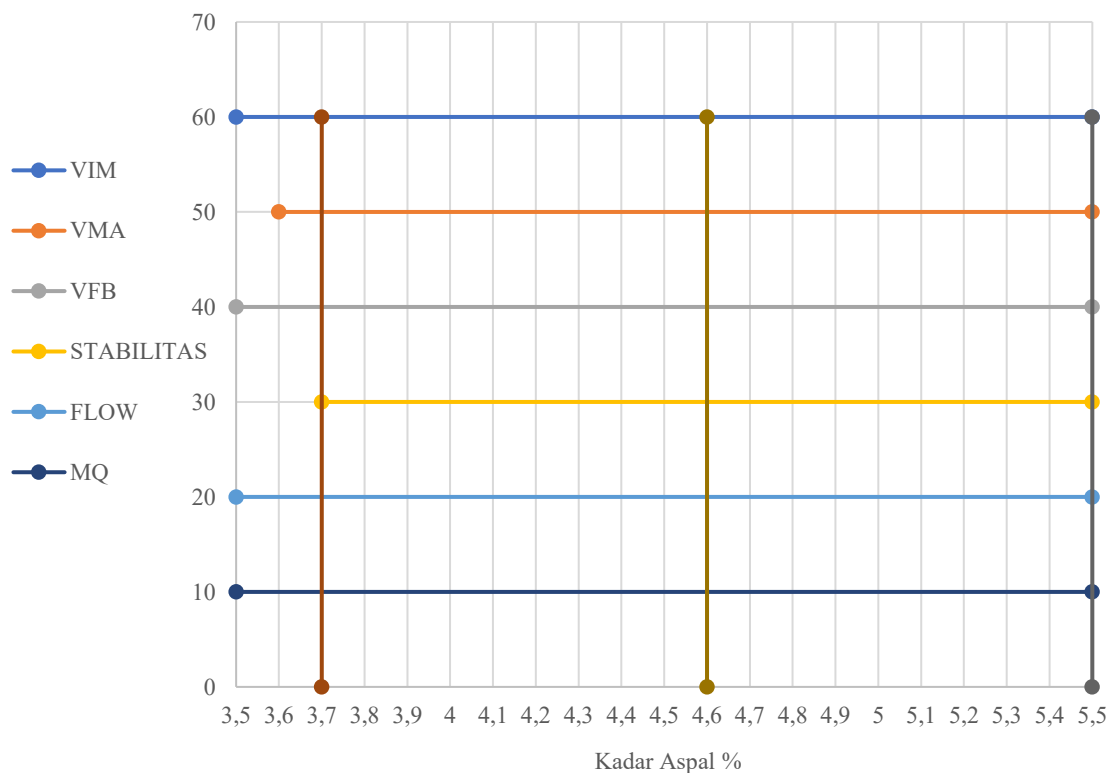
Penentuan kadar aspal optimum pada campuran dengan penggunaan RAP 30% dilakukan berdasarkan hasil pengujian Marshall pada beberapa variasi kadar aspal, yaitu 3,5%, 4%, 4,5%, 5%, dan 5,5%. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar aspal yang paling memenuhi seluruh parameter persyaratan campuran, seperti VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient (MQ) dapat dilihat pada Tabel 4.14:

Tabel 4. 12 Kadar Aspal

Kadar Aspal	BJ Bulk	VIM	VMA	VFB	STABILITAS	FLOW	MQ
3,5	2,334	4,121	13,579	65,826	991,302	3,960	254,970
4	2,297	4,943	15,361	65,100	994,029	4,010	254,290
4,5	2,327	3,061	14,733	76,962	1053,496	3,620	291,722
5	2,290	3,915	16,508	74,026	1024,337	3,877	270,286
5,5	2,286	3,438	17,108	78,273	1001,554	3,763	266,193
SPESIFIKASI	maks. 2,5	min 3 - 5	MIN. 14	MIN. 65	min. 1000	min 2 - 4	min 250

Berdasarkan hasil pengujian, nilai VIM pada setiap variasi kadar aspal masih berada dalam rentang spesifikasi yaitu 3–5%. Nilai VMA juga menunjukkan hasil yang memenuhi syarat, kecuali pada kadar aspal 3,5% yang masih berada di bawah batas minimum 14%. Untuk parameter VFB, seluruh variasi kadar aspal telah memenuhi batas minimum yaitu 65%.

Pada parameter stabilitas, kadar aspal 3,5% dan 4% belum memenuhi batas minimum spesifikasi yaitu 1000 kg, sedangkan kadar aspal 4,5%, 5%, dan 5,5% telah memenuhi persyaratan. Nilai flow pada seluruh kadar aspal berada dalam rentang spesifikasi 2–4 mm, meskipun pada kadar aspal 4% nilainya mendekati batas atas. Sementara itu, nilai Marshall Quotient (MQ) pada seluruh variasi kadar aspal telah memenuhi batas minimum yaitu 250 kg/mm.



Gambar 4. 10 Diagram Pemilihan KAO RAP

Berdasarkan Gambar 4.10 dapat dilihat diagram pemilihan kadar aspal optimum, diperoleh rentang kadar aspal yang memenuhi seluruh parameter spesifikasi yaitu antara 3,7% sampai 5,5%. Nilai batas bawah diperoleh dari parameter yang mulai memenuhi spesifikasi pada kadar aspal 3,7%, sedangkan batas atas berada pada kadar aspal 5,5%. Selanjutnya, kadar aspal optimum ditentukan dari nilai tengah rentang tersebut.

Perhitungan kadar aspal optimum adalah sebagai berikut dengan menggunakan rumus 3.11:

$$KAO = (3,7\% + 5,5\%) / 2 = 4,6\% \quad (3.11)$$

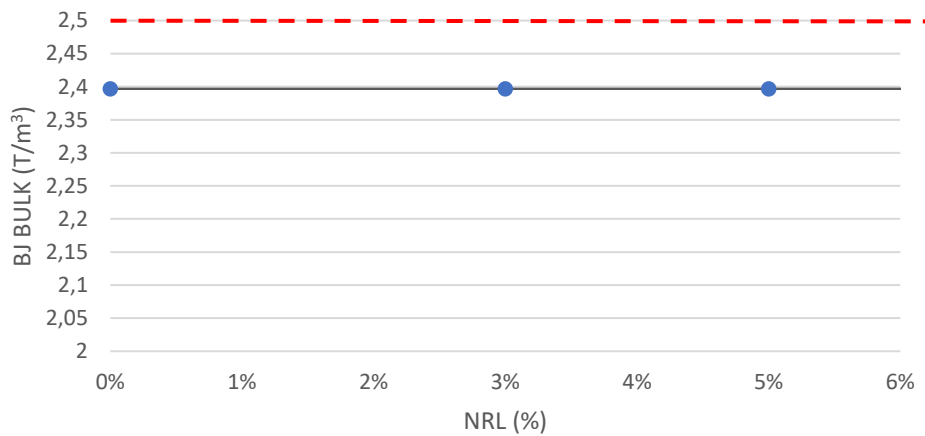
Dengan demikian, kadar aspal optimum untuk campuran dengan penggunaan RAP 30% diperoleh sebesar 4,6%. Nilai ini digunakan sebagai kadar aspal rencana pada campuran beraspal dengan material RAP, karena telah memenuhi parameter karakteristik Marshall dan berada dalam rentang spesifikasi yang disyaratkan.

4.7 Hasil Pengujian Marshall dengan Penambahan NRL

Pengujian Marshall dengan penambahan NRL dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi kadar NRL terhadap karakteristik campuran beraspal pada kadar aspal optimum. Variasi kadar NRL yang digunakan yaitu 0%, 3%, dan 5%. Parameter yang diamati meliputi berat jenis bulk campuran, rongga udara atau VIM, rongga dalam mineral agregat atau VMA, rongga terisi aspal atau VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient.

Hasil pengujian Marshall dengan penambahan NRL digunakan untuk mengetahui perubahan karakteristik campuran akibat adanya penambahan bahan NRL. Data hasil pengujian dari masing-masing variasi kemudian dibandingkan dengan spesifikasi yang berlaku.

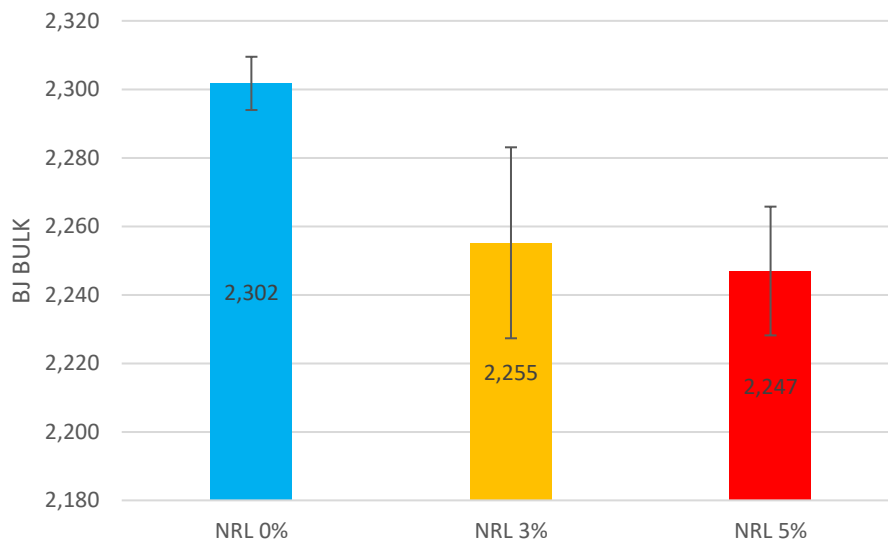
4.7.1 BJ Bulk Campuran RAP+NRL



Gambar 4. 11 Grafik BJ Bulk Campuran

Berdasarkan Gambar 4.11, hasil pengujian Marshall pada KAO 4,6% menunjukkan bahwa penambahan NRL tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap nilai BJ Bulk campuran. Nilai BJ Bulk cenderung relatif stabil pada setiap variasi, meskipun pada kadar NRL 5% diperoleh nilai terendah sebesar 2,247. Perbedaan nilai tersebut masih tergolong kecil sehingga belum dapat menunjukkan adanya pengaruh penurunan yang nyata terhadap kepadatan campuran.

Secara teknis, penambahan NRL dapat memengaruhi sifat binder menjadi lebih elastis dan lebih kental sehingga berpotensi mengubah proses penyelimutan agregat dan pemadatan. Namun, pada penelitian ini perubahan nilai BJ Bulk yang terjadi relatif kecil sehingga menunjukkan bahwa penambahan NRL pada variasi yang digunakan belum memberikan dampak signifikan terhadap kepadatan campuran. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penggunaan NRL masih dapat mempertahankan karakteristik kepadatan campuran pada rentang kadar yang diteliti (Suwanto et al., 2023; Wen et al., 2017a).

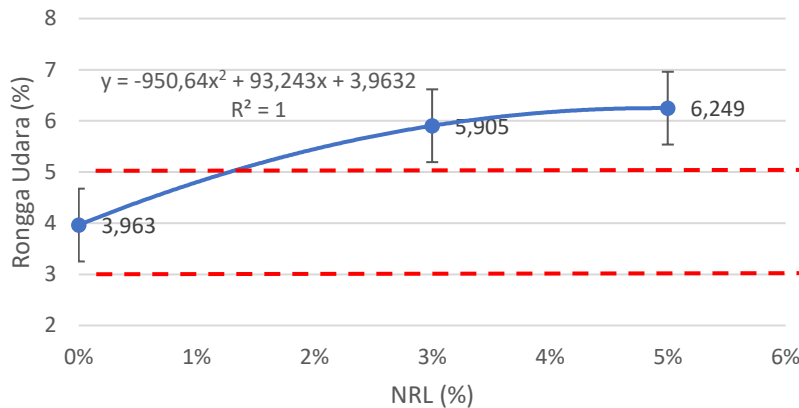


Gambar 4. 12 Diagram Bj Bulk

Berdasarkan Gambar 4.12, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Berat Jenis Bulk (BJ Bulk) cenderung menurun. Nilai BJ Bulk pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 2,302, kemudian menurun menjadi 2,255 pada NRL 3% dan kembali menurun menjadi 2,247 pada NRL 5%. Penurunan nilai BJ Bulk menunjukkan bahwa kepadatan campuran berkurang seiring meningkatnya kadar NRL. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan nilai VIM yang menunjukkan bertambahnya rongga udara dalam campuran, sehingga berat jenis campuran menjadi lebih rendah.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian BJ Bulk. Nilai standar deviasi BJ Bulk untuk campuran RAP+NRL sebesar 0,0078 (0%), 0,0279 (3%), dan 0,0188 (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% memiliki variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan campuran lainnya. Sementara itu, campuran NRL 0% menunjukkan hasil yang paling konsisten karena memiliki nilai standar deviasi paling kecil.

4.7.2 Grafik Rongga Udara / VIM RAP+NRL



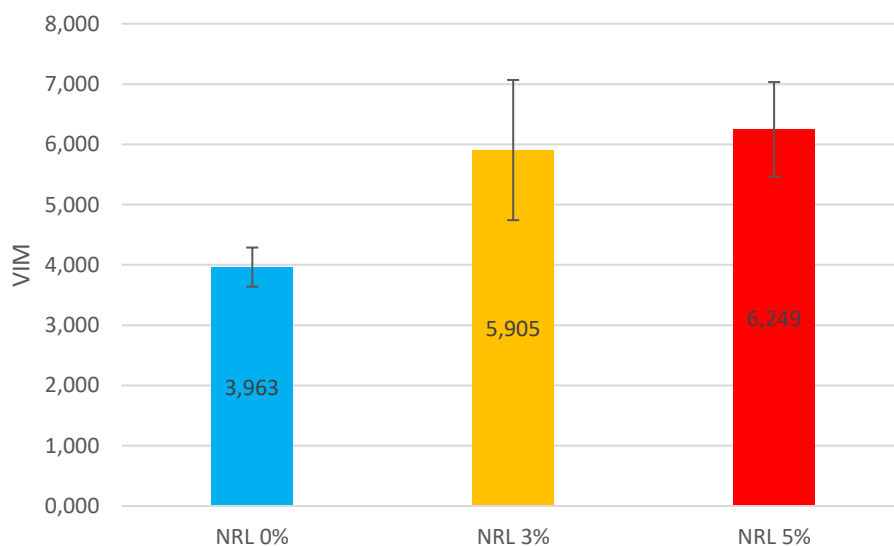
Gambar 4. 13 Grafik VIM

Berdasarkan Gambar 4.13 nilai VIM pada campuran dengan NRL cenderung meningkat, terutama pada NRL 5% yang mencapai 6,249%. Peningkatan VIM menunjukkan bertambahnya rongga udara dalam campuran. Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -950,64x^2 + 93,243x + 3,9632$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menyatakan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan x^2 merupakan kuadrat dari kadar NRL yang berfungsi membentuk pola hubungan polinomial. Keberadaan suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai VIM tidak bersifat linier, melainkan mengikuti pola kurva sehingga perubahan nilai VIM tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan NRL. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu merepresentasikan seluruh data hasil pengujian dengan sangat baik, sehingga perubahan nilai VIM dapat dijelaskan sepenuhnya oleh variasi kadar NRL yang digunakan pada penelitian ini.

Secara teknis, hal ini dapat terjadi karena penambahan NRL meningkatkan viskositas binder dan membuat campuran lebih elastis, sehingga campuran menjadi kurang mudah dipadatkan apabila suhu, durasi pencampuran, dan energi pemadatan tidak dikontrol secara optimal (Suwanto et al., 2023; Wen et al., 2017a). Kondisi ini menunjukkan bahwa penggunaan NRL tidak selalu menurunkan kinerja campuran, tetapi dapat memengaruhi *workability* sehingga campuran berpotensi membutuhkan proses pemadatan yang lebih efektif atau energi pemadatan yang lebih besar agar rongga udara

dapat berada dalam batas spesifikasi. Hal ini sejalan dengan yang menunjukkan bahwa penggunaan NRL pada material RAP dapat memberikan pengaruh positif pada kadar tertentu, namun tetap memerlukan kontrol terhadap komposisi dan proses pemadatan agar memenuhi spesifikasi (Paotong et al., 2020b).

Nilai VIM yang tinggi perlu diperhatikan karena rongga udara yang berlebihan dapat menjadi jalur masuk air dan udara ke dalam campuran. Kondisi tersebut dapat mempercepat oksidasi binder, menurunkan adhesi aspal-agregat, dan meningkatkan potensi ravelling. Oleh karena itu, meskipun NRL berpotensi meningkatkan elastisitas dan daya lekat campuran, kadar yang terlalu tinggi tetap perlu dikontrol agar tidak menyebabkan rongga udara melebihi batas ideal dan tidak menurunkan performa volumetrik campuran. Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa campuran RAP dengan penambahan NRL perlu memperhatikan aspek *workability* dan pemadatan, karena pada penerapan lapangan campuran semacam ini dapat memerlukan pengaturan suhu serta energi pemadatan yang lebih memadai (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025)



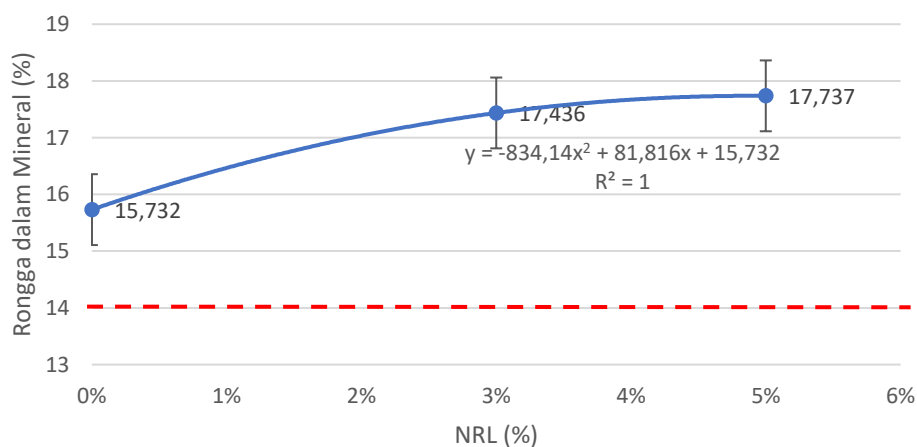
Gambar 4. 14 Diagram VIM

Berdasarkan Gambar 4.14, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Void in Mix (VIM) cenderung meningkat. Nilai VIM pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 3,963%, kemudian meningkat menjadi 5,905% pada NRL 3% dan 6,249% pada

NRL 5%. Peningkatan nilai VIM menunjukkan bahwa jumlah rongga udara dalam campuran semakin besar seiring bertambahnya kadar NRL. Kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran menjadi kurang padat sehingga berpotensi meningkatkan permeabilitas dan mempercepat proses penuaan perkerasan apabila kadar rongga udara terlalu tinggi.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian VIM. Nilai standar deviasi VIM untuk campuran RAP+NRL sebesar 0,324% (0%), 1,163% (3%), dan 0,784% (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% memiliki variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan campuran NRL 0% dan NRL 5%, sedangkan campuran NRL 0% menunjukkan hasil yang paling konsisten karena memiliki nilai deviasi terkecil.

4.7.3 Rongga Dalam Mineral Agregat / VMA RAP+NRL

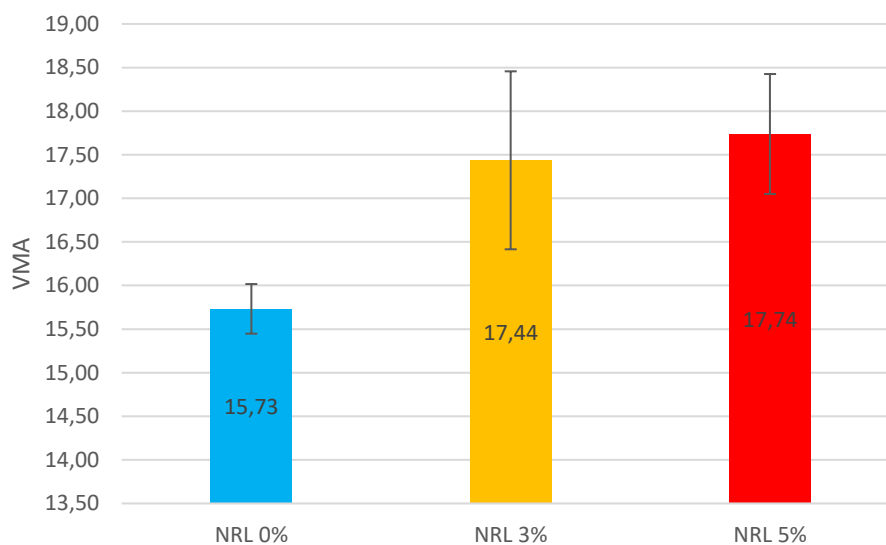


Gambar 4. 15 Grafik VMA

Berdasarkan Gambar 4.15, nilai rongga dalam mineral agregat atau Void in Mineral Aggregate (VMA) menunjukkan kecenderungan meningkat. Pada kadar NRL 0%, nilai VMA sebesar 15,732%, kemudian meningkat menjadi 17,436% pada kadar NRL 3%, dan menjadi 17,737% pada kadar NRL 5%. Seluruh nilai VMA tersebut masih memenuhi batas minimum spesifikasi, yaitu 14%. Peningkatan nilai VMA menunjukkan bahwa ruang antarbutir agregat dalam campuran semakin besar akibat penambahan NRL.

Kondisi ini sejalan dengan meningkatnya nilai VIM pada campuran (ASTM International, 2022; Kementerian Pekerjaan Umum, 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -834,14x^2 + 81,816x + 15,732$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai VMA (%) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai VMA bersifat nonlinier atau mengikuti pola polinomial. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan VMA tidak terjadi secara konstan pada setiap penambahan NRL. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline mampu merepresentasikan seluruh data hasil pengujian dengan sangat baik, sehingga variasi nilai VMA pada penelitian ini dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL yang digunakan.

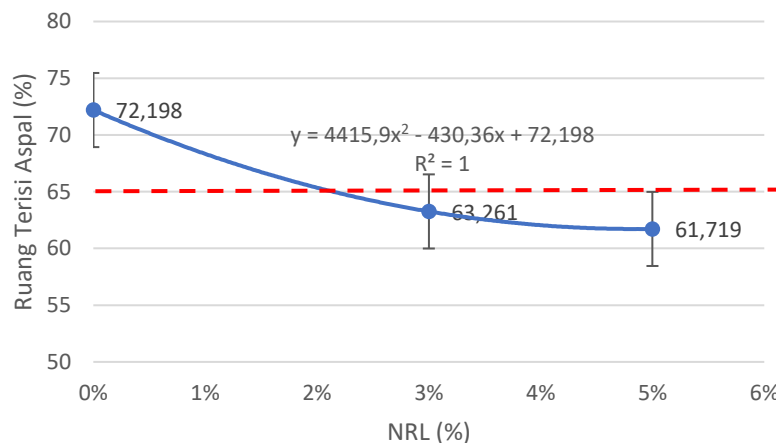


Gambar 4. 16 Diagram VMA

Berdasarkan Gambar 4.16, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Void in Mineral Aggregate (VMA) cenderung meningkat. Nilai VMA pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 15,73%, kemudian meningkat menjadi 17,44% pada NRL 3% dan kembali meningkat menjadi 17,74% pada NRL 5%. Peningkatan nilai VMA menunjukkan bahwa volume rongga antar butiran agregat dalam campuran semakin besar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur agregat menjadi lebih longgar sehingga ruang yang tersedia untuk aspal dan udara dalam campuran bertambah.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian VMA. Nilai standar deviasi VMA untuk campuran RAP+NRL sebesar 0,285% (0%), 1,021% (3%), dan 0,688% (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% menunjukkan variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan kadar NRL lainnya. Sementara itu, campuran NRL 0% memiliki variasi data paling kecil sehingga menunjukkan hasil pengujian yang lebih konsisten.

4.7.4 Rongga Terisi Aspal / VFB RAP+NRL

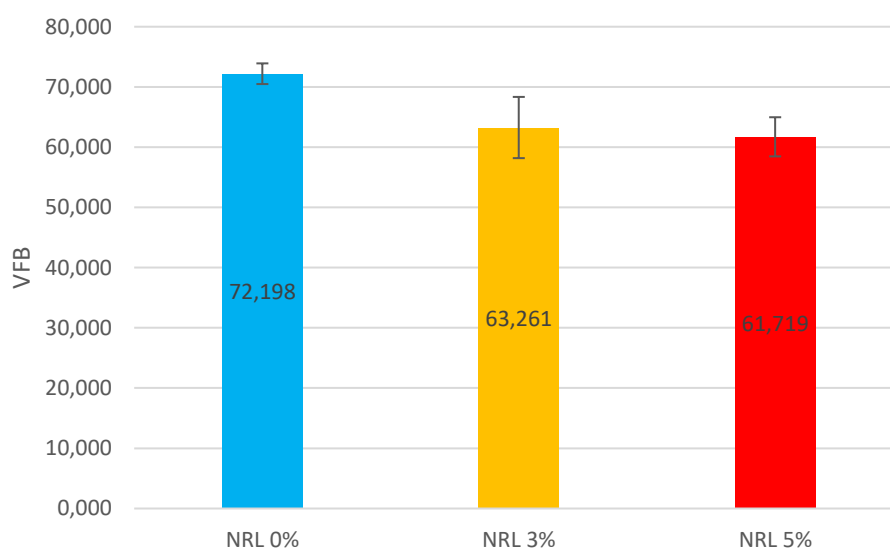


Gambar 4. 17 Grafik VFB

Berdasarkan Gambar 4.17, nilai rongga terisi aspal atau Void Filled with Bitumen (VFB) mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar NRL. Pada kadar NRL 0%, nilai VFB sebesar 72,198%, kemudian menurun menjadi 63,261% pada kadar NRL 3%, dan menjadi 61,719% pada kadar NRL 5%. Penurunan nilai VFB menunjukkan bahwa persentase rongga dalam agregat yang terisi aspal semakin berkurang. Hal ini dipengaruhi oleh meningkatnya rongga udara dalam campuran. Berdasarkan batas minimum spesifikasi 65%, campuran dengan kadar NRL 0% memenuhi spesifikasi, sedangkan kadar NRL 3% dan 5% belum memenuhi spesifikasi (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Khan et al., 2025).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 4415,9x^2 - 430,36x + 72,198$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam

campuran, sedangkan y menunjukkan nilai VFB (%) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai VFB mengikuti pola polinomial atau nonlinier. Seiring bertambahnya kadar NRL, nilai VFB cenderung menurun dengan laju penurunan yang tidak konstan. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga perubahan nilai VFB dapat dijelaskan sepenuhnya oleh variasi kadar NRL yang digunakan pada penelitian ini.



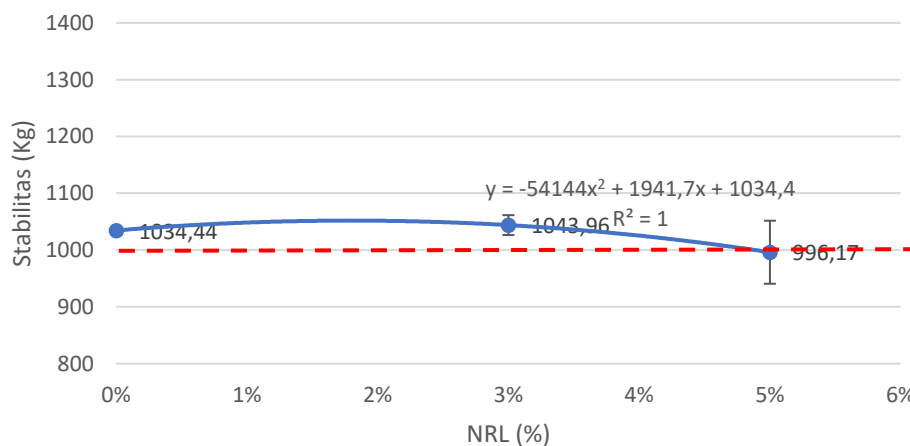
Gambar 4. 18 Diagram VFB

Berdasarkan Gambar 4.18, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Void Filled with Bitumen (VFB) cenderung menurun. Nilai VFB pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 72,20%, kemudian menurun menjadi 63,26% pada NRL 3% dan kembali menurun menjadi 61,79% pada NRL 5%. Penurunan nilai VFB menunjukkan bahwa persentase rongga agregat yang terisi aspal semakin berkurang seiring meningkatnya kadar NRL. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan nilai VIM dan VMA yang menunjukkan bertambahnya volume rongga dalam campuran, sehingga proporsi rongga yang terisi aspal menjadi lebih kecil.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian VFB. Nilai standar deviasi VFB untuk campuran RAP+NRL sebesar 1,72% (0%), 5,08% (3%), dan 3,25% (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar

penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 3% menunjukkan variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan kadar NRL lainnya. Sementara itu, campuran NRL 0% memiliki variasi data paling kecil sehingga menunjukkan hasil pengujian yang lebih konsisten.

4.7.5 Stabilitas RAP+NRL



Gambar 4. 19 Grafik Stabilitas

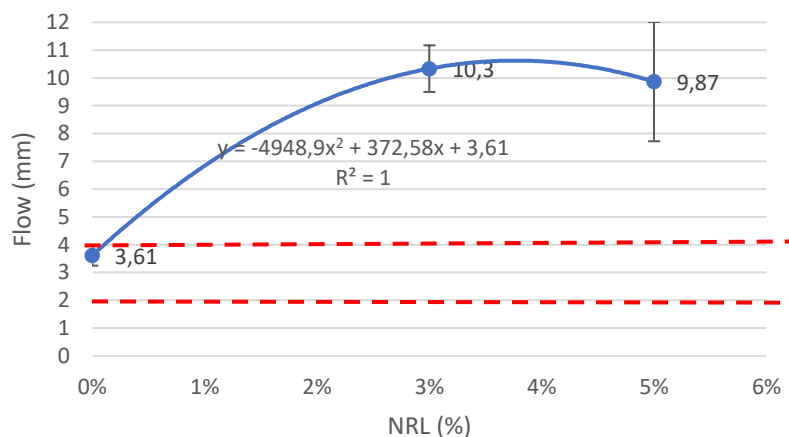
Berdasarkan Gambar 4.19, campuran NRL 0%, nilai stabilitas sebesar 1034,44 kg. Setelah penambahan NRL 3%, stabilitas meningkat menjadi 1043,96 kg dan menjadi nilai stabilitas tertinggi. Peningkatan ini menunjukkan bahwa NRL pada kadar 3% mampu memperbaiki ikatan antara aspal, agregat baru, dan material RAP. Secara teknis, NRL berperan sebagai modifier yang dapat meningkatkan elastisitas dan kohesi binder, sehingga campuran mampu menahan beban tekan lebih baik.

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -54144x^2 + 1941,7x + 1034,4$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai stabilitas (kg) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai stabilitas mengikuti pola polinomial atau nonlinier. Nilai stabilitas meningkat hingga mencapai titik optimum pada kadar NRL tertentu, kemudian mengalami penurunan pada kadar yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL dalam jumlah terbatas dapat meningkatkan kekuatan campuran, namun penambahan yang berlebihan berpotensi

menurunkan kemampuan campuran dalam menahan beban. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga variasi nilai stabilitas dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL pada penelitian ini.

Namun, pada kadar NRL 5%, stabilitas menurun menjadi 996,17 kg. Penurunan ini menunjukkan bahwa penambahan NRL yang lebih besar tidak selalu meningkatkan kekuatan campuran. Kadar NRL yang terlalu tinggi dapat membuat campuran lebih plastis, menurunkan kepadatan, meningkatkan rongga udara, dan mengurangi interlocking antaragregat. Dengan demikian, kadar NRL 3% dapat dianggap lebih efektif karena masih mampu meningkatkan stabilitas tanpa menyebabkan penurunan struktur campuran secara berlebihan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa karet alam dapat meningkatkan kinerja campuran aspal pada kadar yang tepat, tetapi kadar yang terlalu tinggi dapat menurunkan kekuatan campuran (Nirwana et al., 2025; Paotong et al., 2020b; Wen et al., 2017a).

4.7.6 Kelelehan / Flow RAP+NRL



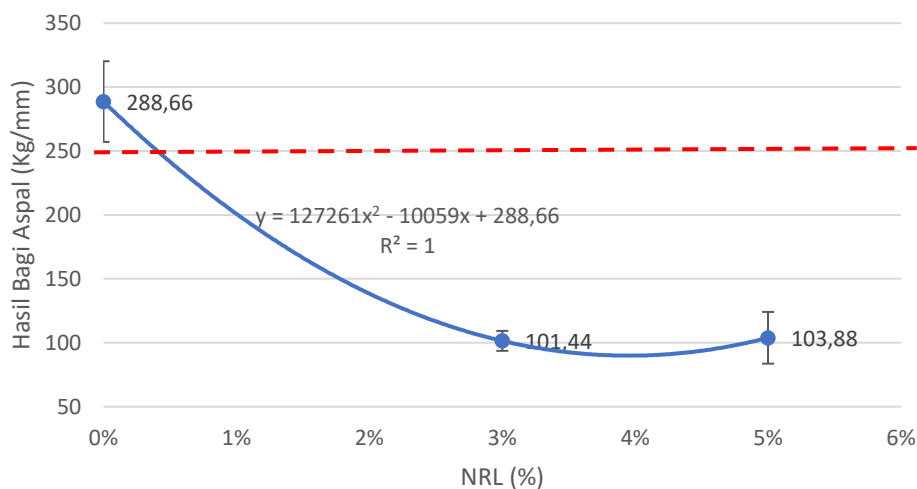
Gambar 4. 20 Grafik *Flow*

Berdasarkan Gambar 4.20, nilai kelelehan atau flow mengalami peningkatan yang cukup besar setelah penambahan NRL. Pada kadar NRL 0%, nilai flow sebesar 3,61 mm dan masih berada dalam batas spesifikasi 2–4 mm. Pada kadar NRL 3%, nilai flow meningkat menjadi 10,3 mm, sedangkan pada kadar NRL 5% sebesar 9,87 mm. Peningkatan nilai flow menunjukkan bahwa campuran memiliki deformasi yang lebih besar saat menerima

beban. Kondisi ini tidak selalu bersifat negatif, karena nilai flow yang lebih tinggi dalam batas tertentu dapat menunjukkan peningkatan fleksibilitas campuran akibat penambahan NRL. Namun, apabila nilai flow melebihi spesifikasi, campuran dapat menjadi terlalu plastis dan berpotensi mengalami deformasi permanen, sehingga hasil flow perlu dianalisis bersama parameter Marshall lainnya (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022; Wen et al., 2017a).

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = -1948,9x^2 + 372,58x + 3,61$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai flow (mm) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai flow bersifat nonlinier atau mengikuti pola polinomial. Nilai flow meningkat secara signifikan hingga mencapai nilai maksimum pada kadar NRL tertentu, kemudian mengalami sedikit penurunan pada kadar NRL yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan fleksibilitas dan kemampuan deformasi campuran, namun pada kadar yang lebih tinggi pengaruh peningkatan tersebut mulai berkurang. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga variasi nilai flow dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL pada penelitian ini.

4.7.7 Marshall Quotient / MQ RAP+NRL

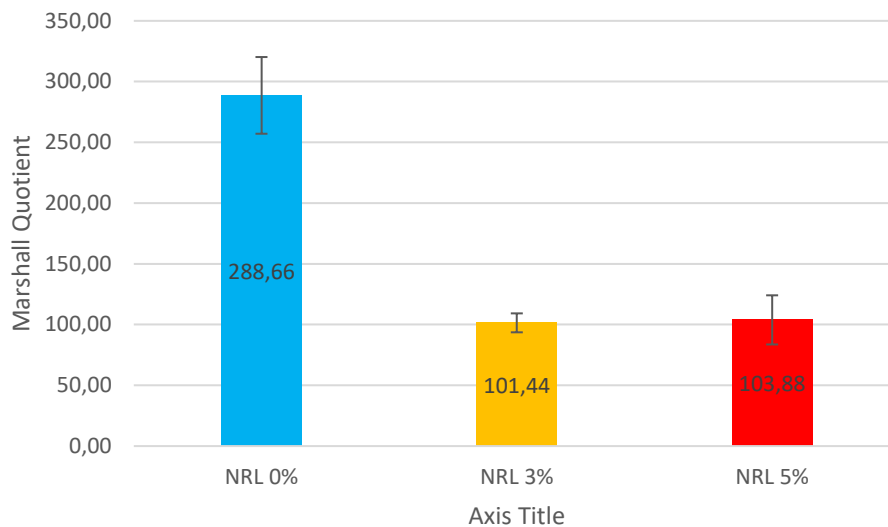


Gambar 4. 21 Grafik MQ

Berdasarkan Gambar 4.21, Penambahan NRL menyebabkan nilai Marshall Quotient cenderung menurun. Penurunan MQ terjadi karena peningkatan flow lebih dominan dibandingkan peningkatan stabilitas. Secara teknis, MQ menunjukkan tingkat kekakuan campuran. Semakin rendah nilai MQ, maka campuran cenderung semakin plastis dan semakin mudah mengalami deformasi.

Persamaan trendline yang diperoleh adalah $y = 127261x^2 - 10059x + 288,66$ dengan $R^2 = 1$. Pada persamaan tersebut, x menunjukkan kadar NRL (%) yang digunakan dalam campuran, sedangkan y menunjukkan nilai Marshall Quotient (kg/mm) yang dihasilkan. Adanya suku x^2 menunjukkan bahwa hubungan antara kadar NRL dan nilai MQ bersifat nonlinier atau mengikuti pola polinomial. Nilai MQ mengalami penurunan yang cukup tajam setelah penambahan NRL, kemudian cenderung meningkat kembali pada kadar NRL yang lebih tinggi, meskipun masih berada di bawah nilai MQ campuran tanpa NRL. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan fleksibilitas campuran, namun pada saat yang sama mengurangi kekakuan campuran yang tercermin dari menurunnya nilai MQ. Nilai $R^2 = 1$ menunjukkan bahwa persamaan trendline memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data hasil pengujian, sehingga variasi nilai MQ dapat dijelaskan sepenuhnya oleh perubahan kadar NRL pada penelitian ini.

Pada campuran dengan NRL 3%, stabilitas memang meningkat, tetapi flow juga meningkat cukup besar sehingga MQ menurun. Hal ini menunjukkan bahwa NRL 3% meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan beban, tetapi pada saat yang sama membuat campuran lebih lentur. Pada kadar NRL 5%, penurunan stabilitas dan tingginya flow menyebabkan MQ menjadi kurang optimal. Dengan demikian, analisis MQ menunjukkan bahwa kadar NRL harus dibatasi agar campuran tetap memiliki keseimbangan antara kekuatan dan kelenturan. Campuran AC-WC tidak boleh terlalu kaku karena berisiko retak, tetapi juga tidak boleh terlalu plastis karena berisiko deformasi permanen (ASTM International, 2022; Awan et al., 2022; Khan et al., 2025).



Gambar 4. 22 Diagram MQ

Berdasarkan Gambar 4.22, terlihat bahwa penambahan NRL menyebabkan nilai Marshall Quotient (MQ) mengalami penurunan yang cukup signifikan. Nilai MQ pada campuran RAP+NRL 0% sebesar 288,66 kg/mm, kemudian menurun menjadi 101,44 kg/mm pada NRL 3% dan sedikit meningkat menjadi 103,88 kg/mm pada NRL 5%, namun masih jauh lebih rendah dibandingkan campuran tanpa NRL. Penurunan nilai MQ menunjukkan bahwa kekakuan campuran berkurang seiring bertambahnya kadar NRL. Kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih fleksibel atau plastis akibat pengaruh NRL, sehingga kemampuan campuran dalam menahan deformasi terhadap perubahan flow menjadi lebih rendah.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian MQ. Nilai standar deviasi MQ untuk campuran RAP+NRL sebesar 31,56 kg/mm (0%), 7,79 kg/mm (3%), dan 20,22 kg/mm (5%). Semakin besar nilai standar deviasi maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 0% menunjukkan variasi data terbesar sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan campuran dengan penambahan NRL. Sementara itu, campuran NRL 3% memiliki variasi data paling kecil sehingga menunjukkan hasil pengujian yang lebih konsisten.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Marshall dengan NRL

nomor benda uji	kadar aspal	NRL	BJ maksimum	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji	
					udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan						
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	
1	4,6	0%	2,397	511,0	1176,20	672	1182,67	2,302	3,963	15,732	72,198	108	1034,44	0,036	28300,4	3,61	288,66	0,986	
2	4,6	3%	2,397	522,9	1179,23	660	1182,93	2,255	5,905	17,436	63,261	109	1043,96	0,103	9945,0	10,3	101,44	0,986	
3	4,6	5%	2,397	522,5	1173,93	658	1180,80	2,247	6,249	17,737	61,719	104	996,17	0,099	10184,5	9,87	103,88	0,986	
KETENTUAN BATAS											3-5	MIN.14	MIN. 65		MIN. 1000			2-4	MIN. 250

Sifat-sifat campuran	Standar uji	LTBA B _{RAP}		AC _{RAP}		
		Gradasi halus	Gradasi kasar	WC _{RAP}	BC _{RAP}	Base _{RAP}
Jumlah tumbukan per bidang	ASTM D6926-10	75		75		112 ⁽¹⁾
Rasio abu terhadap aspal	AASHTO M323	0,6--1,6		0,6--1,2		
Rongga dalam campuran (VIM), %	AASHTO M323	3,0--5,0 ⁽²⁾		3,0--5,0 ⁽²⁾		
Rongga dalam mineral agregat (VMA), %	AASHTO M323	Min. 15		Min. 14	Min. 13	Min. 12
Rongga terisi aspal (VFB), %	AASHTO M323	Min. 65				
Stabilitas marshall, kg		Min. 900		Min. 1000		Min. 2250 ⁽¹⁾
Pelelehan, mm	ASTM D6927-06 dan ASTM D5581-07a	2,0--4,5		2,0--4,0		3,0 ⁽¹⁾ --6,0 ⁽¹⁾
Stabilitas marshall sisa, %		Min. 90				
Stabilitas Dinamis, Lintasan / mm ⁽²⁾	JRA-1980	Min. 2000		Min. 2500		

Gambar 4. 23 Ketentuan Spesifikasi Khusus Interim Binamarga 2019

Berdasarkan Tabel 4.15, hasil pengujian Marshall KAO dengan variasi penambahan NRL sebesar 0%, 3%, dan 5% pada kadar aspal optimum 4,60%, diperoleh nilai rata-rata beberapa parameter Marshall, yaitu BJ Bulk campuran, VIM, VMA, VFB, stabilitas, flow, dan Marshall Quotient. Hasil tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh penambahan NRL terhadap karakteristik campuran beraspal.

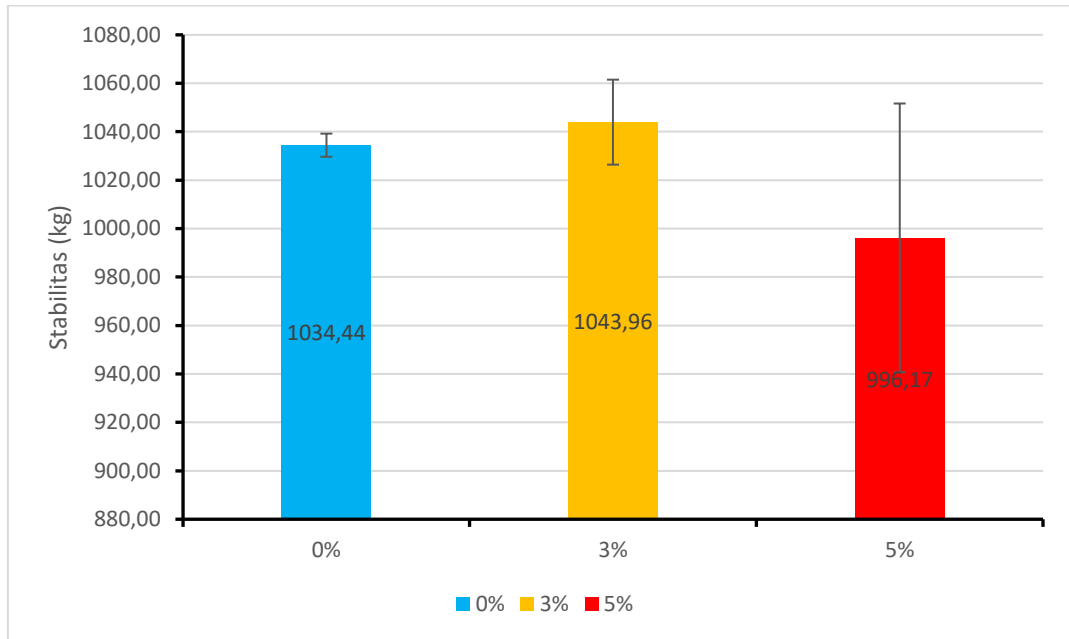
Pada campuran dengan NRL 0%, diperoleh nilai BJ Bulk sebesar 2,302, VIM 3,963%, VMA 15,732%, VFB 72,198%, stabilitas 1034,44 kg, flow 3,61 mm, dan Marshall Quotient 288,66 kg/mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa campuran tanpa penambahan NRL memiliki karakteristik yang cukup baik dan digunakan sebagai campuran pembanding terhadap variasi NRL 3% dan 5%.

Pada penambahan NRL 3%, nilai stabilitas meningkat menjadi 1043,96 kg dan menjadi nilai stabilitas tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Namun, nilai VIM dan flow juga mengalami peningkatan, sedangkan VFB dan Marshall Quotient mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL 3% dapat meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan beban, tetapi campuran menjadi lebih plastis dan memiliki rongga udara yang lebih besar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan elastisitas dan fleksibilitas campuran, sehingga deformasi yang terjadi saat menerima beban menjadi lebih besar.

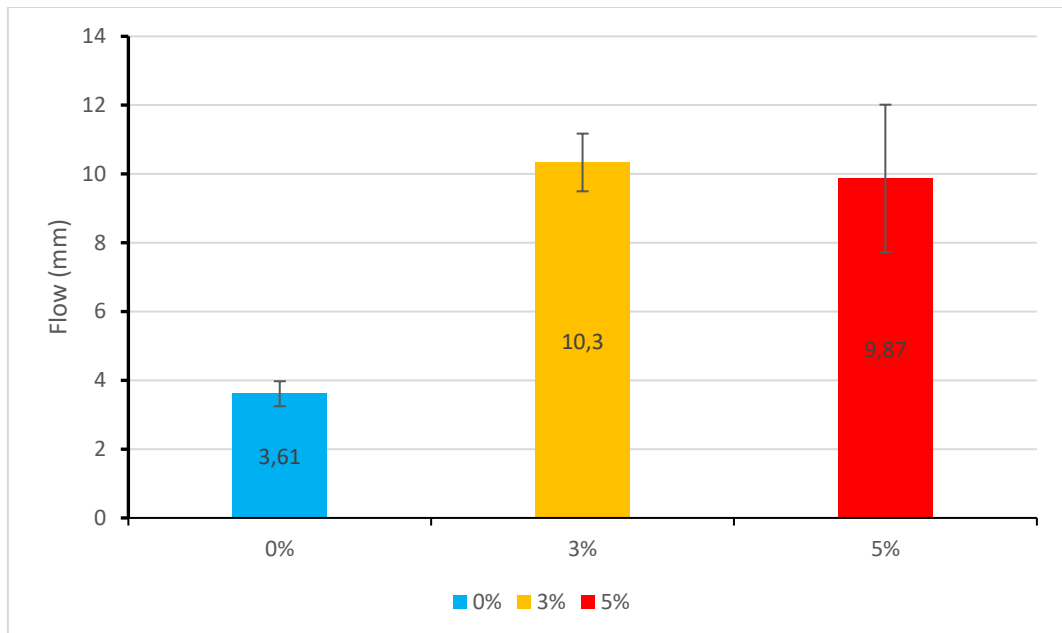
Pada penambahan NRL 5%, nilai BJ Bulk menurun menjadi 2,247, VIM meningkat menjadi 6,249%, dan VFB menurun menjadi 61,719%. Nilai stabilitas juga menurun menjadi 996,17 kg, sedangkan flow masih cukup tinggi sebesar 9,87 mm. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan NRL yang lebih besar cenderung meningkatkan rongga udara, menurunkan rongga yang terisi aspal, serta mengurangi kemampuan campuran dalam menahan beban.

Secara keseluruhan, penambahan NRL memberikan pengaruh terhadap karakteristik Marshall campuran. Semakin besar kadar NRL yang ditambahkan, nilai BJ Bulk dan VFB cenderung menurun, sedangkan nilai VIM, VMA, dan flow cenderung meningkat. Nilai stabilitas tertinggi diperoleh pada kadar NRL 3%, namun peningkatan nilai flow dan penurunan Marshall Quotient menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih

plastis dan kurang kaku. Untuk memperjelas kecenderungan perubahan setiap parameter Marshall, hasil tersebut disajikan dalam dua grafik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.24 dan Gambar 4.25



Gambar 4. 24 Grafik Stabilitas Marshall RAP NRL



Gambar 4. 25 Grafik *Flow* Marshall RAP NRL

Berdasarkan Gambar 4.24 dan Gambar 4. 25, hasil pengujian Marshall, terlihat bahwa penambahan NRL memberikan pengaruh yang cukup jelas terhadap karakteristik campuran AC-WC berbasis RAP. Pada parameter volumetrik, nilai VIM dan VMA cenderung meningkat, sedangkan BJ Bulk dan VFB mengalami penurunan. Peningkatan VIM menunjukkan bahwa rongga udara dalam campuran semakin besar, sehingga campuran berpotensi menjadi lebih mudah dimasuki air dan udara apabila melebihi batas spesifikasi. Kondisi tersebut dapat berdampak terhadap penurunan durabilitas campuran dalam jangka panjang. Sementara itu, penurunan VFB menunjukkan bahwa rongga dalam agregat yang terisi aspal menjadi lebih rendah, sehingga dapat memengaruhi kualitas ikatan antara aspal, RAP, agregat, dan NRL.

Pada parameter mekanis, nilai stabilitas meningkat pada kadar NRL 3%, tetapi menurun kembali pada kadar NRL 5%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL pada kadar tertentu mampu meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan beban, namun penambahan yang terlalu tinggi dapat menurunkan stabilitas campuran. Nilai flow yang meningkat cukup tinggi pada campuran dengan penambahan NRL menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih plastis atau lebih mudah mengalami deformasi. Akibatnya, nilai Marshall Quotient menurun, yang menunjukkan bahwa kekakuan campuran berkurang. Dampak dari kondisi ini adalah campuran dengan NRL 3% cenderung memberikan keseimbangan yang lebih baik antara stabilitas dan fleksibilitas, sedangkan campuran dengan NRL 5% cenderung terlalu plastis sehingga kurang optimal dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas.

Error bar pada grafik menunjukkan nilai standar deviasi hasil pengujian Marshall. Nilai deviasi stabilitas untuk campuran RAP+NRL sebesar 4,78 kg pada kadar 0%, 17,54 kg pada kadar 3%, dan 55,49 kg pada kadar 5%, sedangkan deviasi flow sebesar 0,36 mm pada kadar 0%, 0,84 mm pada kadar 3%, dan 2,15 mm pada kadar 5%. Semakin besar nilai deviasi, maka semakin besar penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 5% menunjukkan variasi data terbesar, sehingga menghasilkan error bar yang lebih panjang dibandingkan kadar lainnya. Dampaknya terhadap hasil analisis adalah data pada kadar NRL 5% memiliki tingkat konsistensi yang lebih rendah, sehingga hasilnya perlu ditafsirkan secara lebih hati-hati. Dengan demikian,

berdasarkan kecenderungan nilai stabilitas, flow, Marshall Quotient, dan sebaran data, kadar NRL 3% dapat dianalisis sebagai kadar yang lebih efektif dibandingkan 5% karena mampu meningkatkan stabilitas tanpa menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis dan tanpa menghasilkan variasi data yang terlalu besar.

4.8 Hasil Pengujian Cantabro

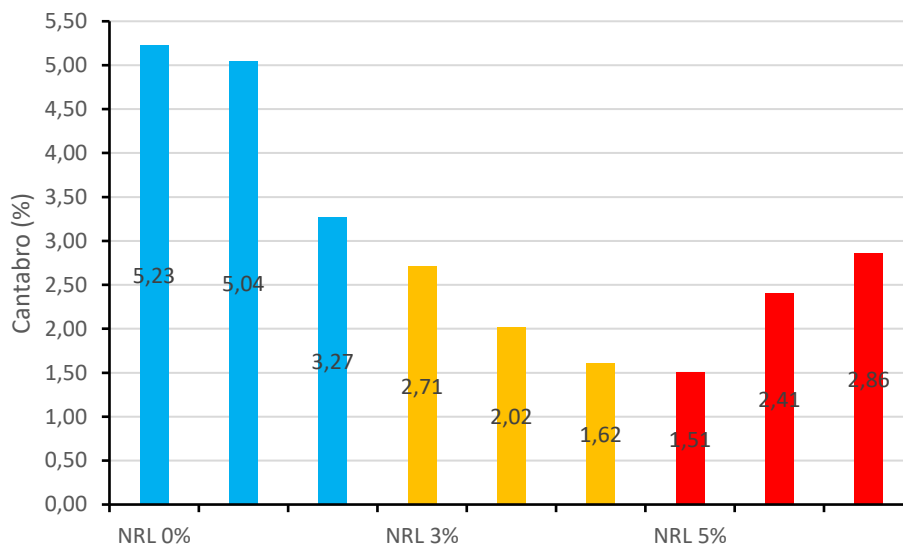
Pengujian Cantabro dilakukan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran akibat gesekan dan benturan. Pengujian ini dilakukan pada campuran dengan variasi NRL 0%, NRL 3%, dan NRL 5%. Nilai Cantabro diperoleh dari persentase kehilangan berat benda uji setelah dilakukan pengujian. Semakin kecil nilai Cantabro yang diperoleh, maka semakin baik ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran.

Hasil pengujian Cantabro pada masing-masing variasi campuran dapat dilihat pada

Tabel 4. 14 Tabel Hasil Pengujian Cantabro

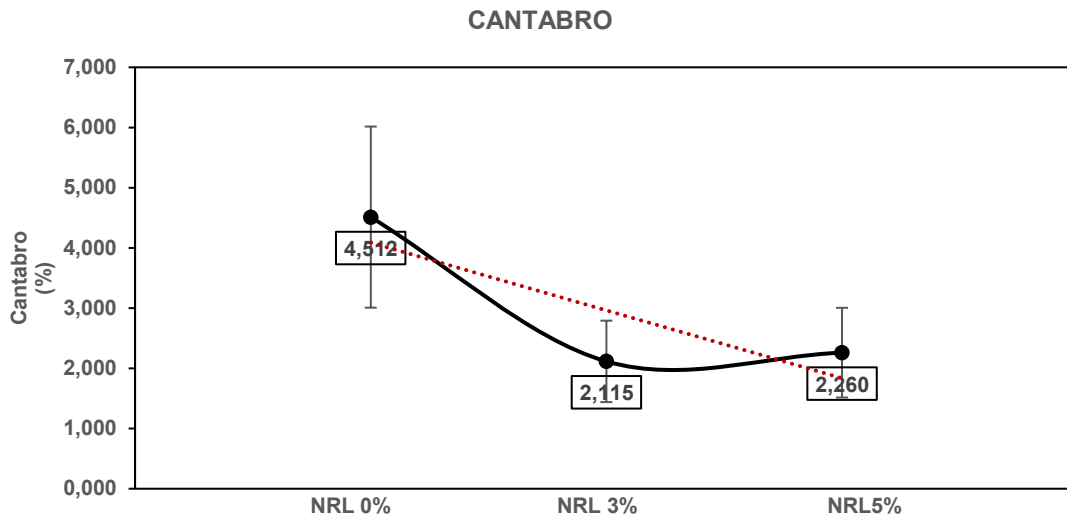
No	Variasi	Kode Sampel	W _{e0}	W _{e30}	W _{e60}	W _{e90}	W _{e120}	W _{e150}	W _{e180}	W _{e210}	W _{e240}	W _{e270}	W _{e300}	W _{Loss}	Cantabro
			(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(gr)	(%)
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
1	NRL 0%	N0 1	1173,00	1159,50	1147,80	1143,00	1135,50	1130,00	1124,40	1120,10	1116,60	1111,70	1111,70	61,30	5,23
		N0 2	1138,20	1127,70	1124,70	1114,00	1110,80	1102,10	1097,80	1090,70	1084,10	1080,80	1080,80	57,40	5,04
		N0 3	1132,70	1126,90	1122,80	1117,80	1110,00	1107,40	1106,20	1105,00	1102,80	1098,10	1095,70	37,00	3,27
Rata-rata														4,51	
2	NRL 3%	N3	1151,30	1144,80	1141,60	1136,90	1134,10	1130,30	1129,10	1127,30	1125,40	1122,00	1120,10	31,20	2,71
		N3	1148,00	1140,20	1137,30	1135,00	1134,50	1131,10	1129,80	1126,30	1125,80	1125,00	1124,80	23,20	2,02
		N3	1139,20	1138,00	1137,40	1136,30	1134,20	1132,10	1130,00	1128,40	1125,40	1122,10	1120,80	18,40	1,62
Rata-rata														2,12	
3	NRL 5%	N5	1136,10	1134,10	1130,90	1128,50	1127,20	1125,60	1124,20	1122,00	1120,90	1120,00	1119,00	17,10	1,51
		N5	1140,00	1137,20	1135,20	1132,80	1130,30	1127,20	1124,10	1120,30	1118,80	1114,20	1112,50	27,50	2,41
		N5	1138,60	1135,40	1131,10	1128,70	1127,60	1122,30	1120,20	1117,30	1114,20	1110,10	1106,00	32,60	2,86
Rata-rata														2,26	

Berdasarkan Tabel 4.14, dapat dilihat bahwa setiap variasi campuran mengalami penurunan berat benda uji selama proses pengujian Cantabro. Penurunan berat tersebut terjadi akibat adanya pelepasan butiran agregat selama benda uji diputar dalam mesin Los Angeles. Besarnya kehilangan berat pada masing-masing variasi kemudian digunakan untuk menentukan nilai Cantabro.

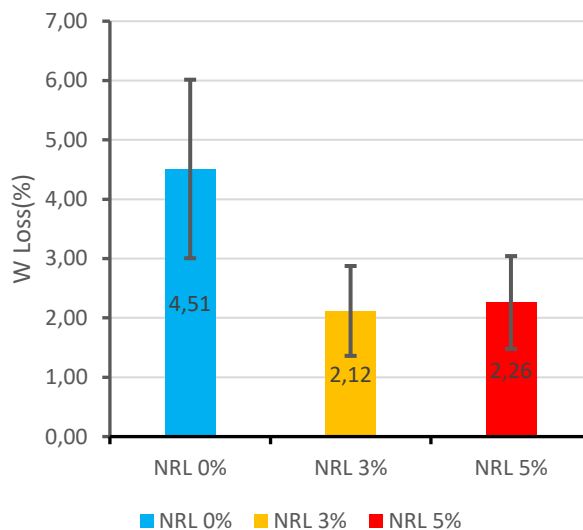


Gambar 4. 26 Diagram Cantabro 3 sampel per kadar NRL

Pengujian Cantabro dilakukan menggunakan tiga benda uji untuk setiap variasi kadar NRL, yaitu NRL 0%, NRL 3%, dan NRL 5%. Nilai kehilangan berat (Cantabro Loss) masing-masing benda uji kemudian dihitung dan dirata-ratakan untuk memperoleh nilai Cantabro pada setiap variasi campuran. Penggunaan tiga sampel pada setiap kadar NRL bertujuan untuk meningkatkan keandalan hasil pengujian serta memungkinkan analisis variasi data melalui perhitungan standar deviasi dan error bar.



Gambar 4. 27 Hasil Cantabro



Gambar 4. 28 Diagram Cantabro

Berdasarkan Gambar 4.28, terlihat bahwa benda uji pada campuran NRL 0%, NRL 3%, dan NRL 5% mengalami penurunan berat secara bertahap pada setiap interval pengujian. Ketiga benda uji menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu berat benda uji semakin menurun seiring bertambahnya waktu pengujian. Nilai kehilangan berat pada campuran NRL 0% menunjukkan bahwa campuran tanpa penambahan NRL lebih mudah mengalami pelepasan butiran. Hal ini dapat dilihat dari nilai rata-rata Cantabro sebesar 4,51%, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan variasi campuran lainnya. Error bar

menunjukkan nilai standar deviasi dari hasil pengujian pada setiap variasi kadar NRL. Nilai standar deviasi untuk campuran dengan kadar NRL 0%, 3%, dan 5% masing-masing sebesar 1,50%, 0,68%, dan 0,74%.

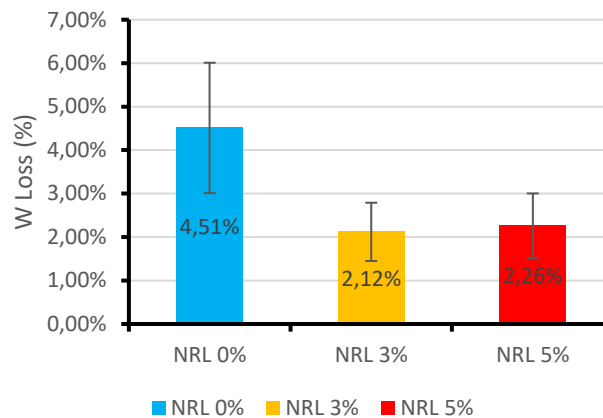
Berdasarkan (British Standards Institution, 2017), nilai kehilangan berat pada pengujian Cantabro harus berada di bawah 40%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran RAP+NRL memiliki nilai Cantabro sebesar 4,51%, 2,12%, dan 2,26%, sehingga seluruh campuran memenuhi persyaratan tersebut. Nilai yang jauh di bawah batas maksimum menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap pelepasan butiran agregat (ravelling) dan cukup tahan terhadap pengaruh abrasi selama masa pelayanan perkerasan.

Semakin besar nilai standar deviasi, semakin besar pula penyebaran data hasil pengujian antar benda uji. Campuran dengan kadar NRL 0% memiliki variasi data terbesar yang ditunjukkan oleh error bar paling panjang, sedangkan campuran dengan kadar NRL 3% memiliki variasi terkecil sehingga menghasilkan error bar yang lebih pendek. Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengujian Cantabro pada campuran dengan penambahan 3% NRL cenderung lebih konsisten dibandingkan variasi kadar NRL lainnya.

Campuran dengan penambahan NRL 3% juga mengalami penurunan berat pada setiap interval pengujian, namun penurunannya lebih kecil dibandingkan campuran NRL 0%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL 3% mampu meningkatkan daya ikat antara aspal dan agregat, sehingga pelepasan butiran menjadi lebih rendah. Nilai rata-rata Cantabro pada variasi ini sebesar **2,12%**, yang menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gesekan dan benturan.

Campuran dengan penambahan NRL 5% menunjukkan penurunan berat benda uji selama proses pengujian. Nilai kehilangan berat pada variasi ini masih lebih kecil dibandingkan campuran NRL 0%, namun sedikit lebih besar dibandingkan campuran NRL 3%. Nilai rata-rata Cantabro pada campuran NRL 5% sebesar **2,26%**. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan NRL 5% tetap dapat meningkatkan ketahanan

campuran terhadap pelepasan butiran, meskipun hasilnya tidak lebih baik dibandingkan variasi NRL 3%.



Gambar 4. 29 Hasil Rata-rata Cantabro

Berdasarkan Gambar 4.20, nilai Cantabro rata-rata pada campuran NRL 0% sebesar 4,51%, NRL 3% sebesar 2,12%, dan NRL 5% sebesar 2,26%. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai Cantabro mengalami penurunan setelah adanya penambahan NRL. Penurunan nilai Cantabro menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih tahan terhadap pelepasan butiran. Nilai deviasi sebesar 1,50% pada NRL 0%, 0,67% pada NRL 3%, dan 0,74% pada NRL 5% menunjukkan bahwa variasi hasil pengujian paling kecil terjadi pada campuran NRL 3%, sehingga hasilnya lebih seragam dibanding variasi lainnya.

Oleh karena itu, NRL 3% menjadi variasi paling efektif karena menghasilkan keseimbangan terbaik antara ikatan binder-agregat, kepadatan, dan ketahanan terhadap abrasi. Hal ini sejalan dengan konsep Cantabro Loss sebagai indikator durabilitas dan ketahanan campuran terhadap ravelling, di mana nilai kehilangan massa yang lebih rendah menunjukkan campuran lebih tahan terhadap pelepasan agregat (Abouelsaad & White, 2022a; Carruth et al., 2023; Meena et al., 2024) Sementara itu, pada penambahan NRL 5%, nilai Cantabro mengalami sedikit peningkatan dibandingkan NRL 3%, sehingga dapat dikatakan bahwa penambahan NRL yang lebih besar tidak selalu menghasilkan nilai kehilangan berat yang lebih kecil.

4.9 Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengetahui perbandingan biaya campuran antara aspal konvensional dan campuran RAP 30% dengan variasi penambahan NRL. Variasi campuran yang dianalisis terdiri dari campuran konvensional, RAP 30% dengan NRL 0%, RAP 30% dengan NRL 3%, dan RAP 30% dengan NRL 5%. Perhitungan biaya dilakukan berdasarkan kebutuhan material, berat material, harga satuan, dan total harga dari masing-masing campuran.

4.9.1 Analisis Biaya Campuran Aspal Konvensional

Pada campuran aspal konvensional, material yang digunakan terdiri dari agregat 3/4", agregat 1/2", pasir, abu batu, dan aspal. Masing-masing material dihitung berdasarkan persentase kebutuhan campuran, berat material, harga satuan dasar, dan total harga. Hasil perhitungan biaya campuran aspal konvensional disajikan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 15 Analisis Harga Aspal Konvensional

ASPAL KONVENSIONAL				
Material	%	Berat	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20%	275,04	Rp320	Rp88,01
Agregat 1/2"	40%	424,02	Rp365	Rp154,77
Pasir	10%	332,34	Rp276	Rp91,73
Abu Batu	30%	114,60	Rp172	Rp19,71
Aspal	5,9	54,00	Rp12.100	Rp653,40
TOTAL BIAYA		1200		Rp1.007,62

Berdasarkan Tabel 4.17, diperoleh total biaya campuran aspal konvensional sebesar **Rp1.007,62** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran aspal konvensional diperoleh sebesar **Rp839.681**. Nilai ini menjadi pembandingan terhadap campuran RAP 30% dengan penambahan NRL.

4.9.2 Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 0%

Pada campuran RAP 30% dengan NRL 0%, material yang digunakan terdiri dari agregat, pasir, abu batu, RAP, dan aspal tanpa penambahan NRL. Penggunaan RAP pada campuran ini bertujuan untuk menggantikan sebagian material baru, sehingga dapat memengaruhi total biaya campuran. Hasil perhitungan biaya campuran RAP 30% dengan NRL 0% disajikan pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 16 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 0%

NRL 0%				
Material	% Material	Massa (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	55,2	Rp12.100	Rp668
TOTAL BIAYA		1200		Rp884,69

Berdasarkan Tabel 4.18, diperoleh total biaya campuran RAP 30% dengan NRL 0% sebesar **Rp884,69** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran menjadi **Rp737.240**. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan campuran aspal konvensional, karena adanya penggunaan material RAP dalam campuran.

4.9.3 Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 3%

Pada campuran RAP 30% dengan NRL 3%, material yang digunakan hampir sama dengan campuran NRL 0%, tetapi ditambahkan bahan NRL sebesar 3%. Penambahan NRL menyebabkan adanya tambahan biaya material, sehingga total biaya campuran mengalami perubahan. Hasil perhitungan biaya campuran RAP 30% dengan NRL 3% disajikan pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 17 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 3%

NRL 3%				
Material	% material	massa (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	53,544	Rp12.100	Rp647,88
NRL	3	1,656	Rp23.900	Rp39,58
TOTAL BIAYA		1200		Rp904,23

Berdasarkan Tabel 4.19, diperoleh total biaya campuran RAP 30% dengan NRL 3% sebesar **Rp904,23** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran menjadi **Rp753.524**. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan campuran RAP 30% dengan NRL 0% karena terdapat tambahan bahan NRL dalam campuran.

4.9.4 Analisis Biaya Campuran RAP 30% dengan NRL 5%

Pada campuran RAP 30% dengan NRL 5%, kadar NRL yang digunakan lebih besar dibandingkan variasi sebelumnya. Penambahan kadar NRL yang lebih tinggi menyebabkan kebutuhan bahan NRL meningkat, sehingga total biaya campuran juga mengalami peningkatan. Hasil perhitungan biaya campuran RAP 30% dengan NRL 5% disajikan pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 18 Analisis Harga Aspal RAP 30% + NRL 5%

NRL 5%				
Material	% material	massa (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	52,44	Rp12.100	Rp634,52
NRL	5	2,76	Rp23.900	Rp65,96
TOTAL BIAYA		1200		Rp917,26

Berdasarkan Tabel 4.20, diperoleh total biaya campuran RAP 30% dengan NRL 5% sebesar **Rp917,26** untuk berat campuran 1.200 gram. Setelah dilakukan konversi, biaya campuran menjadi **Rp764.380**. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan campuran RAP 30% dengan NRL 0% dan NRL 3%, karena jumlah NRL yang digunakan lebih besar.

4.9.5 Analisis Biaya Campuran

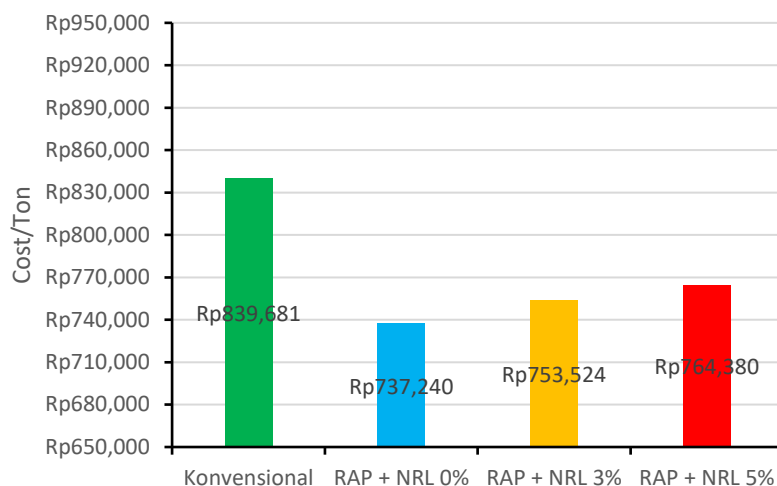
Setelah dilakukan perhitungan biaya pada masing-masing variasi campuran, maka diperoleh biaya campuran yang terdiri dari campuran konvensional, RAP 30% dengan NRL 0%, RAP 30% dengan NRL 3%, dan RAP 30% dengan NRL 5%. biaya campuran disajikan pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 19 Rekap Analisis Harga

Jenis Aspal	Berat (gr)	Harga (Rp /gr)	Konversi Ton	Harga (Rp/Ton)
Konvensional	1200	Rp1.007,62	0,833333	Rp839,681
RAP30% + NRL 0%	1200	Rp884,69	0,833333	Rp737,240
RAP30% + NRL 3%	1200	Rp904,23	0,833333	Rp753,524
RAP30% + NRL 5%	1200	Rp917,26	0,833333	Rp764,380

Berdasarkan Tabel 4.21, biaya campuran aspal konvensional sebesar **Rp839.681**, RAP 30% dengan NRL 0% sebesar **Rp737.240**, RAP 30% dengan NRL 3% sebesar **Rp753.524**, dan RAP 30% dengan NRL 5% sebesar **Rp764.380**. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa campuran RAP 30% memiliki biaya yang lebih rendah dibandingkan campuran aspal konvensional. Namun, penambahan NRL menyebabkan biaya campuran RAP 30% mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar NRL.

Dari rekap analisis harga didapatkan yaitu grafik analisis biaya digunakan untuk memperjelas perbandingan biaya dari setiap variasi campuran. Grafik ini menunjukkan perbedaan biaya antara campuran konvensional, RAP 30% dengan NRL 0%, RAP 30% dengan NRL 3%, dan RAP 30% dengan NRL 5%. Grafik analisis biaya disajikan pada Gambar 4.14.



Gambar 4. 30 Grafik Analisis Biaya

Berdasarkan Gambar 4. 30, terlihat bahwa biaya tertinggi terdapat pada campuran aspal konvensional, sedangkan biaya terendah terdapat pada campuran RAP 30% dengan NRL 0%. Campuran RAP 30% dengan penambahan NRL 3% dan 5% mengalami peningkatan biaya dibandingkan campuran RAP 30% tanpa NRL. Hal ini terjadi karena adanya tambahan biaya bahan NRL pada campuran. Grafik analisis biaya disajikan tanpa error bar karena nilai biaya diperoleh dari hasil perhitungan komposisi material dan bukan berasal dari pengujian berulang, sehingga tidak dilakukan analisis standar deviasi maupun standard error.

Meskipun demikian, campuran RAP 30% dengan NRL 3% masih lebih murah dibandingkan campuran konvensional dan memberikan kinerja teknis yang lebih baik terhadap ketahanan Cantabro. Oleh karena itu, dari sudut pandang teknik sipil, variasi NRL 3% dapat dinilai lebih efektif karena tidak hanya meningkatkan ketahanan terhadap pelepasan butiran, tetapi juga tetap memberikan efisiensi biaya dibandingkan campuran tanpa RAP. Hal ini mendukung manfaat penelitian, yaitu mengoptimalkan pemanfaatan RAP, mengurangi potensi kerusakan ravelling, serta mendukung penggunaan material lokal berupa karet alam dalam konstruksi jalan (Kementerian Pekerjaan Umum, 2025; Suwanto et al., 2023; Widayanti et al., 2020).

4.10 Analisis Hasil Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter stabilitas dipengaruhi oleh penambahan *Natural Rubber Latex* (NRL) pada campuran AC-WC yang mengandung 30% *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Campuran dengan kadar NRL sebesar 0% dan 3% masih memenuhi persyaratan minimum stabilitas berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yaitu sebesar 1.000 kg. Sebaliknya, campuran dengan kadar NRL 5% menghasilkan nilai stabilitas di bawah batas yang dipersyaratkan sehingga tidak memenuhi spesifikasi. Hal ini mengindikasikan bahwa penambahan NRL dalam kadar yang lebih tinggi dapat menurunkan kemampuan campuran dalam menahan beban.

Pada parameter *Flow*, hanya campuran dengan kadar NRL 0% yang memenuhi rentang nilai yang dipersyaratkan, yaitu 2–4 mm. Sementara itu, campuran dengan kadar NRL 3% dan 5% menghasilkan nilai *Flow* yang melebihi batas spesifikasi yaitu 10,3 mm dan 9,87 mm. Peningkatan nilai *Flow* tersebut menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan sifat elastisitas dan fleksibilitas binder sehingga campuran mengalami deformasi yang lebih besar ketika menerima pembebanan. Kondisi ini mencerminkan bahwa peningkatan kelenturan campuran tidak selalu diikuti oleh peningkatan kinerja mekanis sesuai dengan persyaratan teknis.

Nilai *Marshall Quotient* (MQ) juga menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan meningkatnya kadar NRL. Hanya campuran tanpa penambahan NRL yang memenuhi persyaratan minimum MQ, sedangkan campuran dengan kadar NRL 3% dan 5% tidak memenuhi spesifikasi. Penurunan nilai MQ dipengaruhi oleh meningkatnya nilai *Flow* serta menurunnya kekakuan campuran, sehingga kemampuan campuran dalam mempertahankan stabilitas terhadap deformasi menjadi berkurang.

Secara keseluruhan, penggunaan RAP sebesar 30% yang dikombinasikan dengan penambahan NRL memberikan pengaruh terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC. Variasi tanpa penambahan NRL 0% menunjukkan kinerja terbaik karena seluruh parameter Marshall memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Sebaliknya, penambahan NRL sebesar 3% dan 5% mampu meningkatkan fleksibilitas campuran, namun mengakibatkan beberapa parameter, terutama *Void Filled with Bitumen* (VFB), *Flow*, dan *Marshall Quotient* (MQ), tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Oleh

karena itu, diperlukan upaya optimasi terhadap kadar NRL maupun proses pencampuran agar diperoleh campuran yang memiliki keseimbangan antara fleksibilitas dan kekuatan.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimasi terhadap komposisi job mix, khususnya pada proporsi agregat halus dan kadar NRL, agar diperoleh keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas campuran. Dominasi fraksi agregat halus pada campuran diduga turut memengaruhi karakteristik Marshall, terutama terhadap nilai *Flow*, *Void Filled with Bitumen* (VFB), dan *Marshall Quotient* (MQ), sehingga beberapa parameter belum memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Selain itu, penelitian selanjutnya juga disarankan untuk melakukan pengujian Cantabro Loss guna mengevaluasi ketahanan campuran terhadap pelepasan butiran (*raveling*) akibat penambahan NRL. Pengujian tersebut diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja campuran beraspal modifikasi RAP dan NRL, terutama dari aspek durabilitas dan ketahanan terhadap kerusakan di lapangan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh penambahan Natural Rubber Latex (NRL) pada campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) dengan pemanfaatan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) terhadap karakteristik Marshall dan ketahanan Cantabro, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi kadar Natural Rubber Latex (NRL) memberikan pengaruh terhadap karakteristik Marshall campuran AC-WC berbasis RAP 30%. Berdasarkan hasil perencanaan campuran, diperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) sebesar 4,6% yang ditentukan dari pemenuhan parameter Marshall, yaitu stabilitas, flow, Marshall Quotient, VIM, VMA, dan VFB. Campuran AC-WC berbasis RAP 30% tanpa penambahan NRL digunakan sebagai campuran kontrol/pembanding, dengan nilai stabilitas sebesar 1.034,44 kg, flow 3,61 mm, dan Marshall Quotient 288,66 kg/mm. Setelah ditambahkan NRL, campuran mengalami perubahan karakteristik. Pada kadar 3% NRL, stabilitas meningkat menjadi 1.043,96 kg, yang merupakan nilai stabilitas tertinggi. Namun, nilai flow juga meningkat menjadi 10,3 mm, sehingga campuran menjadi lebih plastis. Sementara itu, pada kadar 5% NRL, stabilitas menurun menjadi 996,17 kg dan nilai VIM meningkat, yang menunjukkan bahwa penambahan NRL berlebih dapat menurunkan kepadatan efektif dan kemampuan campuran dalam menahan beban.
2. Perbandingan antara campuran AC-WC berbasis RAP dengan dan tanpa penambahan NRL menunjukkan bahwa NRL dapat memperbaiki kinerja campuran, tetapi penggunaannya harus dikontrol. Campuran RAP tanpa NRL masih mampu menunjukkan karakteristik Marshall yang cukup baik, sehingga dapat digunakan sebagai dasar pembanding untuk menilai pengaruh penambahan NRL. Penambahan 3% NRL memberikan peningkatan terhadap stabilitas dan memperbaiki daya ikat campuran, sedangkan penambahan 5% NRL cenderung menurunkan stabilitas dan meningkatkan rongga udara. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar NRL tidak selalu

berbanding lurus dengan peningkatan kinerja campuran. Secara teknis, kadar NRL yang terlalu tinggi dapat menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis, kurang padat, dan kurang optimal dalam menahan deformasi akibat beban lalu lintas.

3. Hasil uji Cantabro menunjukkan bahwa penambahan NRL meningkatkan ketahanan campuran terhadap raveling atau pelepasan butiran agregat. Nilai Cantabro Loss pada campuran tanpa NRL sebesar 4,51%, kemudian menurun menjadi 2,12% pada campuran dengan 3% NRL, dan sedikit meningkat menjadi 2,26% pada campuran dengan 5% NRL. Penurunan nilai Cantabro Loss menunjukkan bahwa NRL mampu meningkatkan kohesi campuran serta adhesi antara aspal, agregat, dan material RAP. Berdasarkan hasil tersebut, kadar 3% NRL menjadi kadar yang paling efektif karena menghasilkan nilai Cantabro Loss terendah sekaligus stabilitas Marshall tertinggi. Dengan demikian, 3% NRL memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan struktural, kelenturan, dan ketahanan terhadap pelepasan agregat.
4. Dari analisis biaya campuran AC-WC berbasis RAP 30% dengan penambahan NRL masih lebih ekonomis dibandingkan campuran konvensional. Biaya campuran aspal konvensional sebesar Rp839.681/ton, sedangkan campuran RAP 30% dengan NRL 0% sebesar Rp737.240/ton, NRL 3% sebesar Rp753.524/ton, dan NRL 5% sebesar Rp764.380/ton. Meskipun penambahan NRL menyebabkan peningkatan biaya seiring bertambahnya kadar NRL, campuran RAP 30% dengan 3% NRL tetap lebih murah dibandingkan campuran konvensional dan memberikan peningkatan kinerja, terutama terhadap stabilitas dan ketahanan raveling. Oleh karena itu, penggunaan RAP 30% dengan 3% NRL dapat dipertimbangkan sebagai alternatif campuran AC-WC yang lebih ekonomis, berkelanjutan, dan mendukung pemanfaatan material daur ulang serta material lokal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil penelitian, penambahan NRL sebesar 3% dan 5% menghasilkan nilai *flow* yang belum memenuhi spesifikasi Marshall. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan melakukan evaluasi terhadap faktor lain yang memengaruhi karakteristik campuran, seperti kadar aspal optimum, gradasi agregat, persentase RAP, serta interaksi antara aspal lama pada RAP dengan NRL. Selain itu, perlu dilakukan variasi kadar NRL yang lebih rinci untuk memperoleh kadar optimum yang mampu meningkatkan kinerja campuran tanpa menyebabkan kenaikan nilai *flow*. Perbedaan hasil dengan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa respons campuran terhadap NRL dipengaruhi oleh kondisi material dan komposisi campuran yang digunakan.
2. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi kadar NRL yang lebih rapat, misalnya 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5%, agar kadar optimum NRL dapat ditentukan secara lebih presisi. Variasi yang lebih detail diperlukan karena hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar 3% memberikan kinerja terbaik terhadap Cantabro, sedangkan kadar 5% mulai menunjukkan kecenderungan penurunan stabilitas dan peningkatan plastisitas campuran.
3. Perlu dilakukan evaluasi lebih mendalam terhadap metode pencampuran NRL dengan aspal, terutama suhu pencampuran, durasi pengadukan, kecepatan mixer, dan tingkat homogenitas binder. Hal ini penting karena distribusi NRL yang tidak merata dapat memengaruhi karakteristik campuran, seperti meningkatnya VIM, tingginya *flow*, menurunnya Marshall Quotient, dan berkurangnya kepadatan campuran.
4. Penelitian selanjutnya sebaiknya menambahkan campuran pembanding berupa AC-WC konvensional tanpa RAP dan tanpa NRL pada pengujian Marshall dan Cantabro. Dengan adanya pembanding tersebut, dapat diketahui secara lebih jelas apakah penambahan NRL benar-benar mampu mengembalikan atau mendekati kinerja campuran non-RAP, baik dari aspek stabilitas, fleksibilitas, durabilitas, maupun ketahanan terhadap pelepasan agregat.

5. Pengujian kinerja campuran sebaiknya tidak hanya dibatasi pada Marshall dan Cantabro Loss. Penelitian lanjutan perlu menambahkan pengujian lain seperti Indirect Tensile Strength, Tensile Strength Ratio, Wheel Tracking Test, uji modulus resilien, uji fatigue, dan uji durabilitas perendaman. Pengujian tersebut diperlukan agar kinerja campuran AC-WC berbasis RAP dan NRL dapat dianalisis secara lebih komprehensif terhadap retak, deformasi permanen, kerusakan akibat air, dan beban lalu lintas berulang.
6. Material RAP yang digunakan sebaiknya berasal dari beberapa lokasi atau sumber perkerasan yang berbeda. Hal ini diperlukan karena karakteristik RAP sangat dipengaruhi oleh umur perkerasan lama, kadar aspal eksisting, tingkat penuaan binder, gradasi agregat hasil milling, dan kondisi lingkungan selama masa layanan. Dengan variasi sumber RAP, hasil penelitian akan lebih representatif terhadap kondisi lapangan.
7. Penelitian selanjutnya perlu melakukan karakterisasi binder hasil campuran aspal baru, aspal RAP, dan NRL melalui pengujian reologi atau sifat fisik binder, seperti penetrasi, titik lembek, daktilitas, viskositas, dan elastic recovery. Pengujian ini penting untuk mengetahui sejauh mana NRL mampu memperbaiki sifat binder yang telah mengalami penuaan akibat pemanfaatan RAP.
8. Perlu dilakukan kajian terhadap pengaruh kadar RAP yang berbeda, misalnya 20%, 30%, 40%, dan 50%, dengan kadar NRL optimum. Hal ini bertujuan untuk mengetahui batas pemanfaatan RAP yang masih aman secara teknis pada campuran AC-WC, terutama terhadap parameter volumetrik, stabilitas struktural, deformasi, dan ketahanan raveling.
9. Analisis biaya pada penelitian selanjutnya sebaiknya dikembangkan menjadi analisis biaya skala lapangan, termasuk biaya produksi di Asphalt Mixing Plant, biaya pengangkutan RAP, biaya pengolahan material RAP, kebutuhan energi pencampuran, biaya pemadatan, dan biaya pelaksanaan pekerjaan di lapangan. Dengan demikian, efisiensi biaya campuran RAP dan NRL dapat dinilai secara lebih realistis.
10. Sebelum diterapkan pada pekerjaan jalan sebenarnya, campuran AC-WC berbasis RAP 30% dengan NRL 3% perlu diuji dalam skala trial mix di AMP dan trial

section di lapangan. Pengujian lapangan diperlukan untuk mengetahui kinerja campuran terhadap kondisi aktual, seperti variasi suhu, beban lalu lintas, air hujan, proses pemadatan, dan perubahan karakteristik selama masa layanan.

11. Penggunaan NRL sebagai bahan tambah perlu dikaji lebih lanjut dari aspek keberlanjutan material lokal. Hal ini penting karena NRL memiliki potensi mendukung pemanfaatan karet alam dalam konstruksi jalan, mengurangi ketergantungan terhadap polimer sintetis, serta meningkatkan nilai tambah material lokal pada bidang teknik sipil, khususnya teknologi perkerasan lentur.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2019). Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials. In *AASHTO T 49-15 (2019)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2022a). Standard Method of Test for Cantabro Abrasion Loss of Asphalt Mixture Specimens. In *AASHTO T 401-22*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2022b). Standard Method of Test for Ductility of Asphalt Materials. In *AASHTO T 51-22*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2022c). Standard Method of Test for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Materials. In *AASHTO T 228-22*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2024). Standard Method of Test for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. In *AASHTO T 27-24*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2025a). Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. In *AASHTO T 85-25*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2025b). Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. In *AASHTO T 84-25*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2022a). Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus. In *AASHTO T 245-22*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2022b). Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). In *AASHTO T 53-22*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2024). Standard Method of Test for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Hot Mix Asphalt (HMA). In *AASHTO T 164-24*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdel-Jaber, M., Al-Shamayleh, R. A., Ibrahim, R., Alkhrrissat, T., & Alqatamin, A. (2022). Mechanical properties evaluation of asphalt mixtures with variable contents of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Results in Engineering*, 14, 100463. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100463>

- Abouelsaad, A., & White, G. (2022a). Review of Asphalt Mixture Ravelling Mechanisms, Causes and Testing. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15(6), 1448 – 1462. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00100-7>
- Abouelsaad, A., & White, G. (2022b). Review of Asphalt Mixture Ravelling Mechanisms, Causes and Testing. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 15, 1448–1462. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00100-7>
- Al-Saffar, Z. H., Yaacob, H., Mohd Satar, M. K. I., Shah Rull, N. S., Jaya, R. P., Mohamed, A., Hassan, N. A., & Warid, M. N. M. (2021). The Influence of PelletRAP Rejuvenator on the Mechanical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 682(1), 12071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/682/1/012071>
- Andrade, K. L., Ramlow, H., Floriano, J. F., Acosta, E. D., Faita, F. L., & Machado, R. A. F. (2022). Latex and natural rubber: recent advances for biomedical applications. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 32(2).
- Asi, I., Alhadidi, Y. I., & Alhadidi, T. I. (2024). Predicting Marshall stability and flow parameters in asphalt pavements using explainable machine-learning models. *Transportation Engineering*, 18(100282.).
- ASTM. (2020a). Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus. In *ASTM D6926-20*. ASTM International. <https://www.astm.org/d6926-20.html>
- ASTM. (2020b). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. In *ASTM D5/D5M-20*. ASTM International. https://www.astm.org/d0005_d0005m-20.html
- ASTM. (2020c). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). In *ASTM D36/D36M-14(2020)*. ASTM International. <https://store.astm.org/standards/d36>
- ASTM. (2021). Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method). In *ASTM D70/D70M-21*. ASTM International. https://www.astm.org/d0070_d0070m-21.html
- ASTM. (2022). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. In *ASTM D6927-22*. ASTM International. <https://store.astm.org/standards/d6927>
- ASTM. (2023). Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials. In *ASTM D113/D113M-17(2023)e1*. ASTM International. <https://store.astm.org/standards/d113>

- ASTM. (2024). Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. In *ASTM D2172/D2172M-24*. ASTM International. <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd2172d2172m24>
- ASTM. (2025a). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. In *ASTM C127-25*. ASTM International. <https://store.astm.org/c0127-25.html>
- ASTM. (2025b). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. In *ASTM C136/C136M-25*. ASTM International. https://www.astm.org/c0136_c0136m-25.html
- ASTM International. (2021). Standard Practice for Open-Graded Friction Course (OGFC) Asphalt Mixture Design. In *ASTM D7064/D7064M-21*. ASTM International. https://www.astm.org/d7064_d7064m-21.html
- ASTM International. (2022). *ASTM D6927-22: Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures*.
- ASTM International. (2024). *ASTM E11-24: Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves*. ASTM International. <https://store.astm.org/standards/e11>
- ASTM International. (2025). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. In *ASTM C128-25*. ASTM International. <https://store.astm.org/c0128-25.html>
- Awan, H. H., Hussain, A., Javed, M. F., Qiu, Y. , A., R., M., A. M., F. D., & Alzahrani, A. M. (2022). Predicting Marshall flow and Marshall stability of asphalt pavements using multi expression programming. *Buildings*, 12(3).
- Badan Standardisasi Nasional. (1990). Metode pengujian tentang analisis saringan agregat halus dan kasar. In *SNI 03-1968-1990*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (1991). Metode pengujian campuran aspal dengan alat Marshall. In *SNI 06-2489-1991*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008a). Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus. In *SNI 1970:2008*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008b). Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar. In *SNI 1969:2008*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011a). Cara uji berat jenis aspal keras. In *SNI 2441:2011*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011b). Cara uji daktilitas aspal. In *SNI 2432:2011*. Badan Standardisasi Nasional.

- Badan Standardisasi Nasional. (2011c). Cara uji penetrasi aspal. In *SNI 2456:2011*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standarnisasi Nasional. (2002). *SNI 06-6721-2002 Metode pengujian kekentalan aspal cair dan aspal emulsi dengan alat saybolt*.
- Badan Standarnisasi Nasional. (2011a). *SNI 2432:2011 Cara uji daktilitas aspal*.
- Badan Standarnisasi Nasional. (2011b). *SNI 2434:2011 Cara uji titik lembek aspal dengan alat cincin dan bola (ring and ball)*.
- Badan Standarnisasi Nasional. (2011c). *SNI 2456:2011 Cara uji penetrasi aspal*.
- Bi, Y., Chen, H., Chen, Z., Pei, J., Zhang, J., Luo, Z., Wang, W., & Gao, J. (2025). A comprehensive review of rheological behaviors of asphalt binders, mastics, and mixtures from a generalized rheology perspective. *Fuel*, 393, 134984. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134984>
- Britannica Editors. (2026). *Asphalt*. Encyclopaedia Britannica.
- British Standards Institution. (2017). *BS EN 12697-17:2017 Bituminous mixtures – Test methods – Part 17: Particle loss of porous asphalt specimens* (Number BS EN 12697-17:2017). BSI Standards Limited. <https://webstore.ansi.org/standards/bsi/bsen12697172017>
- Carruth, W. D., Floyd, W. C., & Tingle, J. S. (2023). Laboratory Evaluation of Recycled Asphalt Pavement and Engineered Polymer Binder for Small Airfield Repairs. *Engineering Proceedings*, 36(1), 9. <https://doi.org/10.3390/engproc2023036009>
- Chandra, I. N., Pratikso, & Mudiyo, R. (2026). Perbandingan Lapisan Perkerasan AC-WC pada Campuran Aspal dengan Aspal Karet Buatan, Karet Alam dan Karet Pravulkanisasi menggunakan Metode Marshall Test. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 24(1).
- Costa, D. B., Neto, O. de M. M., Luz, P. M. S. G., Lucena, L. C. de F. L., & Lucena, A. E. de F. L. (2024). Influence of aging, RAP content, and recycling agent on the performance of asphalt mixtures. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1419–1441.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2019). *Spesifikasi Khusus Interim Campuran Beraspal Panas Daur Ulang Pencampuran Di Unit Produksi Campuran Aspal*.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2020). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*. <https://binamarga.pu.go.id/uploads/files/987/spesifikasi-umum-bina-marga-2018-untuk-pekerjaan-konstruksi-jalan-dan-jembatan-revisi-2.pdf>
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2025). *Spesifikasi Umum 2025 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*. Kementerian Pekerjaan Umum.

<https://binamarga.pu.go.id/index.php/nspk/detail/spesifikasi-umum-2025-untuk-pekerjaan-konstruksi-jalan-dan-jembatan>

- Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum. (2023). *Teknologi Aspal Karet*. Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum.
- Endoriawan, B., & Febriansyah, R. (2022). *Karakteristik Aspal Modifikasi Polimer Styrene Butadiene Styrene (SBS) pada Campuran HRS-WC* [Politeknik Negeri Jakarta]. <https://repository.pnj.ac.id/id/eprint/6961/>
- Federal Highway Administration. (2011). *High Reclaimed Asphalt Pavement Use* (Number FHWA-HRT-11-057). <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-TD2-PURL-gpo20363/pdf/GOVPUB-TD2-PURL-gpo20363.pdf>
- Federal Highway Administration. (2020). *Asphalt Pavement Recycling with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/rap/>
- FHWA. (2024). *FHWA Aggregates and Recycled Materials*. Federal Highway Administration.
- Helmi, M. R. (2025). Karakteristik Ravelling Resistance, Moisture Sensitivity, Dan Workability Laston Ac-Wc Dengan Bahan Tambah Polivinil Klorida (Pvc). *Repository Itera*.
- Hermadi, M., & Ronny, Y. (2015). Pengaruh Penambahan Lateks Alam terhadap Sifat Reologi Aspal. *Jurnal HPJI (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*, 1(2), 105–114. <https://journal.unpar.ac.id/index.php/HPJI/article/view/1474>
- HMA Mix Design Fundamentals, Pavemenr Interactive (2025).
- Hoy, M., Apichat Suddeepong, Horpibulsuk, Akkharawongthattana, K., Arulrajah, A., Buritatum, A., Horpibulsuk, J., & Rashid, A. S. A. (2024). Improved Performance of Natural Rubber Latex–Modified Asphalt Concretes with Various Types of Aggregates. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Iduwin, T., DP, D., & Hidayawanti, R. (2020). Uji Marshall Immersion Pada Campuran AC-WC Menggunakan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Jurnal Forum Mekanika*, 9(2).
- Jalali, M., M., M., A. R., & Kübel, C. (2023). MSLE: An ontology for Materials Science Laboratory Equipment. *Large-Scale Devices for Materials Characterization*.
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2025). *Spesifikasi Umum 2025 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2018). *SPESIFIKASI UMUM 2018 UNTUK PEKERJAAN KONSTRUKSI JALAN DAN JEMBATAN (REVISI 2)*.

- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2020). *SPESIFIKASI UMUM 2018 UNTUK PEKERJAAN KONSTRUKSI JALAN DAN JEMBATAN (REVISI 2)*.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2020). *Dorong Hilirisasi, Kemenperin Dongkrak Produksi Industri Olahan Karet Alam*. Kementerian Perindustrian Republik Indonesia.
- Khan, N., Sutanto, M. H., Khan, I., Khan, M. I., & Yousafzai, A. K. (2025). Data-driven prediction and enhancement of Marshall mix properties using machine learning. *Discover Civil Engineering*, 2(192).
- Li, W., Cao, W., Ren, X., Lou, S., Liu, S., & Zhang, J. (2022). Impacts of Aggregate Gradation on the Volumetric Parameters and Rutting Performance of Asphalt Concrete Mixtures. *Materials*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/ma15144866>
- Marlina, E., Frans, J. H., & Nasjono, J. K. (2023). Analisis Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Bina Marga 2017 Dan Program Kenpave. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2).
- Meena, P., Rongmei Naga, G. R., Kumar, P., & Monu, K. (2024). Effect of Binary Blended Fillers on the Durability Performance of Recycled Cold-Mix Asphalt. *Sustainability*, 16(12), 4908. <https://doi.org/10.3390/su16124908>
- Mohamed, S. K. , & Al-Sherrawi, M. H. (2024). Influence of Base Layer Thickness and Property on Flexible Pavement Behavior. *Journal of Engineering*, 30(6).
- Nadhifah, N., & Mahardi, P. (2025). Kinerja Campuran Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) Dengan Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Sebagai Agregat Halus dan Filler Abu Batu. *Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, 3(2), 140–155. <https://doi.org/10.26740/mitrans.v3n2.p140-155>
- National Academies of Sciences, E. and M. (2025). *Capturing the durability of high recycled binder ratio asphalt mixtures*. The National Academies Press.
- Nirwana, I. C., Pratikso, & Mudiyo, R. (2025). The Effect of Natural Rubber Modification on Asphalt Mixture Performance Based on Marshall Test Results. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(6), 30486–30492.
- Nono, & Hamdani, D. (2021). Pemanfaatan Teknologi Campuran Beraspal Panas Daur Ulang untuk Pemeliharaan Jalan. *Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum*.
- Paotong, P., Jaritngam, S., & Taneerananon, P. (2020a). Use of Natural Rubber Latex (NRL) in Improving Properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Engineering Journal*, 24(2), 53–62. <https://doi.org/10.4186/ej.2020.24.2.53>
- Paotong, P., Jaritngam, S., & Taneerananon, P. (2020b). Use of Natural Rubber Latex (NRL) in Improving Properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Engineering Journal*, 24(2).

- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., & Pasquini, E. (2021). Towards very high RAP content asphalt mixes: A comprehensive performance-based study of rejuvenated binders. *Journal Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(6), 1022–1035.
- Podungge, Z., Desei, F. L., & Achmad, F. (2022). Kajian Variasi Waktu Rendaman terhadap Penuaan Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC) menggunakan Aspal Iran. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 6(1).
- Prawistamandala, A. (2023). Pemanfaatan limbah perkerasan aspal (Reclaimed Asphalt Pavement) sebagai bahan pengganti agregat 5–10 pada campuran AC-BC (Asphalt Concrete–Binder Course) terhadap karakteristik Marshall. *Skripsi, Institut Teknologi Nasional Malang*.
- Prayuda, T. A. (2020). *Pengaruh Oli Bekas sebagai Bahan Peremaja Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) terhadap Karakteristik Campuran Split Mastic Asphalt (SMA) 0/11 dengan Selulosa Serabut Kelapa*. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/31088>
- Ramadhani, R., Arliansyah, J., & Kadarsa, E. (2024). The effect of pre-vulcanized latex usage on Marshall characteristics and stiffness modulus in hot mix asphalt wearing course (AC-WC) mixtures. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, 33(2), 185–204. <https://doi.org/10.22630/srees.6382>
- Sepriyanna, I., Putranto, L. S., Subagio, B. S., & Najid. (2025). Analisis Sifat Fisik Dan Mekanik Aspal Rapdangan Rejuvenator Waste Cooking Oil(Wco). *Jurnal Deformasi*, 10(1).
- Sholichin, I., & Wahjudijanto, I. (2023). Utilization of Natural Rubber in Asphalt Mixtures to Improve the Characteristics of Asphalt. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 8(3).
- Smith, M. R., & Collis, L. (Eds.). (2001). Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes (3rd ed.). *Geological Society, London*.
- Song, Y., Lu, Z., Feng, J., & Wu, S. (2026). Investigation on the performance, environmental and economic benefits of coarse-grained recycled asphalt mixture with high RAP content. *Construction and Building Materials*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006182600111X>
- Song, Y., Lu, Z., Feng, J., Wu, S., Wan, P., Gong, X., Xu, H., & Xie, J. (2026). Investigation on the performance, environmental and economic benefits of coarse-grained recycled asphalt mixture with high RAP content. *Construction and Building Materials*, 510. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145211>
- Spesifikasi Umum 2018 Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan Dan Jembatan (Revisi 2). Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat. (2020).

- Suherman, S. (2013). Pengaruh Polimer EVA (Ethylene Vinyl Acetate) terhadap Kinerja Campuran Lapis Antara (AC-BC). *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri*, 10(2), 1–8. <https://doi.org/10.24014/sitekin.v10i2.532>
- Sulaiman, F. Z., & Kurniati. (2025). Pemanfaatan fly ash sebagai filler campuran Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) pada pembuatan daur ulang Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC). *Jurnal Teknologi*, 2, 97–103.
- Supranowo, Setiadji, B. H., & Wardani, S. (2021). Evaluasi Kinerja Pengujian Marshall dari Campuran LASTON Daur Ulang AC-WC pada Unit Asphalt Mixing Plant terhadap Hasil Pengujian Laboratorium. *Jurnal Teknik Sipil ITB*.
- Susanto, H. A., Merdiana, K., & Indriyati, E. W. (2021). Pengaruh Penambahan Limbah Plastik Polypropylene (Pp) Terhadap Ketahanan Ravelling Campuran Asphalt Concrete Wearing Course (The Effect Of Waste Polypropylene (Pp) Plastic To The Ravelling Resistance Of Asphalt Concrete Wearing Course Mixes). *Jurnal Jalan-Jembatan*, 38(2), 86–96.
- Suwarto, F., Abed, A., Airey, G., Parry, T., Thom, N., Zhou, L., & Sudiby, T. (2025). Sustainable asphalt materials: Mechanistic-empirical design and economic evaluation of natural rubber latex-modified asphalt mixtures. *International Journal of Transportation Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.ijst.2025.06.008>
- Suwarto, F., Parry, T., & Thom, N. (2023). Engineering characterization and environmental analysis of natural rubber latex modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 402(132970).
- Udomchai, A., Buritatum, A., Suddeepong, A., Horpibulsuk, S., Yaowarat, T., & Akkharawongwhatthana, K. (2024). Asphalt concrete improved by concentrated rubber latex and prevulcanized rubber latex: Performance and cost analysis. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03919. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03919>
- Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan (2004).
- Utami, F., Subagio, B. S., & Kusumawati, A. (2020). Evaluation of The Performance of Hot Mix Asphalt with Natural Rubber (Latex) for Asphalt Concrete- Binder Course (AC-BC). *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 27(3).
- Wang, L., Shen, A., Mou, G., Guo, Y., & Meiquan, Y. (2023). Effect of RAP gradation subdivision and addition of a rejuvenator on recycled asphalt mixture engineering performance. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02136. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2023.E02136>

- Wen, Y., Wang, Y., Zhao, K., & Sumalee, A. (2017a). The use of natural rubber latex as a renewable and sustainable modifier of asphalt binder. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(6), 547–559.
- Wen, Y., Wang, Y., Zhao, K., & Sumalee, A. (2017b). The use of natural rubber latex as a renewable and sustainable modifier of asphalt binder. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(6), 547–559.
- Widayanti, A., Soemitro, R. A. A., Ekaputri, J. J., & Suprayitno, H. (2018). Tinjauan Aspek Ekonomi Pemanfaatan Reclaimed Asphalt Pavement dari Jalan Nasional di Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 2.
- Widayanti, A., Soemitro, R. A. A., Ekaputri, J. J., & Suprayitno, H. (2020). Analisis Pemanfaatan Zat Aditif pada Reclaimed Asphalt Pavement untuk Lapisan Beton Aspal. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, 4(1).
- WIDIANTO, B. W., & FAISAL, M. I. (2020). Perubahan Karakteristik Aspal Pen 60/70 dengan Substitusi Getah Karet Alam Pangkalan Balai, Sumatera Selatan. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 6(3).
- Xiao, J., Wang, T., Hong, J., Ruan, C., Zhang, Y., Yuan, D., & Wu, W. (2023). Experimental Study of Permeable Asphalt Mixture Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Sustainability*, 15(13), 10676. <https://doi.org/10.3390/su151310676>
- Yeanyong, C., Horpibulsuk, S., Suddeepong, A., Buritatum, A., Yaowarat, T., Akkharawongwhatthana, K., Phunpeng, V., Udomchai, A., & Hoy, M. (2024). Masterbatch Natural Rubber: Innovative Asphalt Cement Additive for Sustainable Flexural Pavements. *Sustainability*, 16(22), 9676. <https://doi.org/10.3390/su16229676>
- Yosevina, Y. (2022). Pengaruh Penggunaan Aspal Modifikasi Polimer Ethyl Vinyl Acetat (EVA) terhadap Campuran Laston Asphalt Concrete Wearing Course (AC-WC). *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 10(2), 95–104. <https://doi.org/10.33084/mits.v10i2.3500>
- Yu, J., Lin, Z., Zou, G., Yu, H., Leng, Z., & Zhang, Y. (2024). Long-term performance of recycled asphalt mixtures containing high RAP and RAS. *Journal of Road Engineering*, 4, 36–53.
- Zhu, F., Zhang, S., Chen, W., & Rong, H. (2024). Gradation optimization of AC-20 asphalt mixture based on the fuzzy analytic hierarchy process and comprehensive evaluation method. *Frontiers in Materials*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1423835>

LAMPIRAN



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

Jenis Material : Aspal
 Sumber Material :
 Praktikum : Pemeriksaan Penetrasi
 Kelompok : 1

PEMERIKSAAN PENETRASI
SNI 06 - 2456 - 1991

Pembukaan contoh	Contoh dipanaskan	Pembacaan waktu	Pembacaan suhu oven temperature 110° C
	Mulai jam Selesai jam	: 13.25 : 13.28	
Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang	: 33°	
	Mulai jam Selesai jam	: 13.39 : 13.44	
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu water bath temperature 25° C
	Mulai jam Selesai jam	: 14.53 : 08.00	
Pemeriksaan	Penetrasi pada suhu 25°C		Pembacaan suhu penetrometer temperature 25° C
	Mulai jam Selesai jam	Benda 1 : 08.30 Benda 2 : 08.45 Benda 3 : 08.55 Benda 4 : 09.00 Benda 1 : 08.40 Benda 2 : 08.50 Benda 3 : 09.00 Benda 4 : 09.05	

Penetrasi pada suhu 25° C 100 gram, 5 detik	Penetrasi	
	I	II
Pengamatan 1	65	64
Pengamatan 2	64	62
Pengamatan 3	62	65
Pengamatan 4	61	60
Pengamatan 5	62	61
Rerata	62,8	62,4
Rata - Rata	62,6	

Spesifikasi : 60 - 70 mm



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

Jenis Material : Aspal
 Sumber Material :
 Praktikum : Pemeriksaan Titik Lembek
 Kelompok : 1

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK
SNI 06 - 2456 - 1991

Pembukaan contoh	Contoh dipanaskan	Pembacaan waktu	Pembacaan suhu oven temperature 110° C
	Mulai jam Selesai jam	: 10.40 : 10.46	
Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang	: 28°	
	Mulai jam Selesai jam	: 10.46 : 10.56	
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 5°C		Pembacaan suhu lemari es temperature 5° C
	Mulai jam Selesai jam	: 10.56 : 11.02	
Pemeriksaan	Titik lembek pada suhu 5°C		
	Mulai jam Selesai jam	: 11.02 : 11:08	

No	Suhu Yang Diamati		Waktu (menit)		Suhu Titik Lembek (°C)	
	°C	°F	I	II	I	II
1	5	41	0:00:00	0:00:00	55	57
2	10	50	5:10:00	5:10:00		
3	15	59	7:55:00	7:55:00		
4	20	68	10:01:00	10:01:00		
5	25	77	12:16:00	12:16:00		
6	30	86	14:42:00	14:42:00		
7	35	95	17:05:00	17:05:00		
8	40	104	18:48:00	18:48:00		
9	45	113	20:57:00	20:57:00		
10	50	122	23:04:00	23:04:00		
11	55	131	25:06:00	25:06:00		
12	55	132,8	25:17:00	25:17:00		
13	57	134,6	25:45:00	25:45:00		
Rata-Rata Titik Lembek (°C)					56	

Spesifikasi : > 48°C



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

Jenis Material : Aspal
Sumber Material :
Praktikum : Pengujian Berat Jenis Aspal
Kelompok : 1

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

Pengujian		1	2	Satuan
Berat Picnometer Kosong	A	43,10	42,80	Gram
Berat Picnometer + Air	B	68,50	68,60	Gram
Berat Picnometer + Aspal	C	58,40	57,40	Gram
Berat Picnometer + Air + Aspal	D	69,20	68,90	Gram
Berat Aspal	C -A	15,30	14,60	Gram
Isi Aspal	(B - A) - (D- C)	14,60	14,30	Gram
Berat Jenis Aspal	(C - A)	1,05	1,02	
	(B - A) - (D- C)			
Berat Jenis Aspal Rerata	(Uji 1 + Uji 2)	1,03		
	2			

Spesifikasi : $B_j > 1$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

Jenis Material : Aspal
Sumber Material :
Praktikum : Pemeriksaan Daktilitas
Kelompok : 1

PEMERIKSAAN DAKTILITAS
SNI 06 - 2432 - 1991

Pembukaan contoh	Contoh dipanaskan	Pembacaan waktu	Pembacaan suhu oven temperature 110° C
	Mulai jam	: 09.01	
	Selesai jam	: 09.11	
Mendinginkan contoh	Didiamkan pada suhu ruang	: 28°	
	Mulai jam	: 09.30	
	Selesai jam	: 09.45	
Mencapai suhu pemeriksaan	Direndam pada suhu 25°C		Pembacaan suhu water bath temperature 25° C
	Mulai jam	: 09.48	
	Selesai jam	: 09.50	
Pemeriksaan	Daktalitas pada suhu 25°C		Pembacaan suhu alat temperature 25° C
	Mulai jam	: 09.51	
	Selesai jam	: 09.53	

Daktalitas Pada Suhu 25°C 5 cm/menit	Pembacaan Pengukuran Pada Alat		Satuan
	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
Pengamatan 1	43	88	Cm
Pengamatan 2	98	102,5	Cm
Rata-Rata	70,5	95,25	Cm



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

AGREGAT KASAR

ANALISIS SARINGAN

Material = Agregat Lolos 3/4"
Berat Material = 5000 gr

Saringan	Tertahan			Lolos	
	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan		Kumulatif
No	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	1431,80	28,65	28,65	71,35
3/8"	9,500	569,80	11,40	40,05	59,95
#4	4,750	1576,60	31,55	71,60	28,40
#8	2,360	1252,90	25,07	96,68	3,32
#16	1,180	30,80	0,62	97,29	2,71
#30	0,600	20,60	0,41	97,70	2,30
#50	0,300	1,60	0,03	97,74	2,26
#100	0,150	1,80	0,04	97,77	2,23
#200	0,075	34,30	0,69	98,46	1,54
PAN	0	77,00	1,54	100	0,00
Total (W ₁)		4997,2	100		

ANALISIS SARINGAN

Material = Agregat Lolos 1/2"
Berat Material = 2500 gr

Saringan	Tertahan			Lolos	
	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan		Kumulatif
No	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0	0	100
1/2"	12,500	0,00	0	0,00	100,00
3/8"	9,500	588,60	23,58	23,58	76,42
#4	4,750	835,80	33,48	57,07	42,93
#8	2,360	620,70	24,87	81,93	18,07
#16	1,180	322,60	12,92	94,86	5,14
#30	0,600	1,90	0,08	94,93	5,07
#50	0,300	5,00	0,20	95,13	4,87
#100	0,150	37,50	1,50	96,63	3,37
#200	0,075	21,70	0,87	97,50	2,50
PAN	0	62,30	2,50	100	0,00
Total (W ₁)		2496,1	100		



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

AGREGAT HALUS DAN FILLER

ANALISIS SARINGAN

Material = Pasir Lolos No. 4
Berat Material = 500 gr

Saringan	Tertahan			Lolos	
	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan		Kumulatif
No	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,750	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,360	32,60	6,53	6,53	93,47
#16	1,180	61,10	12,24	18,77	81,23
#30	0,600	136,70	27,38	46,14	53,86
#50	0,300	116,40	23,31	69,46	30,54
#100	0,150	80,10	16,04	85,50	14,50
#200	0,075	11,40	2,28	87,78	12,22
PAN	0	61,00	12,22	100	0,00
Total (W ₁)		499,3	100		

ANALISIS SARINGAN

Material = Abu Batu Lolos No. 4
Berat Material = 500 gr

Saringan	Tertahan			Lolos	
	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan		Kumulatif
No	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,750	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,360	139,1	28,22	28,22	71,78
#16	1,180	52,10	10,57	38,78	61,22
#30	0,600	147,00	29,82	68,60	31,40
#50	0,300	43,50	8,82	77,42	22,58
#100	0,150	58,90	11,95	89,37	10,63
#200	0,075	51,50	10,45	99,82	0,18
PAN	0	0,90	0,18	100	0,00
Total (W ₁)		493,00	100		



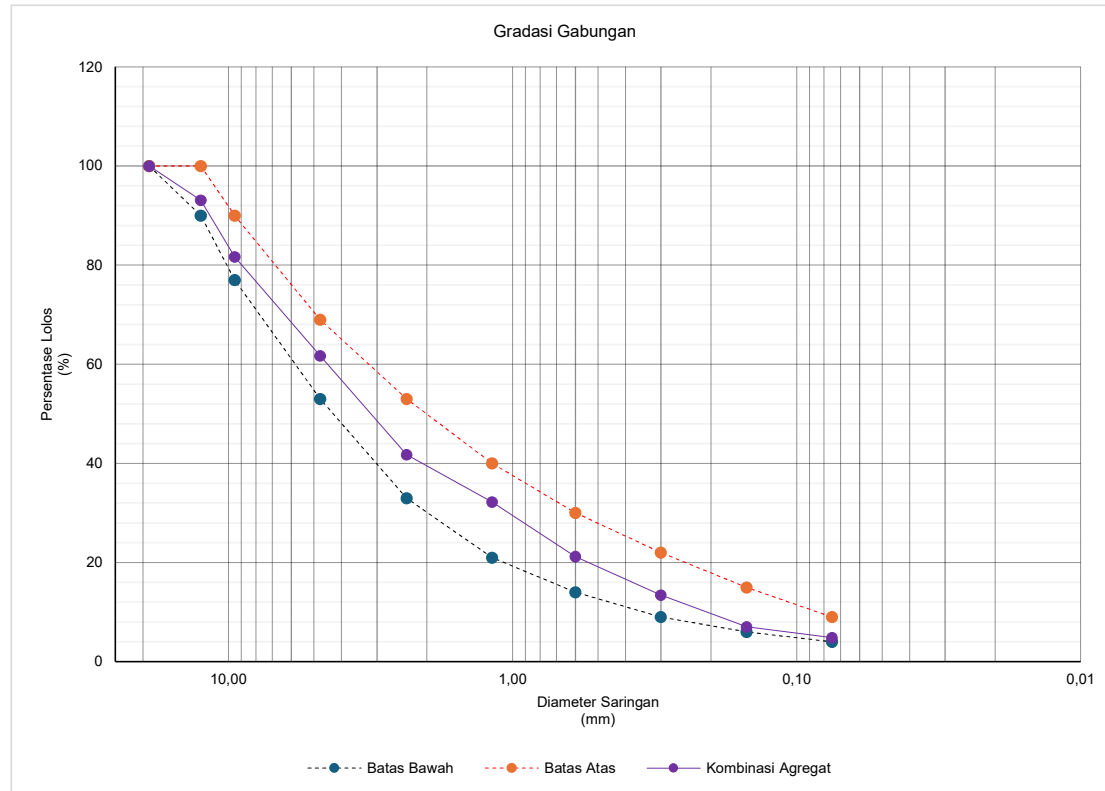
KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

PENENTUAN PERSENTASE KOMPOSISI FRAKSI AGREGAT

Saringan		Agregat Kasar		Agregat Halus		Kombinasi Agregat	AC-WC	
No	Ukuran	3/4"	1/2"	Pasir	Abu Batu		Spesifikasi	
	(mm)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	Bawah	Atas
3/4"	19,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100
1/2"	12,500	71,35	100,00	100,00	100,00	93,12	90	100
3/8"	9,500	59,95	76,42	100,00	100,00	81,66	77	90
#4	4,750	28,40	42,93	100,00	100,00	61,70	53	69
#8	2,360	3,32	18,07	93,47	71,78	41,77	33	53
#16	1,180	2,71	5,14	81,23	61,22	32,23	21	40
#30	0,600	2,30	5,07	53,86	31,40	21,18	14	30
#50	0,300	2,26	4,87	30,54	22,58	13,46	9	22
#100	0,150	2,23	3,37	14,50	10,63	7,05	6	15
#200	0,075	1,54	2,50	12,22	0,18	4,85	4	9
PAN	0	0,00	0,00	0,00	0,00			
		Agregat 3/4"		=	24	%	288	gr
		Agregat 1/2"		=	37	%	444	gr
		Perbandingan campuran dari persentase berat total agregat						
		Pasir No. 4		=	29	%	348	gr
		Abu Batu No. 4		=	10	%	120	gr
		Total		=	100	%	1200	gr



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI



20
35
25
20
24
40
26
10
24
37
29
10



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

BENDA UJI

Kadar Aspal = 4,5 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1146 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	24	275,04	gr
Agregat 1/2"	37	424,02	gr
Pasir	29	332,34	gr
Abu Batu	10	114,60	gr
Aspal	4,5	54,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr

Kadar Aspal = 5,5 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1134 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	24	272,16	gr
Agregat 1/2"	37	419,58	gr
Pasir	29	328,86	gr
Abu Batu	10	113,40	gr
Aspal	5,5	66,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr

Kadar Aspal = 5 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1140 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	24	273,60	gr
Agregat 1/2"	37	421,80	gr
Pasir	29	330,60	gr
Abu Batu	10	114,00	gr
Aspal	5	60,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr

Kadar Aspal = 6 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1128 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	24	270,72	gr
Agregat 1/2"	37	417,36	gr
Pasir	29	327,12	gr
Abu Batu	10	112,80	gr
Aspal	6	72,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

NO.	SAMPLE 1		
1	W sample	=	1000 gr
2	W penyaring	=	29,1 gr
3	W sampel + penyaring	=	1029,1 gr
4	W mineral + penyaring	=	985 gr
5	W aspal	=	44,1 gr
6	Kadar Aspal	=	4,41 %

NO.	SAMPLE 2		
1	W sample	=	1000 gr
2	W penyaring	=	29,4 gr
3	W sampel + penyaring	=	1029,4 gr
4	W mineral + penyaring	=	984 gr
5	W aspal	=	45,4 gr
6	Kadar Aspal	=	4,54 %

SAMPEL 1	=	4,41	%
SAMPEL 2	=	4,54	%
Rata-rata	=	4,475	%

KANDUNGAN RAP				
Agg (%)	KAO (%)	RAP (%)	KADAR ASPAL RAP (%)	ASPAL RAP (%)
100%	5,9%	30%	4,475%	1,26%

ESTIMASI ASPAL BARU			
KANDUNGAN RAP (%)	KAO (%)	ASPAL BARU (%)	
1,26%	5,9%	4,64%	



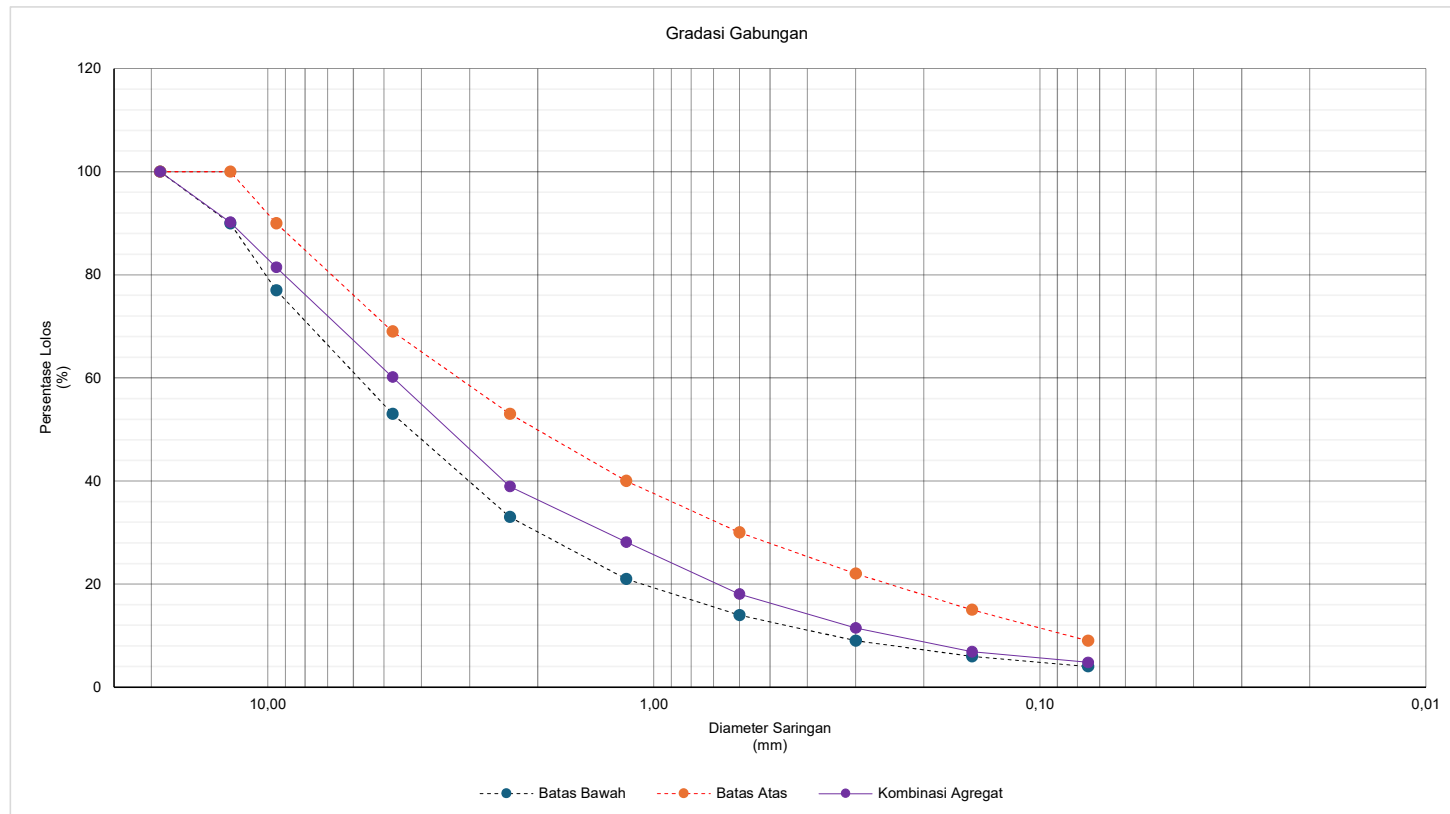
KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

PENENTUAN PERSENTASE KOMPOSISI FRAKSI AGREGAT

Saringan		Agregat Kasar		Agregat Halus		RAP			Kombinasi Agregat	AC-WC	
No	Ukuran	3/4"	1/2"	Pasir	Abu Batu	>9,5	9,5-4	<4		Spesifikasi	
	(mm)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	Bawah	Atas
3/4"	19,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100	100
1/2"	12,500	71,35	100,00	100,00	100,00	41,80	100,00	100,00	90,20	90	100
3/8"	9,500	59,95	76,42	100,00	100,00	0,82	99,22	100,00	81,43	77	90
#4	4,750	28,40	42,93	100,00	100,00	0,82	0,05	100,00	60,18	53	69
#8	2,360	3,32	18,07	93,47	82,46	0,82	0,05	42,44	38,92	33	53
#16	1,180	2,71	5,14	81,23	67,82	0,82	0,05	13,04	28,15	21	40
#30	0,600	2,30	5,07	53,86	41,49	0,82	0,05	7,60	18,03	14	30
#50	0,300	2,26	4,87	30,54	27,23	0,82	0,05	2,91	11,48	9	22
#100	0,150	2,23	3,37	14,50	17,27	0,82	0,05	0,74	6,88	6	15
#200	0,075	1,54	2,50	12,22	11,35	0,82	0,05	0,04	4,81	4	9
PAN	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Perbandingan campuran dari persentase berat total agregat	gr	Agregat 3/4"				=			20	%	240
	gr	Agregat 1/2"				=			15	%	180
	gr	Pasir No. 4				=			10	%	120
	gr	Abu Batu No. 4				=			25	%	300
	gr	RAP >9,5				=			7	%	84
	gr	RAP 9,5-4				=			10	%	120
	gr	RAP <4				=			13	%	156
	gr	Total				=			100	%	1200



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI





KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

AGREGAT KASAR

ANALISIS SARINGAN

Material = Agregat Lolos 3/4"
Berat Material = 5000 gr

Saringan	Tertahan				Lolos
	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan	Kumulatif	
No	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	1431,80	28,65	28,65	71,35
3/8"	9,500	569,80	11,40	40,05	59,95
#4	4,750	1576,60	31,55	71,60	28,40
#8	2,360	1252,90	25,07	96,68	3,32
#16	1,180	30,80	0,62	97,29	2,71
#30	0,600	20,60	0,41	97,70	2,30
#50	0,300	1,60	0,03	97,74	2,26
#100	0,150	1,80	0,04	97,77	2,23
#200	0,075	34,30	0,69	98,46	1,54
PAN	0	77,00	1,54	100	0,00
Total (W ₁)		4997,2	100		

ANALISIS SARINGAN

Material = Agregat Lolos 1/2"
Berat Material = 2500 gr

Saringan	Tertahan				Lolos
	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan	Kumulatif	
No	(mm)	(gr)	(%)	(%)	(%)
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0	0	100
1/2"	12,500	0,00	0	0,00	100,00
3/8"	9,500	588,60	23,58	23,58	76,42
#4	4,750	835,80	33,48	57,07	42,93
#8	2,360	620,70	24,87	81,93	18,07
#16	1,180	322,60	12,92	94,86	5,14
#30	0,600	1,90	0,08	94,93	5,07
#50	0,300	5,00	0,20	95,13	4,87
#100	0,150	37,50	1,50	96,63	3,37
#200	0,075	21,70	0,87	97,50	2,50
PAN	0	62,30	2,50	100	0,00
Total (W ₁)		2496,1	100		



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
 UNIVERSITAS DIPONEGORO
 SEKOLAH VOKASI
 TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
 LABORATORIUM TRANSPORTASI

AGREGAT HALUS DAN FILLER

ANALISIS SARINGAN	
Material	= Pasir Lolos No. 4
Berat Material	= 500 gr

ANALISIS SARINGAN	
Material	= Abu Batu Lolos No. 4
Berat Material	= 500 gr

Saringan No	Ukuran (mm)	Tertahan			Lolos (%)
		B. Tertahan (gr)	B. Tertahan (%)	Kumulatif (%)	
		(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	
	0				(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,750	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,360	32,60	6,53	6,53	93,47
#16	1,180	61,10	12,24	18,77	81,23
#30	0,600	136,70	27,38	46,14	53,86
#50	0,300	116,40	23,31	69,46	30,54
#100	0,150	80,10	16,04	85,50	14,50
#200	0,075	11,40	2,28	87,78	12,22
PAN	0	61,00	12,22	100	0,00
Total (W ₁)		499,3	100		

Saringan No	Ukuran (mm)	Tertahan			Lolos (%)
		B. Tertahan (gr)	B. Tertahan (%)	Kumulatif (%)	
		(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	
	0				(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,750	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,360	174,8	17,54	17,54	82,46
#16	1,180	146,00	14,65	32,18	67,82
#30	0,600	262,40	26,32	58,51	41,49
#50	0,300	142,20	14,27	72,77	27,23
#100	0,150	99,30	9,96	82,73	17,27
#200	0,075	59,00	5,92	88,65	11,35
PAN	0	113,10	11,35	100	0,00
Total (W ₁)		996,80	100		



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
 UNIVERSITAS DIPONEGORO
 SEKOLAH VOKASI
 TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
 LABORATORIUM TRANSPORTASI

Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

ANALISIS SARINGAN		
Material	=	RAP >9.5
Berat Material	=	5000

ANALISIS SARINGAN		
Material	=	RAP 9.5 - 4
Berat Material	=	2500 gr

Saringan No	Tertahan				Lolos (%)
	Ukuran (mm)	B. Tertahan (gr)	B. Tertahan (%)	Kumulatif (%)	
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	2494,10	58,20	58,20	41,80
3/8"	9,500	1755,90	40,97	99,18	0,82
#4	4,750	0,00	0,00	99,18	0,82
#8	2,360	0,0	0,00	99,18	0,82
#16	1,180	0,00	0,00	99,18	0,82
#30	0,600	0,00	0,00	99,18	0,82
#50	0,300	0,00	0,00	99,18	0,82
#100	0,150	0,00	0,00	99,18	0,82
#200	0,075	0,00	0,00	99,18	0,82
PAN	0	35,30	0,82	100	0,00
Total (W ₁)		4285,30	100		

Saringan No	Tertahan				Lolos (%)
	Ukuran (mm)	B. Tertahan (gr)	B. Tertahan (%)	Kumulatif (%)	
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	19,50	0,78	0,78	99,22
#4	4,750	2475,00	99,17	99,95	0,05
#8	2,360	0,0	0,00	99,95	0,05
#16	1,180	0,00	0,00	99,95	0,05
#30	0,600	0,00	0,00	99,95	0,05
#50	0,300	0,00	0,00	99,95	0,05
#100	0,150	0,00	0,00	99,95	0,05
#200	0,075	0,00	0,00	99,95	0,05
PAN	0	1,20	0,05	100	0,00
Total (W ₁)		2495,70	100		



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

ANALISIS SARINGAN		
Material	=	RAP <4
Berat Material	=	500 gr

No	Saringan	Tertahan			Lolos (%)
	Ukuran	B. Tertahan	B. Tertahan	Kumulatif	
	(mm)	(gr)	(%)	(%)	
	0	(1)	(2)=(1/W ₁)	(3)	(4)=(100-3)
3/4"	19,000	0,00	0,00	0,00	100
1/2"	12,500	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
#4	4,750	0,00	0,00	0,00	100,00
#8	2,360	287,0	57,56	57,56	42,44
#16	1,180	146,60	29,40	86,96	13,04
#30	0,600	27,10	5,44	92,40	7,60
#50	0,300	23,40	4,69	97,09	2,91
#100	0,150	10,80	2,17	99,26	0,74
#200	0,075	3,50	0,70	99,96	0,04
PAN	0	0,20	0,04	100	0,00
Total (W ₁)		498,60	100		



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

BENDA UJI

Kadar Aspal = 3,5 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1158 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	20	231,60	gr
Agregat 1/2"	15	173,70	gr
Pasir	10	115,80	gr
Abu Batu	25	289,50	gr
RAP >9,5	7	81,06	gr
RAP 9,5-4	10	115,80	gr
RAP <4	13	150,54	gr
Aspal	3,5	42,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr

Kadar Aspal = 4 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1152 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	20	230,40	gr
Agregat 1/2"	15	172,80	gr
Pasir	10	115,20	gr
Abu Batu	25	288,00	gr
RAP >9,5	7	80,64	gr
RAP 9,5-4	10	115,20	gr
RAP <4	13	149,76	gr
Aspal	4	48,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr

Kadar Aspal = 4,5 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1146 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	20	229,20	gr
Agregat 1/2"	15	171,90	gr
Pasir	10	114,60	gr
Abu Batu	25	286,50	gr
RAP >9,5	7	80,22	gr
RAP 9,5-4	10	114,60	gr
RAP <4	13	148,98	gr
Aspal	4,5	54,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr

Kadar Aspal = 5 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1140 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	20	228,00	gr
Agregat 1/2"	15	171,00	gr
Pasir	10	114,00	gr
Abu Batu	25	285,00	gr
RAP >9,5	7	79,80	gr
RAP 9,5-4	10	114,00	gr
RAP <4	13	148,20	gr
Aspal	5	60,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

Kadar Aspal = 5,5 %
Berat Benda Uji = 1200 gr
Berat Agregat = 1134 gr

Material	%	Berat	
Agregat 3/4"	20	226,80	gr
Agregat 1/2"	15	170,10	gr
Pasir	10	113,40	gr
Abu Batu	25	283,50	gr
RAP >9,5	7	79,38	gr
RAP 9,5-4	10	113,40	gr
RAP <4	13	147,42	gr
Aspal	5,5	66,00	gr
Berat Total	=	1200,00	gr



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL : 4,50%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,568	515,59
2	6,41	503,19
3	6,25	490,63

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	4,5	2,400	508,3	1175	670	1178,3	2,312	3,684	15,280	73,270	107	1024,47	0,0376	26712,361	3,76	272,466	0,989
2	4,5	2,400	503,5	1171,2	670	1173,5	2,326	3,081	14,749	76,738	110	1048,94	0,0337	30515,400	3,37	311,257	0,985
3	4,5	2,400	498,2	1166,8	670	1168,2	2,342	2,418	14,166	80,889	114	1087,08	0,0373	28572,767	3,73	291,442	0,985
rata-rata	4,5	2,4000533	503,333	1171	670	1173,3	2,326592	3,0608	14,731608	76,9657339	110,33	1053,4961	0,0362	28600,1758	3,62	291,72179	0,9863

Komposisi agregat	Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437
BP 1/2"	15	2,712
Pasir	10	2,734
Abu batu	25	2,758
RAP >9,5	7	2,403
RAP 9,5-4	10	2,737
RAP <4	13	2,430
BJ MAKSIMUM (GMM)	2,400	

$$Gsb = \frac{20}{2,437} + \frac{15}{2,712} + \frac{10}{2,734} + \frac{25}{2,758} + \frac{7}{2,403} + \frac{10}{2,737} + \frac{13}{2,430} = 2,606$$

$$Gsa = \frac{20}{2,505} + \frac{15}{2,420} + \frac{10}{2,605} + \frac{25}{2,540} + \frac{7}{2,502} + \frac{10}{2,915} + \frac{13}{2,295} = 2,515$$

$$Gse = \frac{2,606 + 2,515}{2} = 2,561$$

$$Gs Aspal = 1,03$$

$$Kalibrasi = 9,681$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL : 5,00%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,38	500,83
2	6,46	507,11
3	6,26	491,41

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara	rongga dalam min agg	rongga terisi aspal	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	5	2,383	512,4	1181	670	1182,4	2,305	3,298	15,971	77,232	104	998,77	0,0424	23094,002	4,24	235,559	0,992
2	5	2,383	515,9	1181	670	1185,9	2,289	3,954	16,541	73,755	112	1053,91	0,043	24029,010	4,3	245,096	0,972
3	5	2,383	517	1176,9	660	1177	2,276	4,491	17,008	71,101	107	1020,33	0,0309	32372,898	3,09	330,204	0,985
rata-rata	5	2,3834546	515,1	1179,6	666,67	1181,8	2,290149	3,9147	16,506674	74,029272	107,67	1024,3369	0,038767	26498,6367	3,88	270,28609	0,983

Komposisi agregat		Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437	2,505
BP 1/2"	15	2,712	2,420
Pasir	10	2,734	2,605
Abu Batu	25	2,758	2,540
RAP >9,5	7	2,403	2,502
RAP 9,5-4	10	2,737	2,915
RAP <4	13	2,430	2,295
BJ MAKSIMUM (GMM)		2,383	

$$Gsb = \frac{20}{2,437} + \frac{15}{2,712} + \frac{10}{2,734} + \frac{25}{2,758} + \frac{7}{2,403} + \frac{10}{2,737} + \frac{13}{2,430} = 2,606$$

$$Gsa = \frac{20}{2,505} + \frac{15}{2,420} + \frac{10}{2,605} + \frac{25}{2,540} + \frac{7}{2,502} + \frac{10}{2,915} + \frac{13}{2,295} = 2,515$$

$$Gse = \frac{2,606 + 2,515}{2} = 2,561$$

$$Gs Aspal = 1,03$$

$$Kalibrasi = 9,681$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL : 5,50%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,24	489,84
2	6,19	485,92
3	6,21	487,49

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara	rongga dalam min agg	rongga terisi aspal	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	5,5	2,367	514,4	1176,9	660	1174,4	2,288	3,345	17,027	78,506	106	1012,85	0,0376	26409,199	3,76	269,374	0,987
2	5,5	2,367	524,3	1183,7	660	1184,3	2,258	4,622	18,124	72,286	105	970,76	0,038	25045,466	3,8	255,464	0,955
3	5,5	2,367	507,1	1172,2	665	1172,1	2,312	2,345	16,169	84,035	106	1021,06	0,0373	26837,383	3,73	273,741	0,995
rata-rata	5,5	2,3670839	515,267	1177,6	661,67	1176,9	2,28572	3,4373	17,106707	78,2756584	105,67	1001,5543	0,037633	26097,3493	3,763333	266,19296	0,979

Komposisi agregat		Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437	2,505
BP 1/2"	15	2,712	2,420
Pasir	10	2,734	2,605
Abu Batu	25	2,758	2,540
RAP >9,5	7	2,403	2,502
RAP 9,5-4	10	2,737	2,915
RAP <4	13	2,430	2,295
BJ MAKSIMUM (GMM)		2,367	

$$Gsb = \frac{100}{\frac{20}{2,437} + \frac{15}{2,712} + \frac{10}{2,734} + \frac{25}{2,758} + \frac{7}{2,403} + \frac{10}{2,737} + \frac{13}{2,430}} = 2,606$$

$$Gsa = \frac{100}{\frac{20}{2,505} + \frac{15}{2,420} + \frac{10}{2,605} + \frac{25}{2,540} + \frac{7}{2,502} + \frac{10}{2,915} + \frac{13}{2,295}} = 2,515$$

$$Gse = \frac{2,606 + 2,515}{2} = 2,561$$

$$Gs Aspal = 1,03$$

$$Kalibrasi = 9,681$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL : 3,50%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,685	524,77
2	6,467	507,66
3	6,574	516,06

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara	rongga dalam min agg	rongga terisi aspal	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	3,5	2,434	504,2	1176	680	1184,2	2,332	4,172	13,623	65,514	103	993,15	0,043	22643,740	4,3	230,966	0,996
2	3,5	2,434	502,3	1176	680	1182,3	2,341	3,810	13,297	67,620	105	986,01	0,0323	29928,060	3,23	305,266	0,970
3	3,5	2,434	505,3	1176	675	1180,3	2,327	4,381	13,811	64,353	104	994,74	0,0435	22419,250	4,35	228,676	0,988
rata-rata	3,5	2,433954	503,933	1176	678,33	1182,3	2,333656	4,1208	13,577131	65,8288644	104	991,30213	0,0396	24997,0164	3,96	254,96957	0,9847

Komposisi agregat	Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437
BP 1/2"	15	2,712
Pasir	10	2,734
Abu Batu	25	2,758
RAP >9,5	7	2,403
RAP 9,5-4	10	2,737
RAP <4	13	2,430
BJ MAKSIMUM (GMM)	2,434	

$$\begin{aligned}
 Gsb &= \frac{100}{\frac{20}{2,437} + \frac{15}{2,712} + \frac{10}{2,734} + \frac{25}{2,758} + \frac{7}{2,403} + \frac{10}{2,737} + \frac{13}{2,430}} = 2,606 \\
 Gsa &= \frac{100}{\frac{20}{2,505} + \frac{15}{2,420} + \frac{10}{2,605} + \frac{25}{2,540} + \frac{7}{2,502} + \frac{10}{2,915} + \frac{13}{2,295}} = 2,515 \\
 Gse &= \frac{2,606 + 2,515}{2} = 2,561 \\
 Gs \text{ Aspal} &= 1,03 \\
 \text{Kalibrasi} &= 9,681
 \end{aligned}$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
 UNIVERSITAS DIPONEGORO
 SEKOLAH VOKASI
 TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
 LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL : 4,00%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,49	509,47
2	6,67	523,60
3	6,41	503,19

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara	rongga dalam min agg	rongga terisi aspal	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	4	2,417	517,2	1164,8	655	1172,2	2,252	6,817	17,029	56,198	105	980,93	0,0493	19506,967	4,93	198,97106	0,965
2	4	2,417	513,2	1179,2	675	1188,2	2,298	4,930	15,348	64,414	110	990,37	0,036	26970,760	3,6	275,10175	0,930
3	4	2,417	499,7	1170,5	675	1174,7	2,342	3,082	13,703	74,696	106	1010,79	0,035	28313,535	3,5	288,79806	0,985
rata-rata	4	2,4168848	510,033	1171,5	668,33	1178,4	2,297424	4,9428	15,35976	65,1026231	107	994,02895	0,0401	24930,4206	4,01	254,29	0,96

Komposisi agregat	Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437
BP 1/2"	15	2,712
Pasir	10	2,734
Abu Batu	25	2,758
RAP >9,5	7	2,403
RAP 9,5-4	10	2,737
RAP <4	13	2,430
BJ MAKSIMUM (GMM)	2,417	

$$Gsb = \frac{100}{\frac{20}{2,437} + \frac{15}{2,712} + \frac{10}{2,734} + \frac{25}{2,758} + \frac{7}{2,403} + \frac{10}{2,737} + \frac{13}{2,430}} = 2,606$$

$$Gsa = \frac{100}{\frac{20}{2,505} + \frac{15}{2,420} + \frac{10}{2,605} + \frac{25}{2,540} + \frac{7}{2,502} + \frac{10}{2,915} + \frac{13}{2,295}} = 2,515$$

$$Gse = \frac{2,606 + 2,515}{2} = 2,561$$

$$Gs Aspal = 1,03$$

$$Kalibrasi = 9,681$$

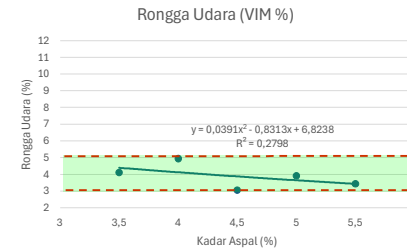
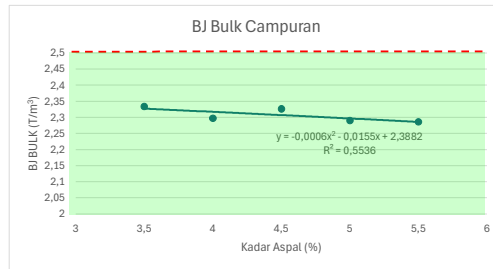


KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

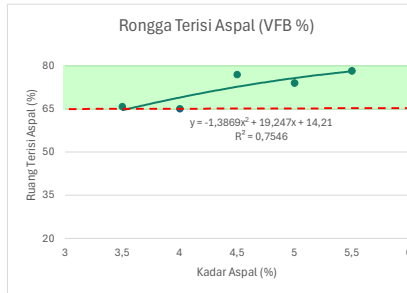
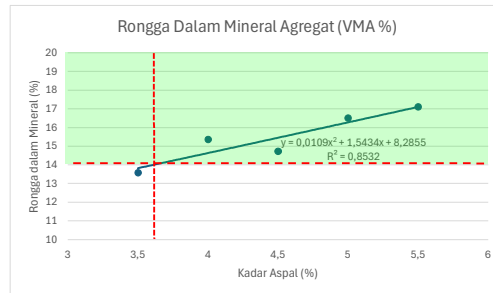
REKAPITULASI KADAR ASPAL

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	3,5	2,434	503,93	1176	678,33	1182,27	2,334	4,121	13,577	65,829	104	991,302	0,040	24997,016	3,960	254,970	0,985
1	4	2,417	510,03	1171,5	668,33	1178,37	2,297	4,943	15,360	65,103	107	994,029	0,040	24930,421	4,010	254,290	0,960
2	4,5	2,400	503,33	1171	670	1173,33	2,327	3,061	14,732	76,966	110,33	1053,496	0,036	28600,176	3,620	291,722	0,986
3	5	2,383	515,10	1179,6	666,67	1181,77	2,290	3,915	16,507	74,029	107,67	1024,337	0,039	26498,637	3,877	270,286	0,983
4	5,5	2,367	515,27	1177,6	661,67	1176,93	2,286	3,437	17,107	78,276	105,67	1001,554	0,038	26097,349	3,763	266,193	0,979
								MIN.3-5	MIN.14	MIN. 65		MIN. 1000			MIN. 2-4		

Parameter Marshall	Spesifikasi	Kadar Aspal
BJ Bulk Campuran	maks. 2,5 T/r	4,5-6,5
Rongga Udara (VIM)	3-5%	4,5-5
Rongga dalam Agregat (VMA)	min. 15	5,5-6
Rongga Terisi Aspal (VFB)	min. 65	4,5-6
Stabilitas	min. 800	4,5-6,5
Flow	2-4 mm	4,5-6,5
Marshall Quotient	min. 250	4,5-6,5



Kadar Aspal	BJ Bulk Campuran
3,5	2,334
4	2,297
4,5	2,327
5	2,290
5,5	2,286



Kadar Aspal	Rongga Udara
3,5	4,12
4	4,94
4,5	3,06
5	3,91
5,5	3,44

Kadar Aspal	Rongga dalam Agregat
3,5	13,58
4	15,36
4,5	14,73
5	16,51
5,5	17,11



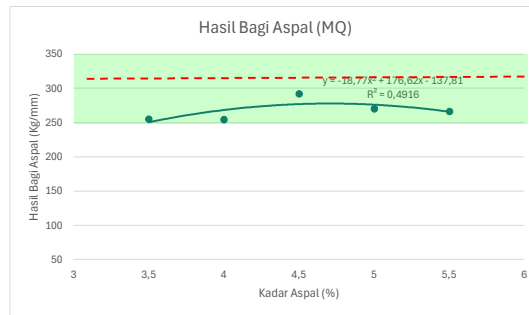
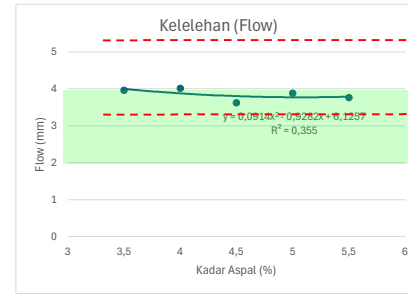
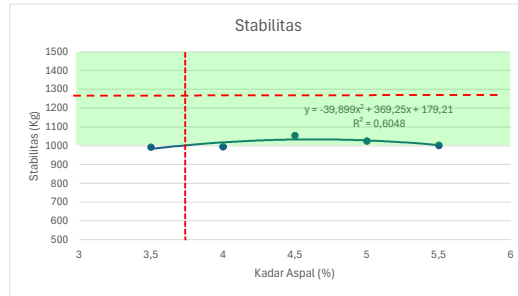
KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

Kadar Aspal	Rongga Terisi Aspal
3,5	72,29
4	74,73
4,5	67,31
5	73,33
5,5	49,15

Kadar Aspal	Stabilitas
3,5	991,30
4	994,03
4,5	1053,50
5	1024,34
5,5	1001,55

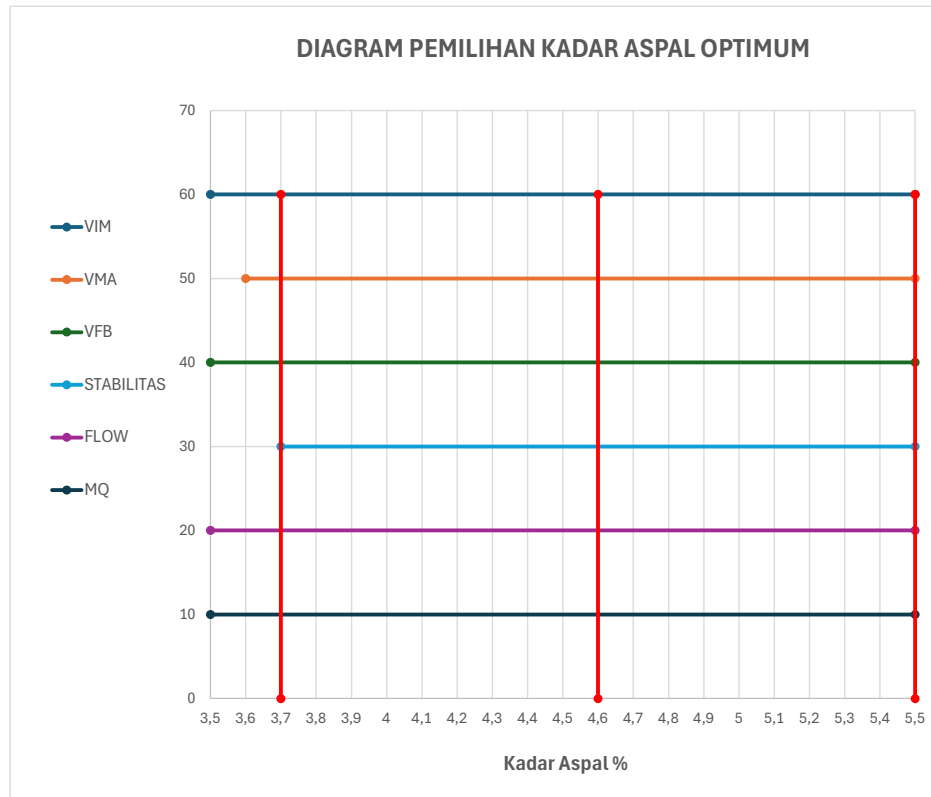
Kadar Aspal	Flow
3,5	3,960
4	4,010
4,5	3,620
5	3,877
5,5	3,763

Kadar Aspal	Marshall Quotient
3,5	254,97
4	254,29
4,5	291,72
5	270,29
5,5	266,19





KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI



KADAR ASPAL OPTIMUM					
	x	y		RENTANG	
				MAX	5,5
					0
VIM	3,5	60		MIN	3,7
	5,5	60			0
VMA	3,6	50		KAO	4,6
	5,5	50			0
VFB	3,5	40			
	5,5	40			
STABILITAS	3,7	30			
	5,5	30			
FLOW	3,5	20			
	5,5	20			
MQ	3,5	10			
	5,5	10			

kadar aspal	BJ Bulk	VIM	VMA	VFB	STABILITAS	FLOW	MQ
3,5	2,334	4,121	13,577	65,829	991,302	3,960	254,970
4	2,297	4,943	15,360	65,103	994,029	4,010	254,290
4,5	2,327	3,061	14,732	76,966	1053,496	3,620	291,722
5	2,290	3,915	16,507	74,029	1024,337	3,877	270,286
5,5	2,286	3,437	17,107	78,276	1001,554	3,763	266,193
SPEK	maks. 2,5	min 3 - 5	MIN. 14	MIN. 65	min. 1000	min 2 - 4	min 250

$$\text{Kadar Aspal Optimum} = \frac{3,7 + 5,5}{2} = 4,6$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL :	4,60%
NRL:	0%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,549	514,10
2	6,571	515,82
3	6,546	513,86

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelehan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	4,6	2,397	508,9	1167,6	665	1173,9	2,294	4,271	16,002	70,580	108	1034,05	0,037	27399,231	3,7	279,47	0,989
2	4,6	2,397	512,5	1183,8	680	1192,5	2,310	3,625	15,435	73,998	109	1039,40	0,0321	31745,176	3,21	323,80	0,985
3	4,6	2,397	511,6	1177,2	670	1181,6	2,301	3,993	15,759	72,015	108	1029,86	0,0392	25756,922	3,92	262,72	0,985
rata-rata	4,6	2,397	511	1176,2	672	1182,7	2,302	3,963	15,732	72,198	108	1034,44	0,036	28300,44	3,61	288,66	0,986

Komposisi agregat	Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437
BP 1/2"	15	2,712
Pasir	10	2,734
Abu batu	25	2,758
RAP >9,5	7	2,403
RAP 9,5-4	10	2,737
RAP <4	13	2,430
BJ MAKSIMUM (GMM)	2,397	

$$Gsb = \frac{20}{2,437} + \frac{15}{2,712} + \frac{10}{2,734} + \frac{25}{2,758} + \frac{7}{2,403} + \frac{10}{2,737} + \frac{13}{2,430} = 2,606$$

$$Gsa = \frac{20}{2,505} + \frac{15}{2,420} + \frac{10}{2,605} + \frac{25}{2,540} + \frac{7}{2,502} + \frac{10}{2,915} + \frac{13}{2,295} = 2,515$$

$$Gse = \frac{2,606 + 2,515}{2} = 2,561$$

$$Gs Aspal = 1,03$$

$$Kalibrasi = 9,681$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL : 4,60%

NRL: 3%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,39	501,62
2	6,433	504,99
3	6,516	511,51

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	4,6	2,397	517,4	1183,5	670	1187,4	2,287	4,562	16,257	69,130	107	1024,47	0,099	10145,301	9,9	103,48	0,989
2	4,6	2,397	525,7	1177,1	655	1180,7	2,239	6,576	18,025	60,326	111	1058,47	0,098	10588,957	9,8	108,01	0,985
3	4,6	2,397	525,7	1177,1	655	1180,7	2,239	6,576	18,025	60,326	110	1048,94	0,113	9100,610	11,3	92,83	0,985
rata-rata	4,6	2,397	522,9	1179,2	660	1182,9	2,255	5,905	17,436	63,261	109	1043,96	0,103	9944,956	10,3	101,44	0,986

Komposisi agregat	Bulk	APP
Komposisi agregat	Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437
BP 1/2"	15	2,712
Pasir	10	2,734
Abu batu	25	2,758
RAP >9,5	7	2,403
RAP 9,5-4	10	2,737
RAP<4	2,430	

$$\begin{aligned}
 \text{Gsb} &= \frac{100}{20} \times \frac{15}{2,437} \times \frac{10}{2,734} \times \frac{25}{2,758} \times \frac{7}{2,403} \times \frac{10}{2,737} \times \frac{13}{2,430} = 2,606 \\
 \text{Gsa} &= \frac{100}{20} \times \frac{15}{2,505} \times \frac{10}{2,420} \times \frac{25}{2,605} \times \frac{7}{2,502} \times \frac{10}{2,915} \times \frac{13}{2,295} = 2,515 \\
 \text{Gse} &= \frac{2,606}{2} = 2,561 \\
 \text{Gs Aspal} &= 1,03 \\
 \text{Kalibrasi} &= 9,681
 \end{aligned}$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

KADAR ASPAL : 4,60%

NRL: 5%

No benda uji	tinggi benda uji (cm) (t)	volume (cm ³)
1	6,652	522,18
2	6,434	505,07
3	6,615	519,28

nomor benda uji	kadar aspal	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda Uji
				udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q
1	4,6	2,397	523,9	1171,5	655	1178,9	2,236	6,701	18,135	59,843	98	938,30	0,074	12431,133	7,4	126,8	0,989
2	4,6	2,397	523,9	1171,5	655	1178,9	2,236	6,701	18,135	59,843	110	1048,94	0,1089	9443,241	10,89	96,3	0,985
3	4,6	2,397	519,6	1178,8	665	1184,6	2,269	5,343	16,943	65,472	105	1001,26	0,1131	8679,265	11,31	88,5	0,985
rata-rata	4,6	2,397	522,5	1173,9	658	1180,8	2,247	6,249	17,737	61,719	104	996,17	0,099	10184,55	9,87	103,9	0,986

Komposisi agregat		Bulk	APP
Komposisi agregat		Bulk	APP
BP 3/4"	20	2,437	2,505
BP 1/2"	15	2,712	2,420
Pasir	10	2,734	2,605
Abu batu	25	2,758	2,540
RAP >9,5	7	2,403	2,502
RAP 9,5-4	10	2,737	2,915
RAP <4		2,430	

$$\begin{aligned}
 \text{Gsb} &= \frac{100}{20} \times \frac{15}{2,437} \times \frac{10}{2,734} \times \frac{25}{2,758} \times \frac{7}{2,403} \times \frac{10}{2,737} \times \frac{13}{2,430} = 2,606 \\
 \text{Gsa} &= \frac{100}{20} \times \frac{15}{2,505} \times \frac{10}{2,420} \times \frac{25}{2,605} \times \frac{7}{2,502} \times \frac{10}{2,915} \times \frac{13}{2,295} = 2,515 \\
 \text{Gse} &= \frac{2,606}{2} = 2,561 \\
 \text{Gs Aspal} &= 1,03 \\
 \text{Kalibrasi} &= 9,681
 \end{aligned}$$



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

REKAPITULASI KADAR ASPAL

nomor benda uji	kadar aspal	NRL	BJ maks campuran	isi benda uji	Berat (gram)			BJ Bulk campuran	rongga udara (VIM)	rongga dalam min agg (VMA)	rongga terisi aspal (VFB)	stabilitas		kelelahan plastis	hasil bagi maksimal	Flow	Hasil (MQ)	Koreksi Benda
					udara	dalam air	SSD					dibaca strip	disesuaikan					
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r
1	4,6	0%	2,397	511,0	1176,20	672	1182,67	2,302	3,963	15,732	72,198	108	1034,44	0,036	28300,4	3,61	288,66	0,986
2	4,6	3%	2,397	522,9	1179,23	660	1182,93	2,255	5,905	17,436	63,261	109	1043,96	0,103	9945,0	10,3	101,44	0,986
3	4,6	5%	2,397	522,5	1173,93	658	1180,80	2,247	6,249	17,737	61,719	104	996,17	0,099	10184,5	9,87	103,88	0,986

MIN.3-5 MIN.14 MIN. 65 MIN. 1000 MIN. 2-4 MIN. 250

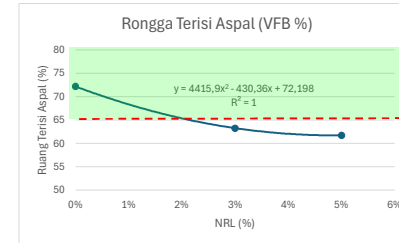
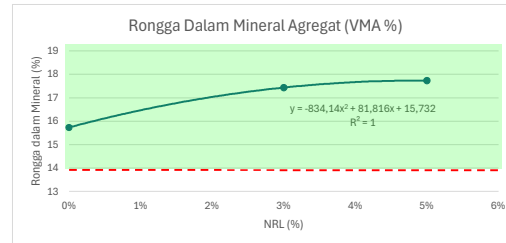
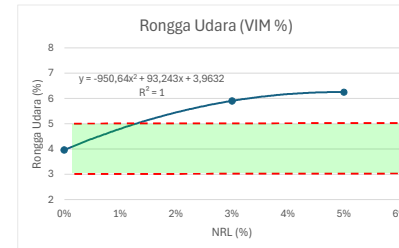
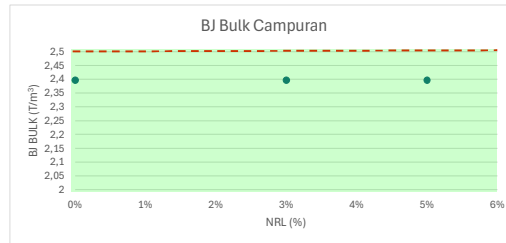
Parameter Marshall	Spesifikasi
BJ Bulk Campuran	maks. 2,5 T/m ³
Rongga Udara (VIM)	3-5%
Rongga dalam Agregat (VMA)	min. 15
Rongga Terisi Aspal (VFB)	min. 65
Stabilitas	min. 800
Flow	2-4 mm
Marshall Quotient	min. 250

Kadar Aspal	NRL	BJ Bulk Campuran
4,6	0%	2,302
4,6	3%	2,255
4,6	5%	2,247

Kadar Aspal	NRL	Rongga Udara (VIM)
4,6	0%	3,963
4,6	3%	5,905
4,6	5%	6,249

Kadar Aspal	NRL	Rongga dalam Agregat
4,6	0%	15,732
4,6	3%	17,436
4,6	5%	17,737

Kadar Aspal	NRL	Rongga Terisi Aspal
4,6	0%	72,198
4,6	3%	63,261
4,6	5%	61,719



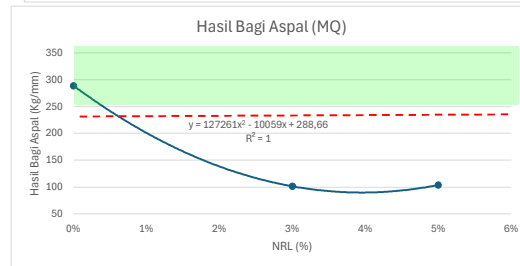
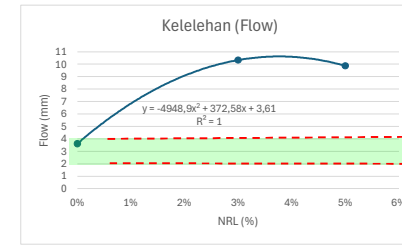
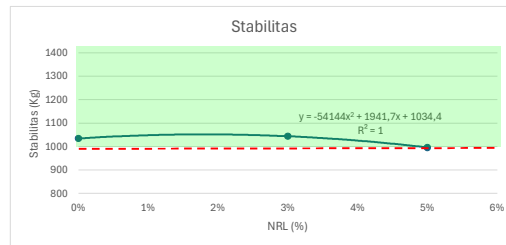


KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

Kadar Aspal	NRL	Stabilitas
4,6	0%	1034,44
4,6	3%	1043,96
4,6	5%	996,17

Kadar Aspal	NRL	Flow
4,6	0%	3,610
4,6	3%	10,333
4,6	5%	9,867

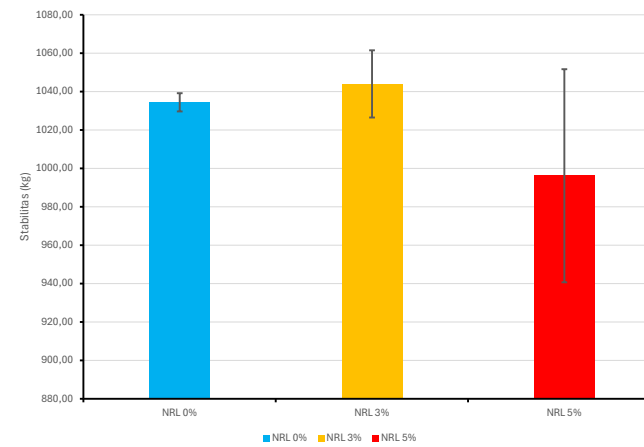
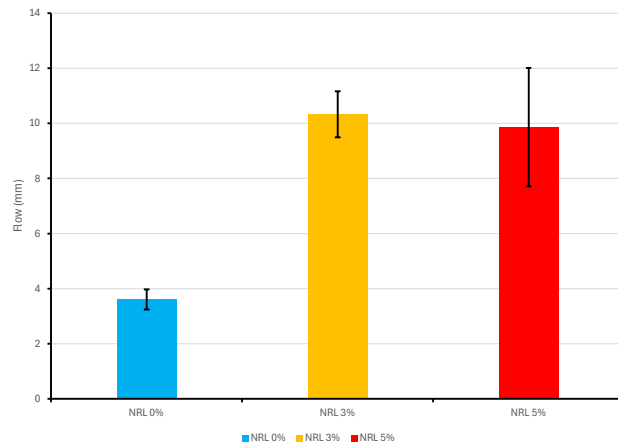
Kadar Aspal	NRL	Marshall Quotient
4,6	0%	288,66
4,6	3%	101,44
4,6	5%	103,88





KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

	Flow	Stabilitas	standar stdev flow	sidev stabilitas
NRL 0%	3,61	1034,44	0,363456	4,779869
NRL 3%	10,33333	1043,96	0,83865	17,53753
NRL 5%	9,866667	996,165	2,146493	55,49274



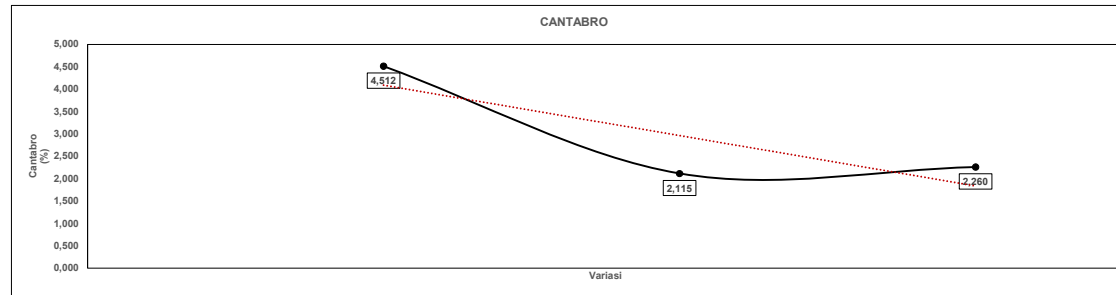


KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

PENGUJIAN CANTABRO
KETAHANAN AUS TERHADAP LEPAS BUTIRAN

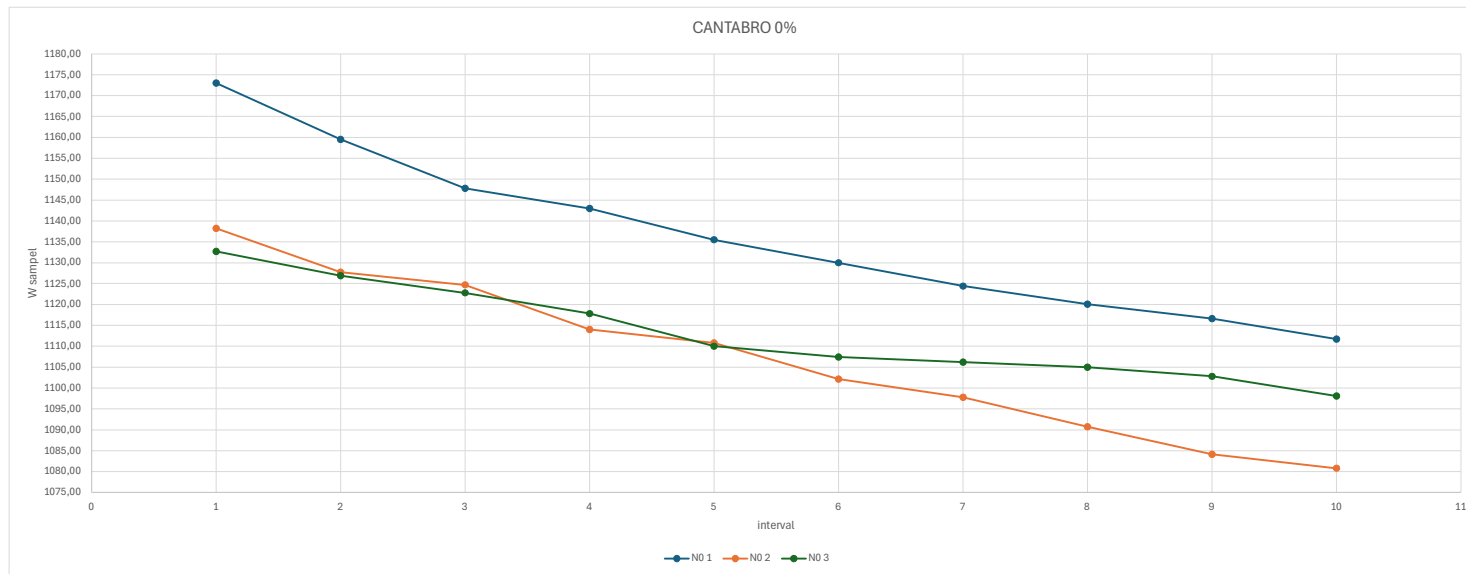
No	Variasi	orde Samp	W _{c0}	W _{c30}	W _{c60}	W _{c90}	W _{c120}	W _{c150}	W _{c180}	W _{c210}	W _{c240}	W _{c270}	W _{c300}	W _{Loss}	Cantabro
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(l)	(m)	(n)	(o)	(p)
1	NRL 0%	NO 1	1173,00	1159,50	1147,80	1143,00	1135,50	1130,00	1124,40	1120,10	1116,60	1111,70	1111,70	61,30	5,23
		NO 2	1138,20	1127,70	1124,70	1114,00	1110,80	1102,10	1097,80	1090,70	1084,10	1080,80	1080,80	57,40	5,04
		NO 3	1132,70	1126,90	1122,80	1117,80	1110,00	1107,40	1106,20	1105,00	1102,80	1098,10	1095,70	37,00	3,27
		Rata-rata													
2	NRL 3%	N3	1151,30	1149,70	1146,30	1140,20	1135,10	1131,20	1129,10	1127,30	1125,40	1122,00	1120,10	31,20	2,71
		N3	1148,00	1147,30	1145,20	1141,70	1137,20	1135,10	1131,80	1128,90	1126,10	1125,00	1124,80	23,20	2,02
		N3	1139,20	1138,00	1136,00	1135,30	1134,20	1132,10	1130,00	1128,40	1125,40	1122,10	1120,80	18,40	1,62
		Rata-rata													
3	NRL 5%	N5	1136,10	1135,40	1133,20	1130,10	1127,20	1125,60	1124,20	1122,00	1120,90	1120,00	1119,00	17,10	1,51
		N5	1140,00	1137,20	1135,90	1133,20	1130,30	1126,00	1124,10	1120,30	1118,80	1114,20	1112,50	27,50	2,41
		N5	1138,60	1137,20	1135,30	1130,20	1127,60	1122,30	1120,20	1117,30	1114,20	1110,10	1106,00	32,60	2,86
		Rata-rata													

NRL 0%	4,512
NRL 3%	2,115
NRL 5%	2,260

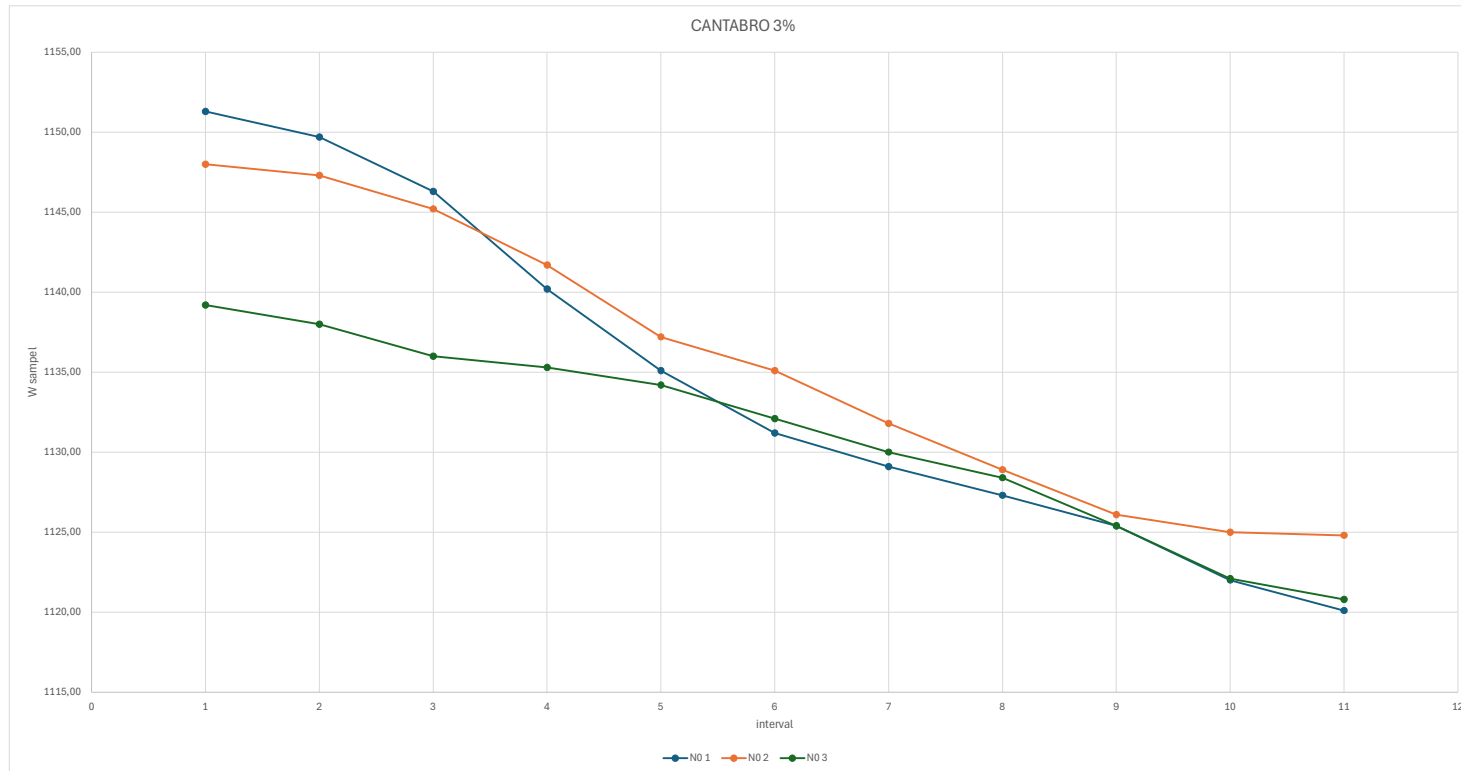




KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

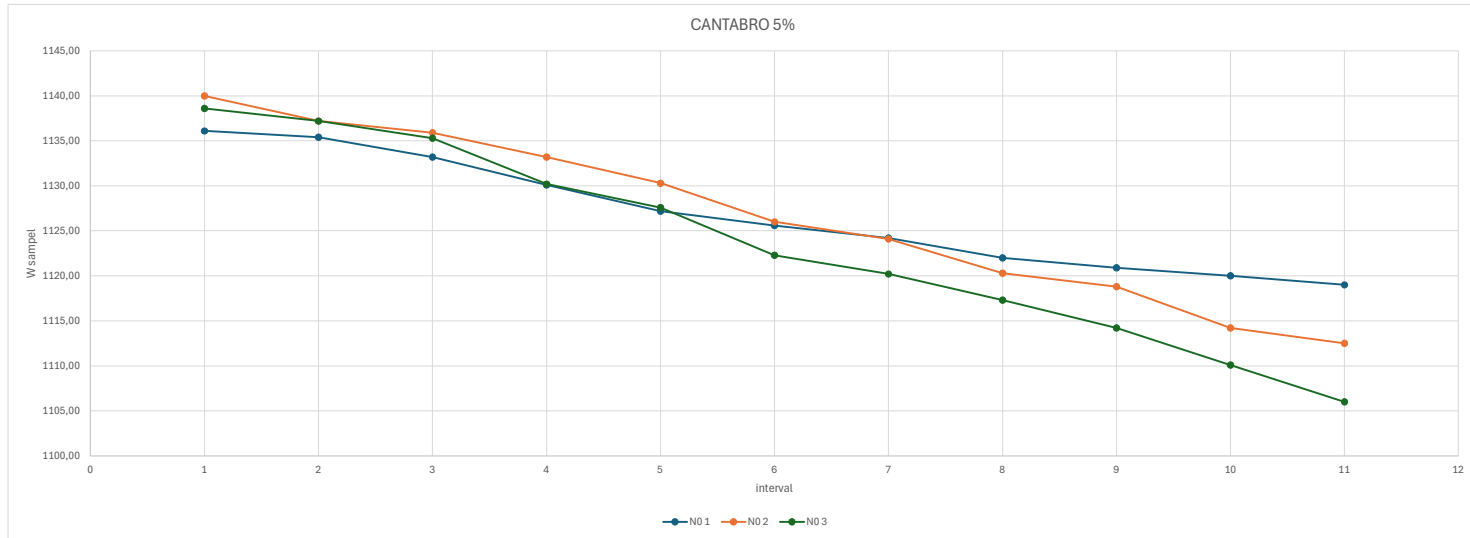


KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI



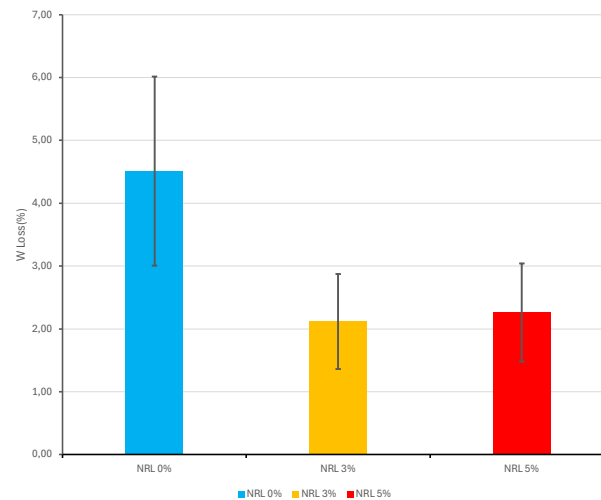
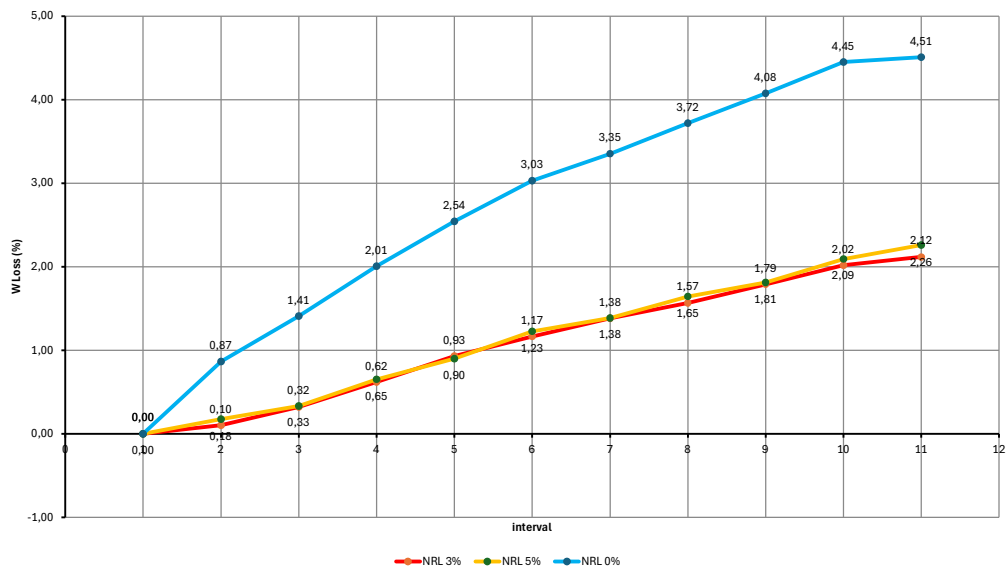


KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI





KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI





KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

ASPAL KONVENSIONAL				
Material	%	Berat	Harga Satuan	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20%	275,04	Rp320	Rp88,01
Agregat 1/2"	40%	424,02	Rp365	Rp154,77
Pasir	10%	332,34	Rp276	Rp91,73
Abu Batu	30%	114,60	Rp172	Rp19,71
Aspal	5,9	54,00	Rp12.100	Rp653,40
TOTAL BIAYA		1200		Rp1.007,62

NRL 0%				
Material	% Material	Massa (gram)	Harga Satuan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	55,2	Rp12.100	Rp668
TOTAL BIAYA		1200		Rp884,69



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

NRL 3%				
Material	% material	massa	Harga	total Harga
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	53,544	Rp12.100	Rp647,88
NRL	3	1,656	Rp23.900	Rp39,58
TOTAL BIAYA		1200		Rp904,23

NRL 5%				
Material	% material	massa (gram)	Harga Satunan Dasar (Rp)/(Kg)	total Harga (Rp)
Agregat 3/4"	20	228,96	Rp320	Rp73,27
Agregat 1/2"	15	171,72	Rp365	Rp62,68
Pasir	10	114,48	Rp276	Rp31,60
Abu Batu	25	286,2	Rp172	Rp49,23
RAP >9,5	7	80,136	Rp0	Rp0
RAP 9,5-4	10	114,48	Rp0	Rp0
RAP <4	13	148,824	Rp0	Rp0
Aspal	4,6	52,44	Rp12.100	Rp634,52
NRL	5	2,76	Rp23.900	Rp65,96
TOTAL BIAYA		1200		Rp917,26



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEKOLAH VOKASI
TEKNIK INFRASTRUKTUR SIPIL DAN PERANCANGAN ARSITEKTUR
LABORATORIUM TRANSPORTASI

JENIS ASPAL	BERAT (gr)	Harga (Rp /gr)	Konversi Ton	Harga (Rp/ton)
Konvensional	1200	Rp1.007,62	0,8333333	Rp839,681
RAP+NRL 0%	1200	Rp884,69	0,8333333	Rp737,240
RAP+NRL 3%	1200	Rp904,23	0,8333333	Rp753,524
RAP+NRL 5%	1200	Rp917,26	0,8333333	Rp764,380

