

TUGAS AKHIR

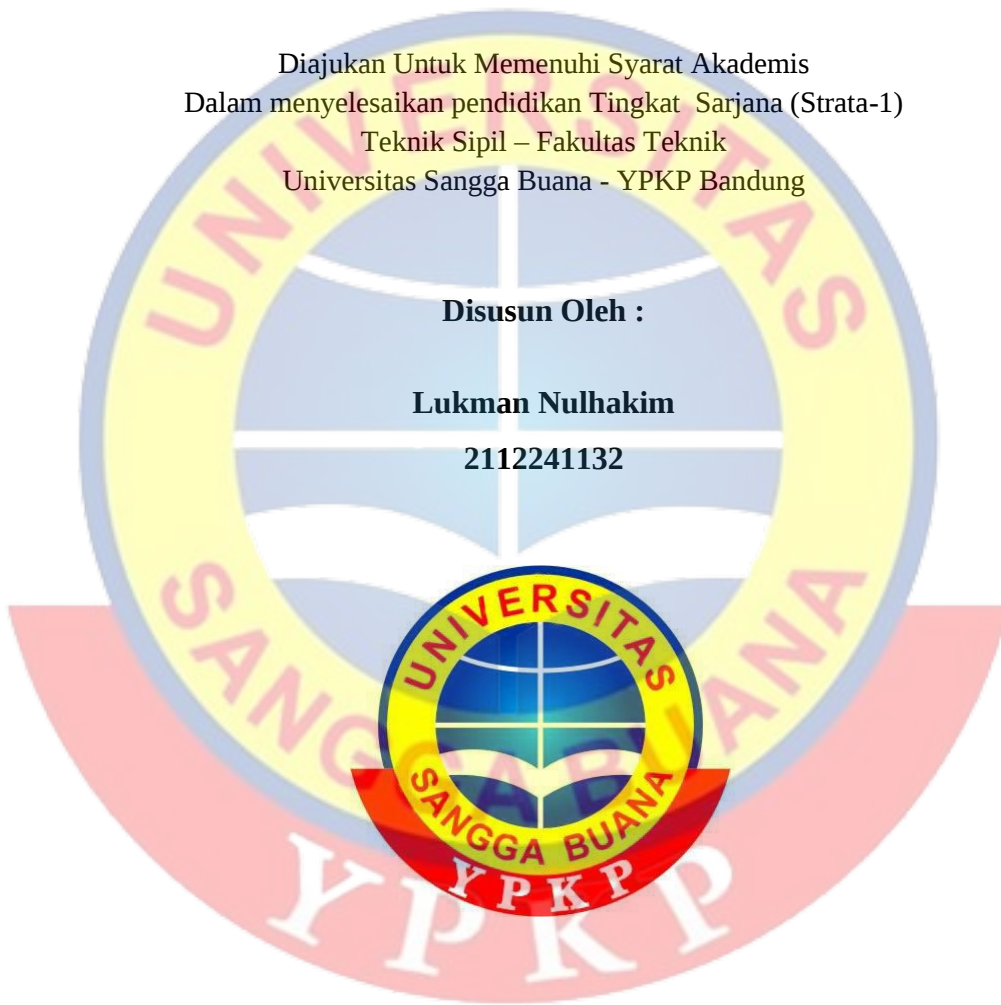
ANALISIS PENGARUH FILLER SEMEN TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL AC – WC MENGGUNAKAN LATEK ALAM (*NATURAL RUBBER LATEX – NR*)

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Akademis
Dalam menyelesaikan pendidikan Tingkat Sarjana (Strata-1)
Teknik Sipil – Fakultas Teknik
Universitas Sangga Buana - YPKP Bandung

Disusun Oleh :

Lukman Nulhakim

2112241132



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SANGGA BUANA (YPKP)
BANDUNG
2026**

LEMBAR PENGESAHAN & PERSETUJUAN
TUGAS AKHIR

**ANALISIS PENGARUH FILLER SEMEN
TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL
AC – WC MENGGUNAKAN LATEK ALAM
(*NATURAL RUBBER LATEX – NR*)**

Disusun Oleh :

Nama : Lukman Nulhakim

NPM : 2112241132

Naskah Tugas Akhir ini diperiksa dan disetujui sebagai kelengkapan persyaratan kelulusan, guna memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.

Menyetujui & Mengesahkan,

Dosen Pembimbing

Universitas Sangga Buana YPKP

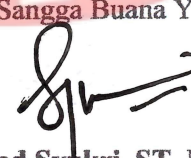

Muhammad Syukri, ST. MT

NIK.432.200.200

Mengetahui :

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Universitas Sangga Buana YPKP


Muhammad Syukri, ST. MT

NIK.432.200.200

**LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS PENGARUH FILLER SEMEN
TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL
AC – WC MENGGUNAKAN LATEK ALAM
(*NATURAL RUBBER LATEX – NR*)**

Disusun Oleh:

Lukman Nulhakim

2112241132

Naskah Tugas Akhir Ini Diperiksa Dan Disetujui Sebagai Kelengkapan Persyaratan Kelulusan, Guna Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Sipil Pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.

Mengetahui:

Disetujui Oleh:
Dosen Penguji 1



Ir. Doni Romdhoni Witarsa, ST., MT., IPM.
NIP. 432.200.226

Disetujui Oleh:
Dosen Penguji 2



Dea Yunita Sari, ST., MT.
NIK. 432.200.241

Ketua Program Studi Teknik Sipil
Universitas Sangga Buana YPKP



Muhammad Syukri, ST., MT.
NIK : 432.200.200

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya menyatakan bahwa tugas akhir yang berjudul “*ANALISIS PENGARUH FILLER SEMEN TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL AC – WC MENGGUNAKAN LATEK ALAM (NATURAL RUBBER LATEX – NR)*” ini sepenuhnya karya saya sendiri. Tidak ada bagian didalamnya yang merupakan plagiat dari karya orang lain dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika keilmuan yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, Saya siap menanggung resiko / sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila kemudian ditemukan adanya pelanggaran terhadap etika keilmuan dalam karya saya ini, atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Bandung, Februari 2026

Pembuat pernyataan,



Lukman Nulhakim

2112241132

=====

**ANALISIS PENGARUH FILLER SEMEN
TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL
AC – WC MENGGUNAKAN LATEK ALAM
(*NATURAL RUBBER LATEX – NR*)**

Oleh

Lukman Nulhakim

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik

© Lukman Nulhakim 2026

Universitas Sangga Buana - YPKP

2026

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,
dengan dicetak ulang, difoto kopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh modifikasi ganda (*dual modification*) pada campuran aspal *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC–WC). Modifikasi dilakukan menggunakan modifikator *binder* lateks alam (*Natural Rubber – NR*) sebesar 5% secara konstan terhadap berat aspal penetrasi 60/70 , serta variasi kadar *filler* semen Portland sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4% terhadap berat total campuran. Metode eksperimen laboratorium diawali dengan penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) melalui metode *Bar Chart* yang menghasilkan nilai 5,32%. Selanjutnya, pengujian karakteristik mekanis dan volumetrik benda uji dilakukan menggunakan pengujian *Marshall* konvensional dengan pemadatan 2×75 tumbukan untuk mensimulasikan kondisi lalu lintas berat.

Hasil pengujian *Marshall* menunjukkan bahwa variasi kadar *filler* semen memberikan pengaruh signifikan yang fluktuatif terhadap struktur internal campuran. Kondisi paling optimal dicapai pada variasi kadar *filler* semen 3%. Pada titik ini, campuran menghasilkan nilai stabilitas tertinggi sebesar 227 kg dan nilai *Marshall Quotient* (MQ) maksimum sebesar 48,30 kg/mm. Hasil tersebut mengindikasikan terjadinya penguncian antar agregat (*interlocking*) dan kekakuan yang paling efektif akibat pengisian rongga mikro oleh partikel semen di dalam matriks aspal-lateks yang elastis. Sebaliknya, peningkatan kadar *filler* hingga 4% justru menurunkan nilai stabilitas menjadi 162 kg akibat terganggunya keseimbangan gradasi. Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan adanya batas optimal dalam sistem modifikasi ganda ini, di mana kadar semen 3% menjadi komposisi terbaik untuk menghasilkan kekuatan struktural yang seimbang.

Kata Kunci: AC–WC, Lateks Alam (NR), *Filler* Semen, Karakteristik *Marshall*, Modifikasi Aspal.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of dual modification on the mechanical and volumetric properties of Asphalt Concrete – Wearing Course (AC–WC) mixtures. The modification was carried out using a constant 5% natural rubber latex (NR) modifier by weight of asphalt penetration 60/70 combined with varying Portland cement filler contents of 1%, 2%, 3%, and 4% by total weight of the mixture. The laboratory experimental method initiated with determining the Optimum Asphalt Content (OAC) using the Bar Chart method, which yielded a value of 5.32%. Subsequently, the specimens were evaluated using the conventional Marshall Test with 2×75 compaction blows to simulate heavy traffic conditions.

The Marshall test results indicated that varying the cement filler content exerted a significant yet fluctuated influence on the internal structure of the mixture. The most optimal condition was achieved at a 3% cement filler content. At this point, the mixture attained the highest stability value of 227 kg and a maximum Marshall Quotient (MQ) of 48.30 kg/mm. These findings signify the most effective aggregate interlocking and structural stiffness driven by the micro-void filling mechanism of cement particles within the elastic asphalt-latex matrix. Conversely, increasing the filler content to 4% degraded the stability to 162 kg due to the disruption of aggregate gradation equilibrium. Overall, this study confirms that the strengthening effect of the active filler has a definitive threshold in this dual-modification system, positioning the 3% cement content as the optimum formulation for balanced structural performance.

Keywords: AC–WC, Natural Rubber (NR), Cement Filler, Marshall Characteristics, Asphalt Modification.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang merupakan sumber dari segala ilmu pengetahuan, penabur cahaya ilham dan sumber segala kebenaran yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas akhir ini yang berjudul **“ANALISIS PENGARUH FILLER SEMEN TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN ASPAL AC – WC MENGGUNAKAN LATEK ALAM (NATURAL RUBBER LATEX – NR)”**.

Penulis menghaturkan banyak terima kasih yang setulus-tulusnya kepada semua pihak yang telah membantu, tanpa mereka penulisan ini tidak akan terlaksana dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Didin Saepudin, SE., M.Si, selaku Rektor Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
2. Dr. Teguh Nurhadi Suharno, MT, selaku Wakil Rektor I Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
3. Dr. Bambang Susanto, SE., M.Si, selaku Wakil Rektor II Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
4. Dr. Nurhaeni Sikki, S.AP., M.AP. selaku Wakil Rektor III Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
5. Slamet Risnanto, S.T., M.Kom., Phd., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung
6. Muhammad Syukri ST, M.T, selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil dan Selaku Pembimbing Kerja Praktik Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung.
7. Segenap dosen, staff Program Studi Teknik Sipil, dan staff Laboratorium Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP - Bandung, yang selalu membantu dalam informasi dan kebutuhan penelitian selama menyelesaikan Tugas akhir ini.
8. Kedua Orang Tua yang telah memberikan motivasi, bimbingan dan arahan serta dorongan baik moril, spiritual, maupun materil.
9. Akhir ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu namanya.

Penulis menyadari Tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna, tetapi bagaimanapun kita hanyalah manusia yang tak kan luput dari kesalahan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang dapat membangun dengan jiwa besar akan penulis terima dengan baik sebagai bahan pemikiran dan perbaikan. Semoga Tugas akhir ini dapat berguna bagi penulis pada khususnya dan semua pihak yang berkepentingan dengan penulis Tugas akhir ini.

Bandung, 2026

Lukman Nulhakim



DAFTAR ISI

ABSTRAK

ABSTRACT

KATA PENGANTAR..... i

DAFTAR ISI..... iii

DAFTAR TABEL vi

DAFTAR GAMBAR..... vii

BAB I PENDAHULUAN..... 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Rumusan Masalah 2

1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian..... 3

1.3.1. Maksud Penelitian..... 3

1.3.2. Tujuan 3

1.4. Batasan Masalah..... 3

1.5. Manfaat Penelitian..... 4

1.6. Sistematika Penulisan..... 5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... 7

2.1 Permasalahan Kinerja Lapis Aus (AC-WC) di Iklim Tropis 7

2.1.1 Kegagalan Deformasi (Membutuhkan Stabilitas)..... 8

2.1.2 Kegagalan Retak (Membutuhkan Fleksibilitas)..... 8

2.1.3 Paradoks Desain Campuran AC-WC 9

2.2 Strategi Modifikasi Ganda: Sinergi Material Elastis dan Aktif 9

2.3 Filler Semen sebagai Pengisi Aktif (*Active Filler*) 11

2.3.1 Peran Ganda *Filler*: Pengisi Fisik vs. Pengikat Hidrolik 11

2.3.2 Karakteristik Hidrolik Semen Portland sebagai *Filler*..... 12

2.3.3 Potensi Peningkatan Stabilitas dan Adhesi 12

2.4 Lateks Alam (NR) sebagai Modifikator Elastomerik..... 13

2.4.1 Sifat Elastis Polimer *cis-1,4-polyisoprene* 13

2.4.2 Mekanisme Modifikasi *Binder* Aspal 14

2.4.3 Interaksi Sinergis: Keseimbangan Kekakuan (Semen) dan Fleksibilitas (Lateks)..... 15

2.5 Material Dasar dan Standar Campuran..... 16

2.5.1	Aspal Penetrasi 60/70 (Sebagai <i>Binder</i> Dasar)	16
2.5.2	Agregat (Kasar dan Halus)	17
2.5.3	Spesifikasi Gradasi Agregat Gabungan AC-WC	18
2.6	Metode Evaluasi Kinerja (Standar Uji Marshall)	18
2.6.1	Standar Acuan Kinerja (Spesifikasi Bina Marga Modifikasi)	19
2.6.2	Analisis Parameter Kekuatan (Stabilitas & <i>Marshall Quotient</i>). 21	
2.6.3	Analisis Parameter Fleksibilitas (Kelelehan / <i>Flow</i>)	21
2.6.4	Analisis Parameter Durabilitas (VIM, VMA, VFA)	21
2.7	Penelitian Terdahulu dan Justifikasi Kesenjangan	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		25
3.1	Diagram Alir	25
3.2	Deskripsi Penelitian	26
3.3	Lokasi dan Waktu Penelitian	26
3.4	Langkah Penelitian	26
3.5	Persiapan Bahan dan Peralatan	27
3.5.1	Persiapan Bahan	27
3.5.2	Persiapan Peralatan	27
3.6	Pengujian Aspal	28
3.7	Pengujian Agregat	29
3.7.1	Agregat Halus	30
3.7.2	Agregat Kasar	30
3.8	Perencanaan campuran	30
3.9	Pembuatan Benda Uji	31
3.10	Pengujian dengan Alat Marshall	32
3.11	Berat Jenis Aspal	33
3.12	Daktilitas	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		34
4.1	Persiapan Material	34
4.2	Hasil Pengujian Bahan	36
4.2.1	Pengujian Agregat	36
4.3	Hasil Perhitungan Kombinasi	43
4.4	Pengujian Berat Jenis Campuran Aspal Komposisi Normal	47

4.5	Pengujian Kadar Aspal dan Ekstraksi (SNI 03-3640-1994)	48
4.6	Pembuatan Benda Uji	52
4.7	Pemeriksaan Berat Jenis Campuran (GMM) Pada Aspal Modifikasi	53
4.8	Hasil Pemeriksaan Marshall Test	54
4.9	Rekapitulasi Hasil Marshall Test	56
BAB V PENUTUP.....		57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....		58



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Persyaratan Agregat Kasar untuk AC-WC	17
Tabel 2. 2 Persyaratan Agregat Halus untuk AC-WC	17
Tabel 2. 3 Spesifikasi Gradasi Agregat Gabungan untuk AC-WC.....	18
Tabel 2. 4 Ketentuan Sifat Campuran Laston (AC) untuk Lalu Lintas Rencana 1-10 Juta ESA	20
Tabel 2. 5 Ketentuan Sifat Campuran Laston Dimodifikasi (AC Modified) untuk Lalu Lintas Rencana > 10 Juta ESA.....	20
Tabel 2. 7 Penelitian Terdahulu Terkait Modifikasi Lateks dan Filler	23
Tabel 4. 1 Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2).....	35
Tabel 4. 2 Hasil Penelitian Sifat Fisik dan Mekanis Agregat Kasar.....	37
Tabel 4. 3 Hasil Penelitian Sifat Fisik dan Mekanis Agregat Halus.....	37
Tabel 4. 4 Hasil Analisis Pembagian Butiran	39
Tabel 4. 5 Hasil Analisis Pembagian Butiran	40
Tabel 4. 6 Hasil Analisis Pembagian Butiran	41
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Aspal Pertamina Pen 60/70	42
Tabel 4. 8 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 1%	43
Tabel 4. 9 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 2%	44
Tabel 4. 10 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 3%	45
Tabel 4. 11 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 4%	46
Tabel 4. 12 Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum komposisi Normal .	47
Tabel 4. 13 Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum komposisi Normal .	48
Tabel 4. 14 Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum komposisi Normal .	49
Tabel 4. 15 Tabel Rekapitulasi Hasil Marshall.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi Tipe Kerusakan Umum pada Perkerasan Aspal	7
Gambar 2. 2 Diagram Konseptual Strategi Modifikasi Ganda	10
Gambar 2. 3 Perbandingan Mekanisme Filler Pasif (Inert) vs. Filler Aktif (Hidrolik) .	11
Gambar 2. 4 Material Filler Semen Portland Tipe I.....	12
Gambar 2. 5 Struktur Kimia cis-1,4-polyisoprene	14
Gambar 2. 6 Diagram Skematik Mekanisme Modifikasi Aspal-Lateks	15
Gambar 2. 7 Material Dasar Aspal Pen 60/70	16
Gambar 2. 8 Alat Uji <i>Marshall</i>	19
Gambar 2. 9 Diagram Fase Volumetrik Campuran Aspal	22
Gambar 3. 1 Diagram Alir	25



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkerasan jalan di Indonesia, khususnya pada lapisan aus (*Asphalt Concrete–Wearing Course/AC–WC*), menghadapi tantangan teknis serius akibat beban lalu lintas berat dan iklim tropis yang ekstrem. Permasalahan umum seperti deformasi plastis, retak dini, dan penurunan umur layanan menuntut adanya inovasi dalam desain campuran aspal untuk meningkatkan fleksibilitas dan durabilitasnya.

Salah satu pendekatan yang telah terbukti efektif adalah modifikasi *binder* aspal menggunakan lateks alam (*Natural Rubber Latex – NR*). Sebagai bahan aditif elastomerik, lateks alam mampu meningkatkan elastisitas dan ketahanan campuran. Penelitian oleh Widiyanto & Faishal (2021) menunjukkan bahwa penambahan NR sebesar 5% dapat meningkatkan stabilitas Marshall secara signifikan. Hal ini menjadi landasan bahwa penggunaan lateks alam adalah langkah yang tepat untuk menciptakan *binder* berkinerja tinggi.

Di sisi lain, inovasi pada komponen *filler* juga memegang peranan krusial. *Filler* semen mulai mendapat perhatian sebagai alternatif karena memiliki ukuran partikel halus dan sifat hidrolis aktif. Berbeda dengan *filler* pasif, semen dapat bereaksi secara kimiawi, yang berpotensi meningkatkan kepadatan, memperkuat adhesi, dan memperbaiki kekedapan campuran terhadap air. Studi oleh Ramadhan et al. (2023) juga mengindikasikan bahwa penggunaan *filler* semen memang dapat memperbaiki kekedapan dan stabilitas campuran aspal.

Namun, sebuah kesenjangan penelitian yang fundamental muncul: ketika *binder* aspal telah diperkuat menjadi lebih elastis oleh lateks, bagaimana interaksi optimalnya dengan *filler* yang aktif secara kimia seperti semen? Sebagian besar studi masih bersifat parsial, menguji lateks dan semen secara terpisah. Belum ada kajian yang secara sistematis menentukan kadar optimum *filler* semen dalam sebuah matriks aspal-lateks. Kadar semen yang tidak tepat terlalu sedikit atau terlalu banyak dapat mengganggu keseimbangan antara kekuatan dan fleksibilitas yang diberikan oleh lateks.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengisi kesenjangan tersebut. Fokus utama penelitian adalah untuk menganalisis pengaruh variasi kadar *filler* semen (1%, 2%, 3%, dan 4%) terhadap karakteristik Marshall pada campuran AC–WC, yang *binder*-nya telah dimodifikasi secara konstan dengan lateks alam. Penelitian ini diharapkan dapat menemukan formulasi campuran modifikasi ganda yang paling optimal, seimbang, dan adaptif terhadap kondisi di Indonesia.

1.2. Rumusan Masalah

Dalam upaya meningkatkan kualitas perkerasan jalan di Indonesia, modifikasi campuran aspal menjadi fokus utama. Dua pendekatan inovatif yang menjanjikan adalah penggunaan lateks alam (NR) untuk meningkatkan fleksibilitas *binder*, dan penggunaan *filler* semen untuk memperkuat matriks campuran. Sejumlah penelitian terdahulu telah mengonfirmasi potensi kedua material ini, namun seringkali secara terpisah, sehingga membuka pertanyaan baru terkait interaksi keduanya.

Penelitian oleh Widiyanto & Faishal (2021) dan Universitas Jenderal Soedirman (2022) telah membuktikan bahwa penambahan lateks alam secara signifikan meningkatkan stabilitas Marshall. Di sisi lain, studi oleh Ramadhan et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan *filler* semen juga mampu memperbaiki kekedapan dan stabilitas campuran AC–WC. Temuan-temuan ini dengan jelas menetapkan bahwa lateks dan semen adalah material modifikasi yang efektif.

Namun, kesenjangan penelitian yang fundamental muncul ketika kedua inovasi ini digabungkan. Penelitian-penelitian tersebut cenderung belum menjawab pertanyaan: jika *binder* aspal sudah diperkuat menjadi lebih elastis oleh lateks, berapakah kadar *filler* semen yang optimal untuk mencapai sinergi performa maksimal?

Hal ini memunculkan sebuah pertanyaan penelitian yang spesifik: Bagaimana pengaruh variasi kadar *filler* semen (1%, 2%, 3%, dan 4%) terhadap karakteristik mekanis campuran AC–WC yang *binder*-nya telah diperkuat secara konstan dengan lateks alam?

Apakah penambahan kadar *filler* semen akan terus memberikan efek penguatan, atau justru ada titik jenuh di mana campuran menjadi terlalu kaku dan

mengurangi efektivitas sifat elastis dari lateks? Saat ini, belum ada rekomendasi teknis yang spesifik mengenai hal tersebut.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk menjawab kesenjangan tersebut dengan merumuskan pengaruh variasi kadar *filler* semen terhadap karakteristik Marshall, guna menemukan formulasi campuran modifikasi ganda yang paling optimal dan seimbang.

1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian

1.3.1. Maksud Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji secara eksperimental pengaruh variasi kadar *filler* semen terhadap karakteristik campuran aspal AC–WC yang *binder*-nya telah dimodifikasi secara konstan dengan lateks alam. Maksud utamanya adalah untuk menemukan formulasi campuran yang paling seimbang, di mana sifat penguatan dari semen dapat bersinergi secara optimal dengan sifat elastis dari lateks, guna menghasilkan lapisan perkerasan yang unggul secara teknis dan durabilitas.

1.3.2. Tujuan

Secara khusus, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh penggunaan *filler* semen dengan variasi kadar 1%, 2%, 3%, dan 4% terhadap karakteristik Marshall campuran, termasuk parameter stabilitas, *flow*, VIM, VMA, dan VFA.
2. Menentukan kadar *filler* semen yang paling optimal dalam meningkatkan performa mekanis campuran aspal AC–WC yang telah dimodifikasi secara konstan dengan lateks alam.
3. Menyediakan data teknis sebagai dasar rekomendasi untuk pengembangan campuran aspal modifikasi ganda yang adaptif terhadap kondisi di Indonesia.

1.4. Batasan Masalah

Untuk menjaga agar penelitian ini tetap fokus dan terarah, maka ditetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh variasi kadar *filler* semen terhadap karakteristik campuran aspal AC–WC.

2. Variasi kadar *filler* semen yang diuji adalah sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4% terhadap total berat campuran.
3. Modifikasi *binder* menggunakan lateks alam (NR) diterapkan secara konstan pada semua benda uji (misalnya, pada kadar 6% terhadap berat aspal).
4. Jenis aspal yang digunakan adalah aspal penetrasi 60/70.
5. Parameter yang dianalisis terbatas pada karakteristik *Marshall* (Stabilitas, *Flow*, VIM, VMA, VFA, dan MQ).
6. Penelitian ini merupakan studi eksperimental dalam skala laboratorium dan tidak mencakup uji coba lapangan.

Batasan ini ditetapkan untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh bersifat valid, terukur, dan dapat dijadikan dasar untuk penelitian lanjutan yang lebih komprehensif.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi baik secara teoritis maupun praktis dalam pengembangan teknologi perkerasan jalan, dengan rincian sebagai berikut:

1. Menambah referensi ilmiah mengenai interaksi antara *binder* yang dimodifikasi lateks dan *filler* aktif seperti semen, yang kajiannya masih terbatas.
2. Menyediakan data eksperimental baru mengenai pengaruh variasi kadar *filler* semen terhadap karakteristik *Marshall* dalam campuran aspal-lateks.
3. Memberikan rekomendasi teknis mengenai kadar *filler* semen yang optimal untuk menghasilkan campuran AC–WC yang lebih tahan terhadap deformasi dan retak.
4. Mendukung pemanfaatan sumber daya lokal (karet alam) dan material konstruksi yang umum digunakan (semen) secara lebih efektif dan efisien.
5. Berpotensi meningkatkan durabilitas perkerasan jalan, sehingga dapat mengurangi frekuensi pemeliharaan dan menekan biaya siklus hidup (*life-cycle cost*) infrastruktur.

1.6. Sistematika Penulisan

Penulisan laporan penelitian ini disusun secara sistematis yang terdiri dari tiga bab utama, dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menyajikan gambaran umum penelitian yang meliputi Latar Belakang mengenai urgensi modifikasi campuran aspal, Rumusan Masalah yang mengidentifikasi celah penelitian, Maksud dan Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian bagi pengembangan ilmu dan praktik, Batasan Masalah yang mendefinisikan ruang lingkup studi, serta Sistematika Penulisan itu sendiri.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teoretis yang relevan dengan penelitian. Pembahasan mencakup teori mengenai perkerasan jalan, material penyusun seperti aspal dan agregat, karakteristik *filler* semen, sifat lateks alam sebagai bahan modifikasi, serta konsep pengujian Marshall. Bab ini juga menyajikan tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi dasar argumen penelitian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan secara rinci langkah-langkah pelaksanaan penelitian di laboratorium. Bagian ini mencakup Diagram Alir penelitian, deskripsi lokasi dan waktu, persiapan bahan dan alat, prosedur pengujian material awal, perancangan campuran (*mix design*), tahapan pembuatan benda uji dengan variasi kadar *filler* semen, serta prosedur pengujian Marshall untuk mendapatkan dan menganalisis data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan seluruh data yang diperoleh dari hasil pengujian di laboratorium beserta analisis mendalamnya. Pembahasan dimulai dari karakteristik pengujian material awal (aspal, agregat, *filler* semen, dan lateks alam), dilanjutkan dengan perhitungan perencanaan campuran (*mix design*). Selanjutnya, bab ini menyajikan analisis hasil pengujian Marshall pada benda uji, baik untuk campuran konvensional maupun campuran modifikasi dengan variasi kadar *filler* semen dan lateks alam, guna mengevaluasi parameter *stability*, *flow*,

Marshall Quotient (MQ), serta rongga dalam campuran (VIM, VMA, VFB). Bab ini diakhiri dengan pembahasan mengenai perbandingan performa campuran dan penentuan kadar optimum material modifikasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyajikan intisari dari hasil penelitian yang telah dianalisis. Bagian Kesimpulan menjawab secara singkat dan jelas poin-poin yang menjadi tujuan penelitian, khususnya mengenai pengaruh variasi filler semen dan lateks alam terhadap karakteristik campuran aspal. Bagian Saran memuat rekomendasi teknis untuk penerapan hasil penelitian di lapangan serta masukan bagi pengembangan penelitian selanjutnya agar diperoleh hasil yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian ini memuat daftar seluruh referensi, literatur, buku teks, jurnal ilmiah, standar spesifikasi (seperti Spesifikasi Umum Bina Marga), dan regulasi terkait yang digunakan sebagai acuan dalam penyusunan laporan penelitian ini. Penulisan daftar pustaka disusun secara alfabetis mengikuti format standar ilmiah yang ditentukan (misalnya *APA Style* atau *IEEE Style*).

LAMPIRAN

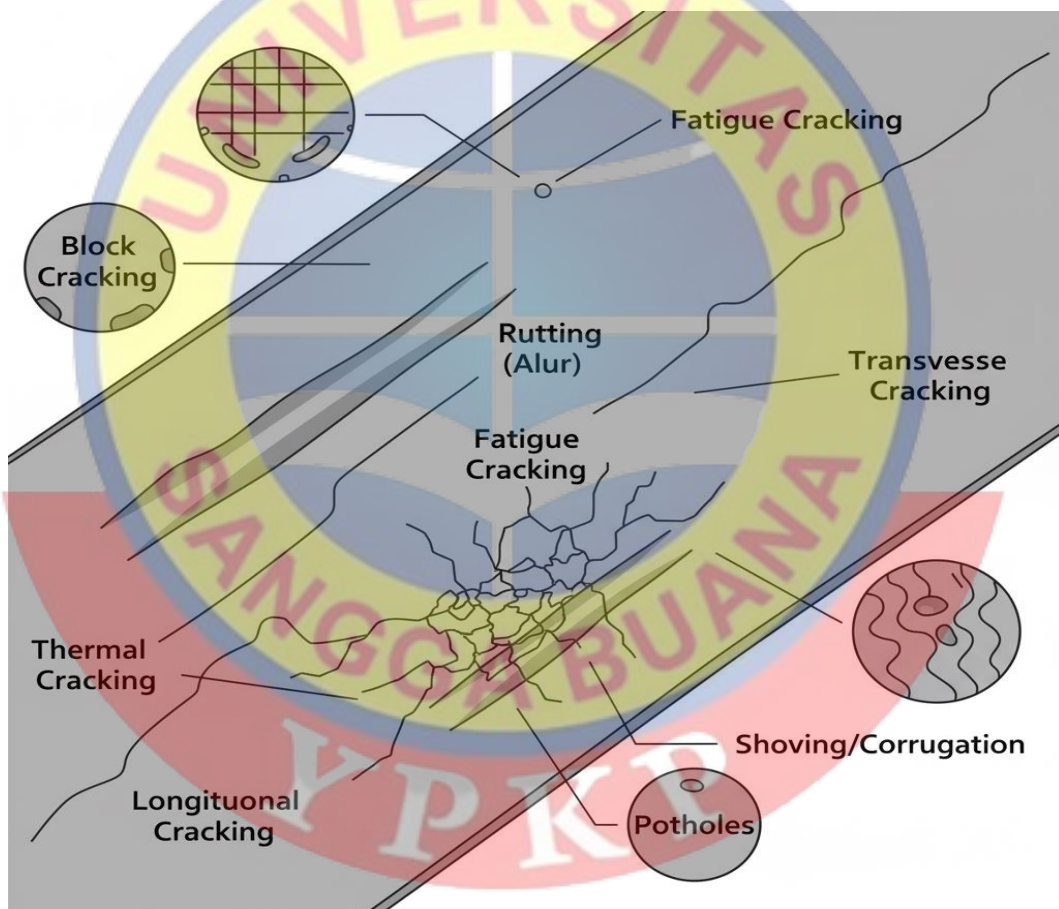
Bagian ini menyajikan data pendukung, dokumen administrasi, dan detail teknis yang tidak dimasukkan dalam bab utama tetapi sangat penting untuk validitas penelitian. Isi lampiran meliputi data mentah hasil pengujian laboratorium (analisis saringan agregat, pengujian penetrasi dan titik lembek aspal, dsb.), lembar kerja (*spreadsheet*) perhitungan uji Marshall, dokumentasi foto kegiatan penelitian di laboratorium, serta surat keterangan telah melakukan pengujian dari kepala laboratorium.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Permasalahan Kinerja Lapis Aus (AC-WC) di Iklim Tropis

Lapis Aus Aspal Beton (*Asphalt Concrete–Wearing Course / AC-WC*) merupakan lapisan teratas perkerasan lentur. Sebagai lapisan permukaan, AC-WC menerima paparan langsung dari dua tantangan teknis paling serius di Indonesia: beban lalu lintas berat (seringkali berlebih atau *overload*) dan iklim tropis yang ekstrem.



Gambar 2. 1 Ilustrasi Tipe Kerusakan Umum pada Perkerasan Aspal

Iklim tropis ditandai dengan temperatur ambien yang tinggi sepanjang tahun, paparan sinar UV yang intens, dan curah hujan tinggi dengan intensitas ekstrem. Kombinasi beban berat dan faktor iklim ini memicu dua jenis kegagalan dini yang saling bertentangan, yang menciptakan sebuah paradoks dalam desain campuran.

2.1.1 Kegagalan Deformasi (Membutuhkan Stabilitas)

Jenis kegagalan ini terjadi ketika campuran aspal menjadi terlalu lunak dan tidak stabil untuk menahan beban.

1. Deformasi Plastis (Rutting / Alur): Suhu lingkungan yang tinggi di iklim tropis dapat melunakkan aspal (bitumen) sebagai bahan pengikat, menurunkan viskositasnya. Ketika dilewati beban lalu lintas berat secara berulang, lapisan perkerasan yang lunak ini akan mengalami deformasi permanen yang tampak sebagai alur (jejak roda).
2. Kerusakan Terkait (Shoving & Bleeding): Panas yang sama juga dapat menyebabkan Shoving (Keriting), di mana material aspal terdorong dan bergelombang (umumnya di area pengereman), dan Bleeding (Pendarahan), di mana bitumen yang melunak terdorong ke permukaan, menciptakan lapisan licin dan mengkilap.

Untuk menahan rutting dan deformasi terkait, campuran aspal dituntut memiliki karakteristik kekakuan (stiffness) dan stabilitas yang tinggi agar tidak berubah bentuk.

2.1.2 Kegagalan Retak (Membutuhkan Fleksibilitas)

Jenis kegagalan ini terjadi ketika campuran aspal menjadi terlalu kaku (getas) dan tidak mampu menahan tegangan yang terjadi.

1. Retak Lelah (Fatigue Cracking): Beban lalu lintas berulang menyebabkan lendutan yang terus-menerus. Di iklim tropis, masalah ini dieksaserbasi oleh curah hujan tinggi. Air hujan meresap melalui retakan minor, melemahkan lapisan pondasi di bawahnya. Pondasi yang jenuh air ini tidak memberikan dukungan yang memadai, sehingga lapisan AC-WC melentur secara berlebihan di bawah beban. Lenturan berulang ini menyebabkan lapisan aspal "lelah" dan retak dalam pola saling terhubung (*alligator cracking*).
2. Retak Termal (Thermal Cracking): Fluktuasi suhu ekstrem antara siang yang sangat panas (aspal memuai) dan malam yang dingin atau hujan deras yang tiba-tiba (aspal menyusut) menyebabkan tegangan internal. Jika aspal terlalu kaku, tegangan ini akan dilepaskan dalam bentuk retak melintang atau memanjang.

3. Kerusakan Terkait (Block Cracking & Potholes): Paparan UV dan panas yang konstan juga mempercepat penuaan (oksidasi) aspal, membuatnya semakin getas dan rentan terhadap Retak Kotak (Block Cracking). Ketika *fatigue cracking* tidak ditangani, air yang "dipompa" oleh roda kendaraan akan menggerus material dan dengan cepat membentuk Lubang (Potholes).

Untuk menahan berbagai jenis retak ini, campuran aspal justru dituntut memiliki karakteristik fleksibilitas atau elastisitas yang tinggi agar dapat menahan lendutan dan pergerakan muai-susut tanpa patah.

2.1.3 Paradoks Desain Campuran AC-WC

Hal ini menciptakan sebuah paradoks fundamental dalam desain campuran untuk iklim tropis: material harus cukup kaku untuk menahan alur (*rutting*) pada suhu tinggi, namun juga harus cukup fleksibel untuk menahan retak (*cracking*) akibat beban berulang dan fluktuasi suhu.

Mencapai keseimbangan optimal antara dua sifat mekanis yang berlawanan ini (stabilitas vs. fleksibilitas) sangat sulit dicapai hanya dengan menggunakan desain campuran konvensional (mengandalkan agregat dan aspal murni). Hal ini membuka kebutuhan mendesak untuk inovasi material, seperti penggunaan aditif atau modifikasi campuran, yang akan dibahas dalam penelitian ini.

2.2 Strategi Modifikasi Ganda: Sinergi Material Elastis dan Aktif

Untuk menjawab paradoks kinerja (kekakuan vs. fleksibilitas) yang dipaparkan pada sub-bab sebelumnya, penelitian modern beralih ke strategi modifikasi ganda. Strategi ini tidak hanya berfokus pada perbaikan satu komponen (misalnya *binder* aspal saja), tetapi melakukan inovasi pada dua komponen material secara bersamaan, yaitu pada *binder* (pengikat) dan *filler* (pengisi).

Penelitian ini mengadopsi strategi modifikasi ganda dengan menggabungkan dua material inovatif yang memiliki fungsi berbeda namun saling melengkapi:

1. Modifikator *Binder* Elastomerik (Lateks Alam): Untuk mengatasi masalah retak dini dan meningkatkan fleksibilitas, *binder* aspal dimodifikasi dengan Lateks Alam (NR). Lateks adalah polimer elastomerik yang telah terbukti mampu meningkatkan elastisitas campuran, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian (Widianto & Faishal, 2021; Universitas Jenderal Soedirman,

2022) yang menemukan peningkatan stabilitas dan MQ dengan penambahan lateks.

2. Modifikator *Filler* Aktif (Semen): Untuk mengatasi masalah deformasi plastis (*rutting*) dan meningkatkan kekuatan, *filler* konvensional diganti dengan Semen. Semen adalah *filler* aktif yang memiliki sifat hidrolik, berpotensi meningkatkan kekakuan, adhesi, dan stabilitas campuran secara signifikan. Klaim ini didukung oleh penelitian (Ramadhan et al., 2023) yang secara spesifik menemukan bahwa *filler* semen mampu meningkatkan kekedapan dan stabilitas pada campuran AC-WC yang menggunakan lateks.

Inti dari penelitian ini adalah untuk mengkaji sinergi dari kedua material tersebut. Penelitian ini bertujuan mencari formulasi optimal di mana sifat fleksibel dari lateks dapat dikombinasikan dengan sifat kaku dari semen untuk menghasilkan satu campuran komposit yang unggul.



Gambar 2. 2 Diagram Konseptual Strategi Modifikasi Ganda

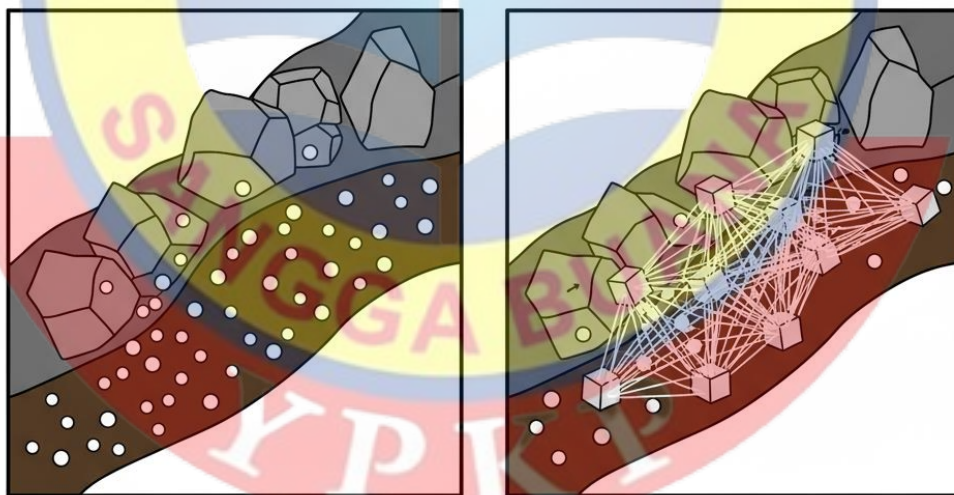
2.3 Filler Semen sebagai Pengisi Aktif (*Active Filler*)

Dalam campuran aspal, *filler* merupakan material mineral halus (lolos saringan No. 200) yang memegang peranan penting dalam menentukan kepadatan, kekedapan, dan stabilitas campuran. Namun, tidak semua *filler* memiliki mekanisme kerja yang sama. Sangat penting untuk membedakan antara *filler* pasif dan *filler* aktif, di mana semen termasuk dalam kategori kedua.

2.3.1 Peran Ganda *Filler*: Pengisi Fisik vs. Pengikat Hidrolik

Secara tradisional, material seperti abu batu atau kapur dianggap sebagai *filler* pasif (*inert*). Fungsi utamanya adalah fisik: mengisi rongga-rongga mikro di antara agregat halus untuk meningkatkan kepadatan dan kekakuan (*stiffness*) campuran.

Di sisi lain, Semen Portland Tipe I, yang digunakan dalam penelitian ini, bertindak sebagai *filler* aktif (hidrolik). Semen tidak hanya berfungsi sebagai pengisi fisik, tetapi juga memiliki peran ganda sebagai bahan pengikat sekunder. Perbedaan mekanisme kerja ini diilustrasikan pada Gambar 2.3.



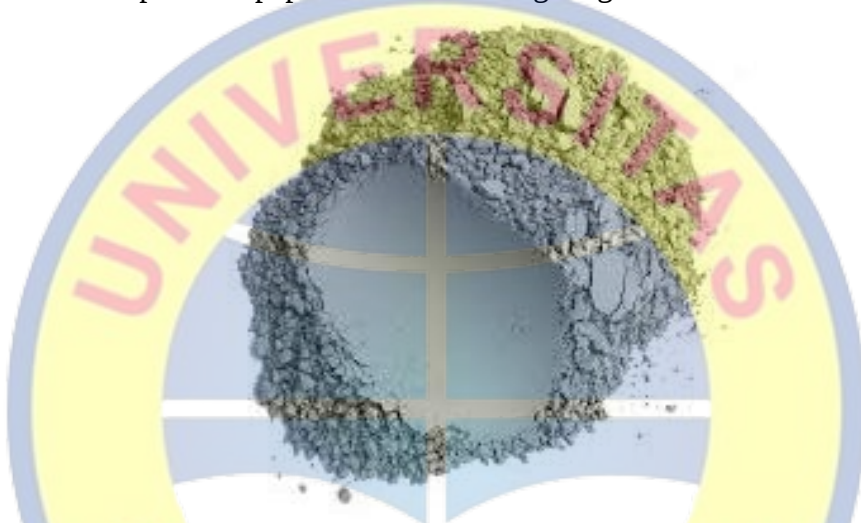
Filler Pasif (Kapur)
Hanya Mengisi Rongga &
Meningkatkan Kepadatan Fisik

Filler Aktif (Semen Portland)
Pengikat Hidrolik & Pengisi Fisik
(Membentuk Jaringan Ikatan Kimia &
Memperkuat Matriks Aspal)

Gambar 2. 3 Perbandingan Mekanisme Filler Pasif (*Inert*) vs. Filler Aktif (*Hidrolik*)

2.3.2 Karakteristik Hidrolik Semen Portland sebagai *Filler*

Keaktifan semen berasal dari komposisi kimianya, terutama senyawa kalsium silikat (C_3S dan C_2S) dan kalsium aluminat (C_3A). Sifat utama dari senyawa-senyawa ini adalah hidrolisis: kemampuan untuk bereaksi secara kimiawi dengan air (bahkan dalam jumlah kecil atau uap air) untuk membentuk ikatan kristal yang kaku dan kuat. Dalam konteks campuran aspal panas, reaksi hidrolik ini mungkin tidak terjadi secara instan, namun berpotensi aktif seiring waktu saat campuran terpapar kelembaban lingkungan.



Gambar 2. 4 Material Filler Semen Portland Tipe I

2.3.3 Potensi Peningkatan Stabilitas dan Adhesi

Sebagai *filler* aktif, penggunaan semen bertujuan untuk memberikan tiga manfaat teknis utama:

1. Peningkatan Stabilitas: Reaksi hidrolik dari semen akan membentuk matriks internal yang lebih kaku di dalam rongga-rongga campuran. Ini secara langsung berpotensi meningkatkan nilai Stabilitas Marshall secara signifikan, yang berkontribusi pada ketahanan terhadap *rutting*.
2. Peningkatan Adhesi (Daya Lekat): Semen dikenal memiliki daya ikat yang sangat tinggi. Secara kimiawi, sebagian besar agregat (batu pecah) bersifat asam (karena kandungan silika yang tinggi), sementara aspal juga cenderung bersifat asam. Ikatan "asam-asam" ini lemah dan rentan terhadap air, menyebabkan kegagalan *stripping* (pelepasan aspal). Semen bersifat Basa (Alkalis). Sifat basa ini membantu menetralkan permukaan agregat yang

asam, menciptakan ikatan kimia yang jauh lebih kuat dan membuat campuran lebih tahan lama terhadap kerusakan akibat air.

3. Peningkatan Kekedapan: Ukuran partikel semen yang sangat halus dikombinasikan dengan sifat hidroliknya membantu mengisi rongga mikro secara lebih efektif. Secara teknis, hal ini diharapkan berkontribusi pada pencapaian nilai VIM (Rongga dalam Campuran) yang lebih rendah dan lebih terkontrol. VIM yang rendah sangat krusial karena mengindikasikan campuran yang lebih padat dan kedap, sehingga infiltrasi air dan udara (yang menyebabkan oksidasi dan penuaan) dapat diminimalkan, yang pada akhirnya meningkatkan durabilitas.

Dalam penelitian ini, *filler* semen adalah variabel utama yang diuji kadarnya (1%, 2%, 3%, dan 4%). Tujuannya adalah untuk menemukan kadar optimal di mana manfaat peningkatan kekakuan dan adhesi ini dapat diperoleh, tanpa membuat campuran menjadi terlalu getas (rapuh).

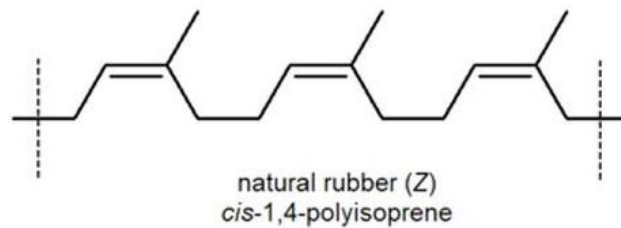
2.4 Lateks Alam (NR) sebagai Modifikator Elastomerik

Setelah membahas peran *filler* aktif (semen) untuk menambah kekakuan, strategi modifikasi ganda ini memerlukan komponen kedua: modifikator *binder* yang berfungsi untuk menambah fleksibilitas dan ketahanan retak. Untuk tujuan inilah Lateks Alam (*Natural Rubber* / NR) digunakan.

2.4.1 Sifat Elastis Polimer *cis*-1,4-*polyisoprene*

Lateks alam adalah suspensi koloid dari getah pohon *Hevea brasiliensis*. Keajaiban teknisnya terletak pada komponen polimer utamanya, yaitu *cis*-1,4-*polyisoprene*. Berbeda dengan polimer kaku lainnya, struktur kimia "*cis*" pada rantai *polyisoprene* ini menyebabkan rantai molekulnya tidak lurus, melainkan "terlipat" atau "tergulung" (*coiled*) dalam keadaan normal.

Sifat terlipat inilah yang memberikan elastisitas fundamental: rantai polimer ini dapat ditarik hingga lurus (meregang) dan akan kembali ke bentuk gulungan aslinya saat tegangan dilepaskan, persis seperti mekanisme kerja karet gelang. Sifat elastis inilah yang telah terbukti mampu meningkatkan kinerja dan fleksibilitas campuran aspal (Widianto & Faishal, 2021).



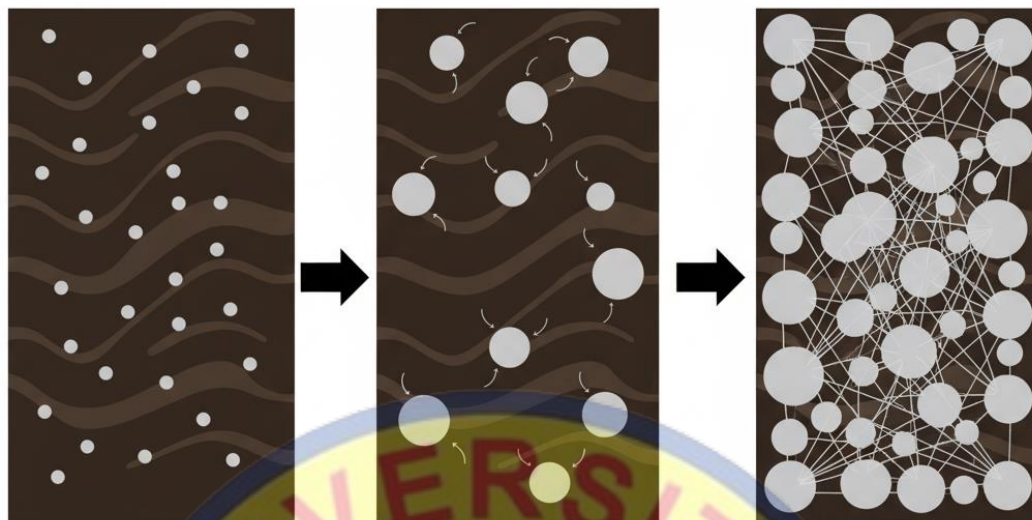
Gambar 2. 5 Struktur Kimia cis-1,4-polyisoprene

2.4.2 Mekanisme Modifikasi *Binder* Aspal

Ketika lateks cair (yang sebagian besar adalah air dan partikel karet) dicampurkan ke dalam aspal panas (150°C – 170°C), terjadi sebuah proses fisis-kimia yang kompleks:

1. **Evaporasi & Dispersi:** Air dalam lateks menguap dengan cepat, meninggalkan partikel-partikel polimer karet (cis-1,4-polyisoprene) yang terdispersi (tersebar) di seluruh matriks aspal.
2. **Pembengkakan (Swelling):** Partikel-partikel polimer ini kemudian mulai menyerap fraksi minyak (fraksi ringan/maltenes) dari aspal. Proses pembengkakan ini memiliki efek ganda: (a) partikel karet membengkak berkali-kali lipat dari ukuran aslinya untuk membentuk jaringan, dan (b) matriks aspal di sekitarnya menjadi sedikit lebih kaku karena kehilangan fraksi ringannya (maltenes) yang telah diserap oleh karet.
3. **Pembentukan Jaringan Polimer:** Seiring dengan pembengkakan dan pencampuran, partikel-partikel polimer yang telah membengkak ini saling bersentuhan dan menyatu, membentuk sebuah jaringan polimer tiga dimensi (3D Polymer Network) yang kontinu dan saling mengunci di dalam matriks aspal.

Hasil akhirnya adalah *binder* yang telah dimodifikasi. Sifatnya berubah dari yang semula viskoelastik (seperti adonan roti, bisa meregang namun tidak kembali sempurna) menjadi jauh lebih elastomerik (seperti karet, bisa meregang dan kembali ke bentuk semula).



1. Dispersi (Partikel Karet dalam Aspal Panas
2. Pembengkakan (Absorpsi Fraksi Fraksi Minyak Aspal
3. Pembentukan Jaringan 3D Polimer Aspal

Gambar 2. 6 Diagram Skematik Mekanisme Modifikasi Aspal-Lateks

2.4.3 Interaksi Sinergis: Keseimbangan Kekakuan (Semen) dan Fleksibilitas (Lateks)

Di sinilah letak hipotesis utama dan keunikan dari penelitian ini, yang menguji interaksi dua material yang tampaknya berlawanan:

1. Di satu sisi: Kita memiliki Semen (dari Sub-bab 2.3) yang bersifat aktif-hidrolik dan bertujuan menambah kekakuan (stiffness) dan stabilitas pada campuran.
2. Di sisi lain: Kita memiliki Lateks (Sub-bab 2.4) yang bersifat elastomerik dan bertujuan menambah fleksibilitas (elasticity) dan ketahanan retak .

Tujuan penelitian ini adalah mencari "titik manis" (sweet spot) dari sinergi kedua material tersebut. Dalam proposal ini, kadar lateks dijaga konstan (misalnya 6%) untuk menciptakan *binder* dasar yang elastis. Kemudian, kadar semen divariasikan (1%, 2%, 3%, 4%) untuk menemukan:

Kadar semen optimal yang dapat memberikan peningkatan stabilitas dan kekakuan yang signifikan, *tanpa* membuat campuran menjadi terlalu kaku (getas) sehingga "mencekik" atau menghilangkan manfaat fleksibilitas yang diberikan oleh jaringan polimer lateks.

Ini adalah justifikasi teknis mengapa variasi kadar semen sangat krusial untuk diteliti dalam matriks aspal-lateks.

2.5 Material Dasar dan Standar Campuran

Selain dua komponen modifikasi (semen dan lateks) yang menjadi fokus utama, campuran AC-WC ini tersusun di atas fondasi material dasar yang kualitasnya harus memenuhi standar. Material dasar ini berfungsi sebagai *binder* utama dan kerangka struktural.

2.5.1 Aspal Penetrasi 60/70 (Sebagai *Binder* Dasar)

Bahan pengikat (*binder*) dasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal keras penetrasi 60/70. Ini adalah jenis aspal standar yang paling umum digunakan untuk perkerasan jalan di Indonesia karena dinilai paling sesuai dengan kondisi iklim tropis.

Sifatnya yang viskoelastik berfungsi sebagai "lem" yang mengikat agregat. Dalam penelitian ini, aspal pen 60/70 ini tidak digunakan secara murni, melainkan perannya *ditingkatkan* (dimodifikasi) dengan penambahan Lateks Alam (NR) untuk membentuk *binder* komposit elastomerik, seperti yang telah dibahas pada Sub-bab 2.4.



Gambar 2. 7 Material Dasar Aspal Pen 60/70

2.5.2 Agregat (Kasar dan Halus)

Agregat adalah kerangka struktural utama dalam campuran, yang menopang sekitar 90-95% beban lalu lintas. Kualitas agregat sangat menentukan stabilitas akhir campuran. Agregat dibagi menjadi:

1. **Agregat Kasar:** Fraksi batu pecah yang tertahan saringan No. 4 (4,75 mm). Bentuknya yang bersudut (*angular*) sangat penting untuk menciptakan saling kunci (*interlocking*) antar batuan.

Tabel 2. 1 Persyaratan Agregat Kasar untuk AC-WC

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

2. **Agregat Halus:** Fraksi material (pasir) yang lolos saringan No. 8 (2,36 mm). Berfungsi untuk mengisi rongga di antara agregat kasar.

Kedua jenis agregat ini harus memenuhi persyaratan mutu teknis yang ketat, terutama ketahanan aus (Uji Abrasi Los Angeles), kebersihan (Nilai Setara Pasir), dan daya serap air.

Tabel 2. 2 Persyaratan Agregat Halus untuk AC-WC

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

2.5.3 Spesifikasi Gradasi Agregat Gabungan AC-WC

Lebih penting daripada kualitas individu adalah proporsi atau campuran dari agregat kasar, halus, dan *filler*. Kombinasi ini dikenal sebagai Gradasi Agregat Gabungan.

Gradasi ini dirancang untuk mencapai kepadatan maksimum, di mana agregat yang lebih kecil mengisi rongga di antara agregat yang lebih besar secara efisien. Gradasi harus mengikuti kurva spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yang memiliki rentang "Batas Atas" dan "Batas Bawah".

Desain gradasi ini secara langsung menentukan volume rongga total dalam kerangka agregat, yang dikenal sebagai VMA (*Void in Mineral Aggregate*). Dalam penelitian ini, VMA inilah "ruang" yang kemudian akan diisi oleh dua komponen aktif: *filler* semen (Sub-bab 2.3) dan *binder* aspal-lateks (Sub-bab 2.4).

Tabel 2. 3 Spesifikasi Gradasi Agregat Gabungan untuk AC-WC

Ukuran Ayakan (ASTM)	Ukuran Ayakan (mm)	Batas Bawah (%)	Batas Atas (%)
3/4"	19	100	100
1/2"	12,5	90	
3/8"	9,5	77	90
No. 4	4,75	53	69
No. 8	2,36	33	53
No. 16	1,18	21	40
No. 30	0,6	14	30
No. 50	0,3	9	22
No. 100	0,15	6	15
No. 200	0,075	4	9

2.6 Metode Evaluasi Kinerja (Standar Uji Marshall)

Untuk mengevaluasi secara kuantitatif bagaimana variasi kadar *filler* semen (yang kaku) berinteraksi dengan *binder* lateks (yang elastis), metode pengujian standar yang digunakan adalah Uji Marshall.

Metode ini (sesuai SNI 06-2489-1991) sangat relevan karena melibatkan perendaman benda uji pada suhu 60°C sebelum pengujian. Suhu 60°C ini bukanlah angka yang arbitrer; suhu ini dipilih untuk merepresentasikan suhu permukaan perkerasan aspal di iklim tropis Indonesia pada siang hari, yang bisa mencapai 50°C-60°C. Ini adalah kondisi paling kritis di mana *binder* aspal berada pada titik terlunaknya (mendekati Titik Lembek) dan paling rentan terhadap deformasi

plastis (*rutting*), yang merupakan salah satu masalah utama penelitian ini (dari Sub-bab 2.1).

Selanjutnya, sesuai standar Bina Marga untuk lalu lintas berat, benda uji dipadatkan dengan 75 tumbukan per sisi (bukan 50 tumbukan). Pemadatan ini bertujuan untuk mensimulasikan kepadatan akhir di lapangan akibat beban lalu lintas berat dan berulang, yang juga berhubungan langsung dengan masalah rutting. Alih-alih hanya mengukur satu nilai, Uji Marshall mengevaluasi keseimbangan antara tiga pilar kinerja: Kekuatan, Fleksibilitas, dan Durabilitas.



Gambar 2. 8 Alat Uji *Marshall*

2.6.1 Standar Acuan Kinerja (Spesifikasi Bina Marga Modifikasi)

Sebagai sebuah penelitian modifikasi, campuran baru ini tidak hanya dibandingkan dengan campuran standar, tetapi juga harus memenuhi target kinerja yang lebih tinggi. Mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, standar acuan untuk Laston konvensional (sebagai pembanding) dan Laston Modifikasi (sebagai target) disajikan pada Tabel 2.4 dan 2.5.

Tabel 2. 4 Ketentuan Sifat Campuran Laston (AC) untuk Lalu Lintas Rencana 1-10 Juta ESA

Sifat - sifat campuran		WC	BC	Base
Penyerapan aspal, (%)	maks.	1,7		
Jumlah tumbukan per bidang		75		112
Rongga dalam campuran, VIM, (%)	min.	3,5		
	maks.	5,5		
Rongga dalam Agregat, VMA, (%)	min.	15	14	13
Rongga terisi aspal, VFB, (%)	min.	65	63	60
Stabilitas Marshall, (kg)	min.	800		1500
	maks.	-	-	-
Pelelehan, (mm)	min.	3		5
Marshall Quotient, (kg/mm)	min.	250		300
Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	min.	75		
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membatal (refusal)	min.	2,5		

Tabel 2. 5 Ketentuan Sifat Campuran Laston Dimodifikasi (AC Modified) untuk Lalu Lintas Rencana > 10 Juta ESA

Sifat - sifat campuran		WC mod	BC mod	Base mod
Penyerapan aspal, (%)	maks.	1,2		
Jumlah tumbukan per bidang		75		112
Rongga dalam campuran, VIM (%)	min.	3,5		
	maks.	5,5		
Rongga dalam Agregat, VMA, (%)	min.	15	14	13
Rongga terisi aspal, VFB, (%)	min.	65	63	60
Stabilitas Marshall, (kg)	min.	1000		1800
	maks.	-	-	-
Pelelehan, (mm)	min.	3		5
Marshall Quotient, (kg/mm)	min.	300		350
Stabilitas Marshall sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	min.	75		
Rongga dalam campuran (%) pada kepadatan membatal (Refusal)	min.	2,5		
Stabilitas Dinamis, Lintasan/ mm		2500		

Berdasarkan Tabel 2.5, target utama yang harus dicapai oleh campuran modifikasi semen-lateks ini adalah :

1. Stabilitas Marshall: Minimal 1000 kg
2. Marshall Quotient (MQ): Minimal 300 kg/mm
3. VIM (Rongga dalam Campuran): 3,5% - 5,5%

2.6.2 Analisis Parameter Kekuatan (Stabilitas & Marshall Quotient)

Parameter ini digunakan untuk mengukur kontribusi utama dari *filler* semen, yaitu peningkatan kekakuan dan kekuatan.

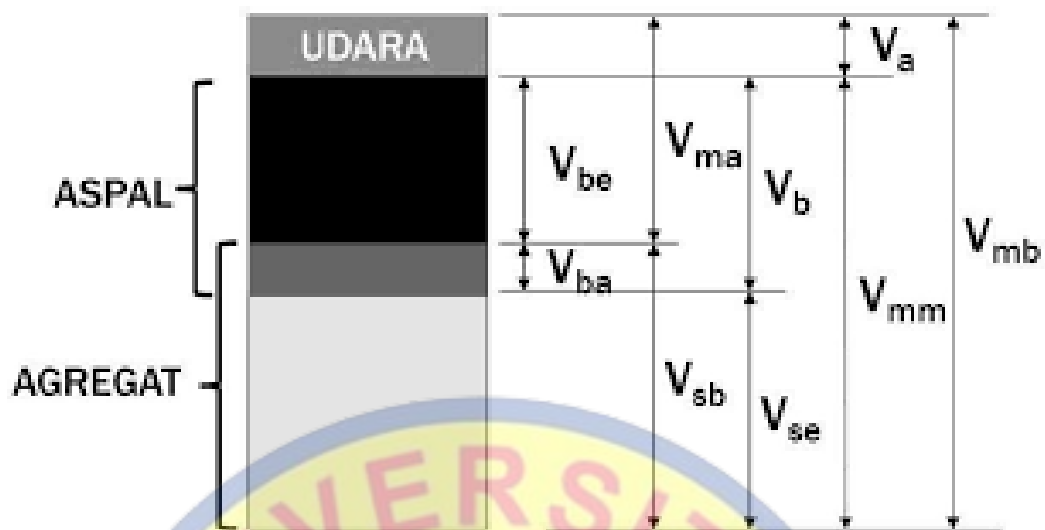
- Stabilitas: Ini adalah nilai beban maksimum (kg) yang dapat ditahan campuran sebelum runtuh. Dalam penelitian ini, Stabilitas diharapkan meningkat seiring dengan penambahan kadar semen, karena sifat hidrolik semen yang mengikat dan memperkaku matriks.
- Marshall Quotient (MQ): Stabilitas tinggi saja tidak cukup. Campuran bisa memiliki stabilitas tinggi namun juga *Flow* yang tinggi (terlalu plastis), yang akan tetap gagal. Di sinilah MQ (dihitung dari Stabilitas dibagi *Flow*) menjadi parameter yang lebih superior untuk mengukur kekakuan (*stiffness*) yang sesungguhnya. MQ adalah parameter kunci untuk memantau efek semen: jika penambahan semen meningkatkan Stabilitas dan MQ secara proporsional, itu berarti semen sukses menambah kekakuan. Namun, nilai MQ yang terlalu tinggi mengindikasikan campuran yang getas (kaku dan mudah patah), yang dapat menghilangkan manfaat elastisitas lateks.

2.6.3 Analisis Parameter Fleksibilitas (Kelelehan / *Flow*)

Parameter ini digunakan untuk memastikan bahwa manfaat elastisitas dari lateks tidak hilang akibat penambahan semen. Kelelehan (*Flow*): Ini adalah nilai deformasi/pelelehan (mm) yang terjadi saat beban stabilitas maksimum tercapai. *Flow* menunjukkan tingkat fleksibilitas campuran. Diharapkan, *binder* lateks yang konstan akan memberikan nilai *Flow* yang baik. Pengamatan utama adalah apakah peningkatan kadar semen akan menurunkan nilai *Flow* secara drastis di bawah batas minimum, yang mengindikasikan campuran menjadi terlalu rapuh.

2.6.4 Analisis Parameter Durabilitas (VIM, VMA, VFA)

Parameter ini mengevaluasi kualitas pemadatan campuran dan potensinya untuk bertahan lama (awet) terhadap cuaca dan infiltrasi air.



Gambar 2. 9 Diagram Fase Volumetrik Campuran Aspal

- **VIM (Void in Mix) / Rongga dalam Campuran:** Ini adalah persentase rongga udara dalam campuran yang telah dipadatkan . VIM adalah indikator durabilitas: VIM yang terlalu tinggi (porus) akan kemasukan air dan udara, menyebabkan aspal cepat tua dan rapuh. Diharapkan, *filler* semen yang sangat halus akan mengurangi VIM dan membuat campuran lebih padat dan kedap air.
- **VMA (Void in Mineral Aggregate) dan VFA (Void Filled with Asphalt):** VMA adalah total rongga antar agregat yang tersedia untuk diisi aspal dan *filler*, sementara VFA adalah seberapa penuh rongga tersebut terisi aspal. Kedua parameter ini dikontrol untuk memastikan bahwa ada "ruang" yang cukup untuk *binder* aspal-lateks menyelimuti agregat dengan efektif.

2.7 Penelitian Terdahulu dan Justifikasi Kesenjangan

Tinjauan pustaka menunjukkan bahwa meskipun modifikasi lateks dan *filler* semen telah diteliti, keduanya jarang dikaji secara bersamaan dalam satu sistem yang terstruktur. Penelitian-penelitian sebelumnya cenderung berfokus pada salah satu variabel, sehingga menyisakan pertanyaan penting tentang interaksi keduanya.

Beberapa penelitian yang paling relevan meliputi:

1. Studi tentang Lateks (NR): Penelitian oleh Widiyanto & Faishal (2021) membuktikan bahwa penambahan lateks sebesar 5% pada campuran AC-WC

(menggunakan *filler* kapur) menghasilkan stabilitas Marshall tertinggi . Studi dari Universitas Jenderal Soedirman (2022) juga mengonfirmasi hal ini, menemukan bahwa kadar lateks 6% memberikan stabilitas dan MQ yang optimal. Kedua studi ini menetapkan bahwa lateks adalah modifikator *binder* yang efektif.

2. Studi tentang *Filler* Semen: Penelitian oleh Ramadhan et al. (2023) secara spesifik mulai mengintegrasikan *filler* semen dengan lateks. Studi ini menemukan bahwa *filler* semen memang mampu meningkatkan kekedapan dan stabilitas campuran pada kadar NR 6%. Namun, studi ini masih terbatas dan belum menguji variasi kadar semen secara sistematis untuk menemukan titik optimalnya.

Tabel berikut merangkum temuan-temuan kunci dan variabel yang digunakan:

Tabel 2. 6 Penelitian Terdahulu Terkait Modifikasi Lateks dan Filler

No	Peneliti & Tahun	Kadar NR (%)	Filler	Campuran Aspal	Parameter Utama yang Dianalisis	Temuan Kunci
1	Widianto & Faishal (2021)	0, 3, 5, 7	Kapur	AC-WC	Stabilitas, Densitas	Kadar 5% menghasilkan stabilitas tertinggi dan densitas 2.32 g/cm ³
2	Univ. Jenderal Soedirman (2022)	3, 6, 9, 11	Tidak disebut	AC-WC	Stabilitas, MQ	Kadar 6% menghasilkan stabilitas 1273 kg dan MQ 397.78 kg/mm
3	Ramadhan et al. (2023)	4%, 6%	Semen	AC-WC	Stabilitas, VIM, VMA	Filler semen meningkatkan kekedapan dan stabilitas pada kadar NR 6%
4	Sumiati et al. (2024)	Tidak disebut	Tidak disebut	AC-WC	Ketahanan termal, cuaca ekstrem	AKAP PG-76 meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi dan retak termal
5	Prasetyo et al. (2022)	Tidak menggunakan NR	Fly ash	AC-BC	VMA, Stabilitas	Fly ash meningkatkan VMA dan stabilitas campuran AC-BC

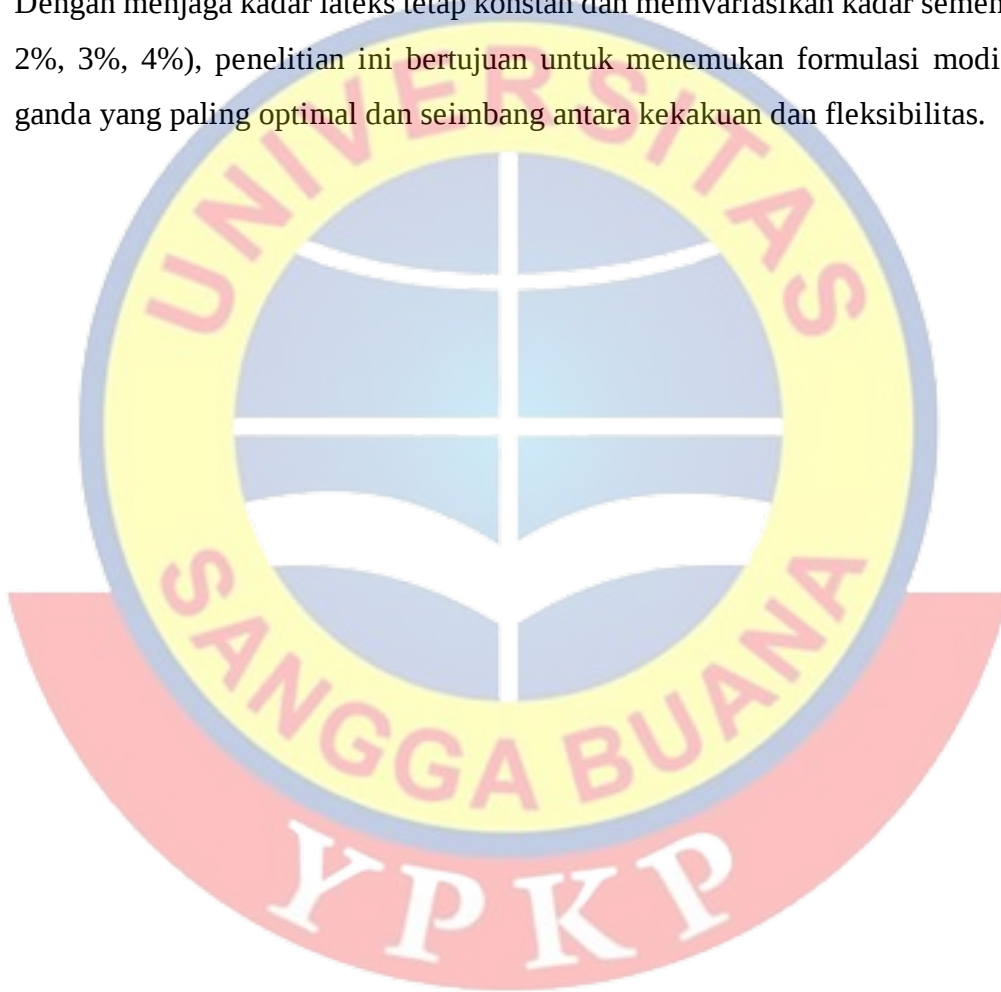
Dari tinjauan studi dan tabel di atas, teridentifikasi sebuah kesenjangan penelitian (research gap) yang fundamental:

Sebagian besar studi masih bersifat parsial. Studi yang berfokus pada lateks (seperti Widianto & Faishal) tidak menggunakan *filler* semen. Di sisi lain, studi

yang mulai menggunakan semen (seperti Ramadhan et al.) belum mengevaluasi pengaruh variasi kadar semen secara sistematis .

Belum ada kajian yang secara spesifik menjawab pertanyaan: "Bagaimana pengaruh variasi kadar *filler aktif-hidrolik (Semen)* terhadap karakteristik mekanis sebuah campuran yang *binder*-nya telah distabilkan secara konstan dengan *modifikator elastomerik (Lateks)*?"

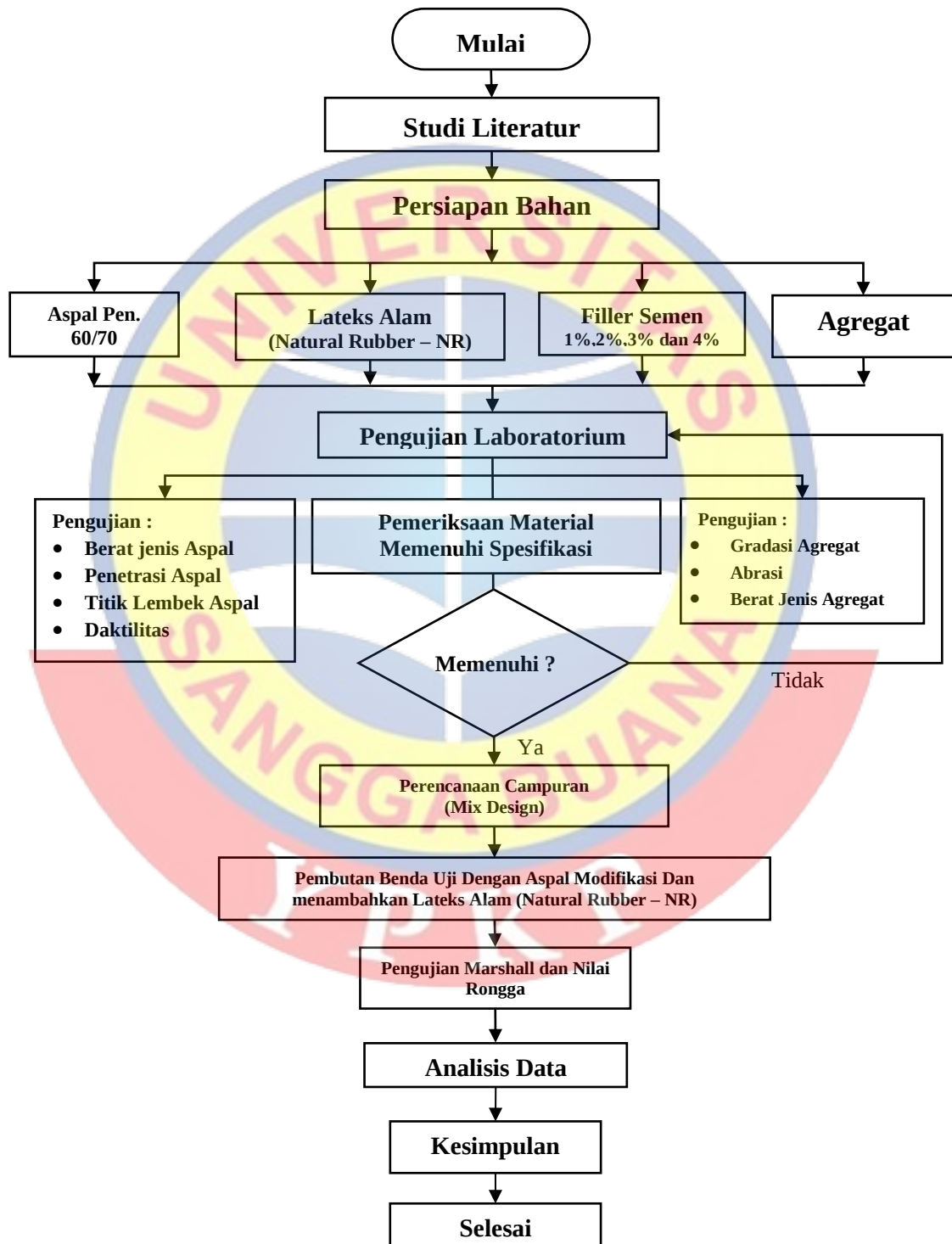
Penelitian ini dirancang secara spesifik untuk mengisi kesenjangan tersebut. Dengan menjaga kadar lateks tetap konstan dan memvariasikan kadar semen (1%, 2%, 3%, 4%), penelitian ini bertujuan untuk menemukan formulasi modifikasi ganda yang paling optimal dan seimbang antara kekakuan dan fleksibilitas.



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3. 1 Diagram Alir

3.2 Deskripsi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui serangkaian eksperimen di laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh variasi kadar *filler* terhadap performa campuran aspal. Secara spesifik, lingkup penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh variasi kadar *filler* semen sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4% terhadap karakteristik campuran *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC) yang *binder*-nya telah dimodifikasi secara konstan dengan lateks alam.

Data untuk sampel kontrol, yaitu campuran yang menggunakan *filler* konvensional berupa abu batu, akan diperoleh dari hasil penelitian paralel oleh rekan satu kelompok, Muhammad Fauzan Hilmy, yang hasilnya akan digunakan sebagai data pembanding dalam analisis akhir.

Proses penelitian dimulai dengan pengujian karakteristik material awal (agregat, aspal, dan *filler*) untuk memastikan semua bahan memenuhi standar teknis. Tahap inti melibatkan pembuatan benda uji dan pengujian Marshall untuk menilai parameter kunci seperti stabilitas, kelelahan (*flow*), dan sifat volumetrik lainnya (VIM, VMA, VFA, MQ).

3.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Seluruh rangkaian kegiatan penelitian, mulai dari persiapan bahan, pembuatan benda uji, hingga pengujian Marshall, dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sangga Buana – YPKP Bandung. Pelaksanaan penelitian dijadwalkan sesuai dengan kalender akademik yang berlaku.

3.4 Langkah Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis sebagai berikut:

1. Studi Literatur: Mengumpulkan landasan teori dari buku, jurnal ilmiah, dan standar teknis (SNI, Bina Marga) yang relevan dengan campuran AC-WC, modifikasi lateks alam, dan penggunaan *filler* semen.
2. Persiapan dan Pengujian Material: Menyiapkan seluruh bahan dan alat di laboratorium, dilanjutkan dengan pengujian karakteristik awal aspal Pen 60/70, agregat, dan *filler* semen untuk memastikan kelayakan material.

3. Perancangan Campuran (*Mix Design*): Menentukan proporsi material yang akan digunakan dalam campuran sesuai dengan spesifikasi yang berlaku.
4. Pembuatan Benda Uji: Membuat benda uji Marshall dengan kadar lateks alam yang dijaga konstan dan variasi kadar *filler* semen sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4%.
5. Pengujian Marshall: Menguji seluruh benda uji untuk mendapatkan data stabilitas, *flow*, VIM, VMA, VFA, dan MQ.
6. Analisis dan Kesimpulan: Menganalisis data hasil pengujian untuk mengevaluasi pengaruh variasi kadar semen dan menarik kesimpulan akhir penelitian.

3.5 Persiapan Bahan dan Peralatan

Tahap persiapan merupakan fondasi dari penelitian eksperimental ini, yang bertujuan untuk memastikan semua material memenuhi spesifikasi dan peralatan telah terkalibrasi untuk pengujian.

3.5.1 Persiapan Bahan

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Aspal: Aspal Penetrasi 60/70 yang diperoleh dari stok Laboratorium Teknik Sipil USB YPKP.
2. Agregat: Terdiri dari agregat kasar (batu pecah) dan agregat halus (pasir alami) yang juga berasal dari Laboratorium Teknik Sipil USB YPKP.
3. Bahan Aditif: Lateks alam (NR) sebagai modifikator *binder*.
4. Filler: Semen Portland Tipe I sebagai variabel utama dalam penelitian.

3.5.2 Persiapan Peralatan

Peralatan utama yang digunakan untuk pengujian material dan campuran meliputi:

1. Alat untuk pengujian Analisa Saringan (*Shieve Shaker Analysis*).
2. Alat untuk pengujian Keausan agregat (Abrasi) yaitu Mesin *Los Angles*.
3. Alat untuk pengujian berat jenis agregat yaitu *Specific Gravity and Absorption of Coarse Digital*.
4. Alat untuk pengujian Penetrasi Aspal yaitu *Penetration Test*.
5. Alat untuk Pengujian Titik Lembek yaitu *Ring and Ball Test*.

6. Alat untuk pengujian Daktilitas Aspal yaitu *Ductility Machine*.
7. Alat untuk pengujian modulus kekakuan yaitu *Marshall Test*.

3.6 Pengujian Aspal

Pengujian terhadap sifat fisik aspal dilakukan untuk memastikan bahwa material yang digunakan dalam campuran Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC) memenuhi spesifikasi teknis yang telah ditetapkan. Pengujian ini menjadi tahap penting dalam proses penelitian, karena karakteristik dasar aspal sangat memengaruhi performa campuran akhir, terutama dalam hal stabilitas, fleksibilitas, dan daya tahan terhadap beban lalu lintas.

Beberapa parameter yang diuji dalam penelitian ini meliputi penetrasi, titik lembek, berat jenis, dan daktilitas. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar metode yang berlaku, seperti SNI atau ASTM, untuk menjamin validitas dan reliabilitas hasil.

1. Penetrasi

Pengujian penetrasi bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan aspal dengan mengukur seberapa dalam jarum standar dapat menembus permukaan aspal dalam kondisi tertentu. Prosedur dilakukan dengan memanaskan aspal dan menuangkannya ke dalam cawan uji, kemudian didinginkan dan direndam dalam bak air pada suhu 25°C selama 1–1,5 jam. Beban sebesar 100 gram diberikan pada jarum berdiameter 1 mm selama 5 detik. Nilai penetrasi dinyatakan dalam satuan 0,1 mm, dan semakin tinggi nilai penetrasi, semakin lunak karakteristik aspal tersebut.

2. Titik Lembek

Pengujian titik lembek bertujuan untuk mengetahui suhu pada saat aspal mulai melembek dan kehilangan bentuk padatnya. Tes ini dilakukan dengan metode cincin dan bola, di mana bola baja berdiameter 9,35 mm ditempatkan di atas lapisan aspal dalam cincin kuningin. Sampel kemudian dipanaskan secara bertahap, dan suhu saat bola menyentuh pelat dasar dicatat sebagai titik lembek. Nilai titik lembek yang umum diperoleh berkisar di sekitar 48°C, dan menjadi indikator penting dalam menilai ketahanan aspal terhadap suhu tinggi.

3. Berat Jenis

Berat jenis aspal diukur untuk mengetahui massa jenis material, yang berpengaruh terhadap perhitungan volume dan proporsi campuran. Pengujian dilakukan dengan metode piknometer atau displacement air, tergantung pada jenis aspal dan standar yang digunakan. Nilai berat jenis digunakan dalam perhitungan campuran agregat dan aspal agar menghasilkan campuran yang optimal.

4. Daktilitas

Pengujian daktilitas bertujuan untuk mengukur kemampuan aspal dalam mengalami deformasi plastis sebelum putus. Tes dilakukan dengan menarik sampel aspal secara perlahan dalam alat uji daktilitas hingga putus, dan panjang maksimum sebelum putus dinyatakan sebagai nilai daktilitas (dalam cm). Nilai ini mencerminkan fleksibilitas aspal, yang penting untuk menahan retak akibat perubahan suhu dan beban dinamis.

Penggunaan Lateks Alam sebagai bahan modifikasi dalam campuran AC-WC diperkirakan dapat memengaruhi hasil pengujian sifat fisik aspal, terutama pada aspek penetrasi dan daktilitas. Oleh karena itu, pengujian dilakukan baik terhadap aspal standar maupun aspal yang telah dimodifikasi, untuk memperoleh data komparatif yang mendukung analisis performa campuran secara menyeluruh.

3.7 Pengujian Agregat

Agregat merupakan material granular yang terdiri dari batu pecah, kerikil, pasir, atau bahan mineral lainnya, baik hasil alam maupun buatan. Dalam campuran perkerasan lentur seperti Asphalt Concrete–Wearing Course (AC-WC), agregat memegang peranan penting karena menyusun sekitar 90–95% dari total berat dan 75–85% dari total volume campuran. Oleh karena itu, karakteristik agregat sangat menentukan kualitas dan daya dukung perkerasan jalan.

Pengujian agregat dalam penelitian ini mencakup pengujian gradasi, berat jenis, absorpsi, keausan, dan berat volume, yang dilakukan secara terpisah untuk agregat halus dan agregat kasar.

3.7.1 Agregat Halus

Agregat halus berfungsi untuk mengisi rongga antar agregat kasar yang tidak dapat terisi sempurna, serta membantu menciptakan ikatan antar partikel dalam campuran. Agregat halus yang baik memiliki butiran kecil dengan permukaan yang cenderung kasar, sehingga mampu meningkatkan kohesi campuran.

Pengujian keausan terhadap agregat halus dilakukan menggunakan metode Los Angeles sesuai dengan SNI 03-2417-1991, untuk menilai ketahanan terhadap abrasi. Berat volume agregat diuji berdasarkan SNI 03-1970-1990, yang digunakan dalam perhitungan proporsi campuran dan evaluasi kepadatan.

3.7.2 Agregat Kasar

Agregat kasar berperan sebagai kerangka utama dalam campuran AC-WC, memberikan kekuatan struktural dan stabilitas terhadap beban lalu lintas. Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018.

Pengujian dilakukan berdasarkan metode SNI ASTM C136:2012, dengan fokus pada:

- Pengujian gradasi agregat kasar dilakukan berdasarkan SNI 03-2834-2000 dan mengacu pada ASTM C136 untuk analisis saringan.
- Berat jenis dan absorpsi diuji sesuai dengan SNI 03-1969-1990 dan ASTM C127, dengan batas maksimum absorpsi sebesar 3% sebagaimana tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018. Nilai ini penting untuk menghindari kelembaban berlebih yang dapat menurunkan kekuatan agregat.

3.8 Perencanaan campuran

Dalam rangka menghasilkan campuran beraspal yang optimal dan sesuai dengan standar kinerja perkerasan lentur, tahap perencanaan campuran menjadi langkah krusial sebelum proses pencampuran dilakukan. Perencanaan ini bertujuan untuk menetapkan proporsi masing-masing komponen material agar campuran akhir memenuhi spesifikasi teknis yang telah ditetapkan.

Beberapa aspek utama yang diperhatikan dalam perencanaan campuran antara lain:

1. Pemilihan agregat dengan gradasi yang sesuai untuk *Asphalt Concrete Wearing Course* (AC-WC), yang merupakan lapisan permukaan perkerasan jalan.
2. Penentuan kadar bahan tambahan berupa Lateks Alam (*Natural Rubber – NR*) sebagai modifikasi campuran untuk meningkatkan karakteristik Marshall.
3. Perhitungan komposisi campuran dilakukan secara analitis untuk memastikan bahwa proporsi material memenuhi persyaratan teknis dan spesifikasi yang berlaku.
4. Setelah proporsi agregat ditentukan, dilakukan proses pengayakan agregat sesuai dengan ukuran saringan yang dibutuhkan untuk mencapai distribusi butiran yang diinginkan.

Gradasi campuran AC-WC yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, dengan pendekatan pengambilan nilai pada batas atas dan batas tengah dari persentase berat lolos saringan. Pendekatan ini dipilih untuk menghasilkan campuran bergradasi halus yang mampu memberikan kepadatan optimal dan stabilitas yang baik terhadap beban lalu lintas.

3.9 Pembuatan Benda Uji

Tahap pembuatan benda uji dilakukan sebagai bagian dari proses pengujian laboratorium untuk memperoleh data karakteristik campuran beraspal yang dibutuhkan dalam penelitian. Proses ini mencakup beberapa tahapan, mulai dari persiapan material hingga pengujian fisik benda uji.

Langkah awal melibatkan pengujian gradasi agregat, baik agregat halus maupun kasar. Pengujian ini mencakup analisis saringan, pengujian abrasi, serta penentuan berat jenis agregat, yang dilakukan sesuai dengan standar SNI dan ASTM yang berlaku.

Selanjutnya, dilakukan pengujian untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO). Pada tahap ini, benda uji dibuat dengan variasi kadar aspal sebesar 5%, dan dilakukan pengujian terhadap densitas campuran untuk menilai kepadatan dan stabilitasnya.

Pembuatan benda uji dengan campuran aspal modifikasi yang mengandung Lateks Alam (*Natural Rubber – NR*) dilakukan melalui prosedur berikut:

1. Agregat ditimbang sesuai dengan proporsi campuran yang telah dihitung sebelumnya. Untuk setiap variasi kadar aspal, dibuat tiga buah benda uji.
2. Aspal dipanaskan hingga mencapai suhu pencampuran yang sesuai, yaitu sekitar 155°C. Pencampuran dilakukan di atas pemanas agar suhu tetap stabil, dan campuran diaduk hingga homogen.
3. Cetakan benda uji dipanaskan terlebih dahulu untuk mencegah penurunan suhu campuran secara drastis saat dituangkan.
4. Benda uji dibentuk dalam cetakan silinder dengan dimensi standar: tinggi 6,35 cm dan diameter 10,16 cm.
5. Pemadatan dilakukan menggunakan alat Marshall Compactor dengan 75 tumbukan pada sisi atas dan 75 tumbukan pada sisi bawah.
6. Setelah pemadatan selesai, benda uji didiamkan hingga suhu turun, kemudian dikeluarkan dari cetakan menggunakan ejektor dan diberi kode identifikasi.
7. Benda uji dibersihkan dari sisa material, lalu diukur tinggi pada empat sisi menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,1 mm, dan ditimbang untuk mendapatkan berat kering.
8. Benda uji direndam dalam air selama 16–24 jam untuk mencapai kondisi jenuh.
9. Setelah perendaman, benda uji ditimbang dalam air untuk memperoleh berat basah, kemudian dikeringkan dengan kain lap hingga mencapai kondisi Saturated Surface Dry (SSD), dan ditimbang kembali untuk mendapatkan berat SSD.

Seluruh tahapan ini dilakukan secara sistematis untuk memastikan bahwa benda uji yang dihasilkan memenuhi persyaratan teknis dan siap untuk diuji lebih lanjut dalam analisis karakteristik Marshall.

3.10 Pengujian dengan Alat Marshall

Pengujian Marshall bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan campuran aspal terhadap deformasi (kelelahan) dan beban (stabilitas). Metode ini mengacu pada prosedur standar SNI 06-2489-1991 dan digunakan untuk menilai kualitas campuran yang dimodifikasi dengan lateks alam dan *filler* semen.

Prosedur pengujian adalah sebagai berikut:

1. Benda uji direndam dalam bak air pada suhu $60 \pm 1^{\circ}\text{C}$ selama 30 menit untuk mensimulasikan kondisi lapangan.
2. Benda uji kemudian diletakkan di dalam kepala penekan (breaking head) dan diuji menggunakan mesin Marshall dengan kecepatan pembebanan konstan 51 mm per menit.
3. Nilai stabilitas maksimum dan nilai kelelahan (flow) yang bersesuaian dicatat selama proses pembebanan .

Analisis data difokuskan pada perbandingan karakteristik Marshall dari setiap variasi kadar *filler* semen (1%, 2%, 3%, dan 4%). Tujuannya adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan semen terhadap stabilitas, *flow*, dan parameter Marshall lainnya guna menentukan formulasi campuran yang paling optimal. Karakteristik yang dianalisis meliputi:

- Kepadatan (Density)
- Void in Mix (VIM)
- Void in Mineral Aggregate (VMA)
- Void Filled with Asphalt (VFA)
- Kelelahan (Flow)
- Stabilitas
- Marshall Quotient (MQ)

Seluruh parameter ini digunakan untuk menilai kualitas dan kelayakan campuran aspal modifikasi dalam aplikasi perkerasan jalan.

3.11 Berat Jenis Aspal

Berat jenis aspal merupakan salah satu parameter penting dalam perencanaan dan evaluasi campuran beraspal. Nilai ini digunakan untuk menghitung volume campuran, densitas benda uji, serta proporsi material dalam campuran AC-WC. Pengujian berat jenis dilakukan menggunakan metode piknometer sesuai dengan SNI 06-6500-2000 atau ASTM D70, dengan sampel aspal yang telah dipanaskan dan dituang ke dalam alat ukur.

Berdasarkan spesifikasi teknis, berat jenis aspal yang digunakan dalam campuran AC-WC umumnya berada dalam rentang $1,01\text{--}1,05\text{ g/cm}^3$. Nilai ini menunjukkan bahwa material memiliki kepadatan yang sesuai untuk digunakan dalam konstruksi perkerasan lentur. Berat jenis yang terlalu rendah dapat

mengindikasikan adanya kontaminasi atau kualitas material yang kurang baik, sedangkan nilai yang terlalu tinggi dapat memengaruhi proporsi campuran dan performa akhir perkerasan.

3.12 Daktilitas

Daktilitas merupakan salah satu parameter penting dalam menilai fleksibilitas aspal, yaitu kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis tanpa mengalami keretakan. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa jauh aspal dapat ditarik sebelum putus, yang mencerminkan ketahanan terhadap retak akibat perubahan suhu dan beban dinamis.

Pengujian dilakukan menggunakan alat daktilitas, yang terdiri dari dua mangkuk berisi sampel aspal yang ditarik secara perlahan pada kecepatan konstan hingga terjadi pemutusan. Jarak maksimum sebelum putus dinyatakan sebagai nilai daktilitas, dengan satuan sentimeter (cm). Berdasarkan standar ASTM D113 dan SNI 06-6501-1999, pengujian dilakukan pada suhu 25°C sebagai suhu standar, dan nilai minimum daktilitas yang disyaratkan umumnya adalah 100 cm.

Nilai daktilitas yang tinggi menunjukkan bahwa aspal memiliki sifat elastis yang baik dan mampu menahan deformasi tanpa retak, sehingga cocok digunakan dalam lapisan permukaan perkerasan seperti AC-WC. Sebaliknya, nilai daktilitas yang rendah dapat mengindikasikan potensi retak dini pada perkerasan jalan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Persiapan Material

Pelaksanaan penelitian diawali dengan proses persiapan material dan peralatan yang dilakukan secara sistematis di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP Bandung. Seluruh bahan yang akan digunakan terlebih dahulu melalui tahap pemeriksaan untuk memastikan kondisinya siap digunakan, dalam keadaan kering, serta bebas dari kotoran atau kontaminasi, sehingga data hasil pengujian dapat merepresentasikan sifat asli material secara tepat.

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas beberapa komponen utama yang berperan dalam penyusunan campuran AC-WC, yaitu sebagai berikut:

1. Bahan Pengikat (Binder)

- Aspal penetrasi 60/70 digunakan sebagai binder utama karena memiliki karakteristik viskoelastis yang sesuai dengan kondisi iklim tropis, sehingga mampu memberikan performa yang stabil pada lapisan perkerasan jalan.
- Lateks alam (Natural Rubber/NR) ditambahkan sebesar 5% dari berat aspal sebagai bahan modifikasi. Lateks cair yang berasal dari pohon *Hevea brasiliensis* ini berfungsi untuk meningkatkan sifat elastis, memperbaiki fleksibilitas campuran, serta meningkatkan ketahanan terhadap deformasi permanen seperti terjadinya alur (rutting).

2. Bahan Pengisi (Filler)

- Dalam penelitian ini, semen dimanfaatkan sebagai material pengisi utama dengan variasi kadar sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4%. Sifat semen yang sangat halus memungkinkan partikel-partikelnya mengisi celah-celah kecil di antara agregat, sehingga campuran menjadi lebih rapat dan daya lekat antara agregat dan aspal meningkat.

- Abu batu digunakan sebagai bahan pengisi pembanding untuk melihat sejauh mana penggunaan semen memberikan pengaruh terhadap kinerja campuran AC–WC.

3. Agregat (Kerangka Struktur)

Agregat merupakan komponen terbesar dalam campuran AC–WC, dengan proporsi sekitar 90–95% dari total berat, sehingga berfungsi sebagai rangka utama yang menentukan kekuatan struktur perkerasan.

- Agregat kasar terdiri dari batu pecah yang tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm). Material ini harus memiliki bentuk butir yang bersudut dan ketahanan aus yang baik agar mampu memberikan stabilitas tinggi terhadap beban lalu lintas.
- Agregat halus berupa pasir alam atau hasil pemecahan batu yang lolos saringan No. 8 (2,36 mm), yang berperan mengisi ruang antar agregat kasar serta meningkatkan kohesi campuran.

4. Standar Pemeriksaan Karakteristik Material

Seluruh bahan yang digunakan terlebih dahulu diuji di laboratorium untuk memastikan kesesuaiannya dengan ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2), sehingga campuran yang dihasilkan memenuhi standar teknis yang berlaku.

Tabel 4. 1 Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2)

Material	Jenis Pengujian	Standar Acuan
Aspal	Penetrasi, Titik Lembek, Berat Jenis, Daktilitas	SNI 06-2456-1991, ASTM D113
Agregat	Analisis Saringan (Gradasi), Abrasi Los Angeles, Berat Jenis & Absorpsi	SNI ASTM C136:2012, SNI 2417:2008
Campuran	Uji Marshall (Stabilitas, Flow, MQ, VIM, VMA, VFA)	SNI 06-2489-1991

Sumber : Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 (Revisi 2)

5. Prosedur Persiapan Akhir

Setelah seluruh bahan dinyatakan layak berdasarkan hasil pengujian karakteristik, dilakukan tahap persiapan lanjutan sebelum proses pencampuran dimulai. Tahapan ini bertujuan untuk memastikan kondisi material sesuai dengan kebutuhan desain campuran.

- Pengayakan Agregat: Agregat dipisahkan berdasarkan ukuran butir menggunakan rangkaian saringan standar guna memperoleh distribusi gradasi yang sesuai dengan perencanaan campuran AC–WC. Susunan gradasi disesuaikan agar berada dalam rentang batas yang dipersyaratkan oleh Spesifikasi Umum Bina Marga, baik pada garis tengah maupun mendekati batas atas spesifikasi.
- Pemanasan Bahan: Aspal dipanaskan hingga mencapai suhu kerja sekitar 155°C sehingga memiliki viskositas yang cukup untuk menyelimuti agregat secara optimal. Selain itu, cetakan Marshall juga dipanaskan sebelumnya untuk menjaga stabilitas suhu campuran saat proses penuangan dan pemadatan, sehingga tidak terjadi penurunan temperatur yang dapat memengaruhi kualitas benda uji.

4.2 Hasil Pengujian Bahan

4.2.1 Pengujian Agregat

Pengujian agregat kasar dilakukan sebagai tahap evaluasi awal untuk memastikan material memiliki sifat fisik dan mekanis yang sesuai sebelum digunakan dalam campuran beraspal. Pemeriksaan meliputi analisis bentuk butir, ketahanan aus melalui uji Los Angeles, kemampuan adhesi terhadap aspal, tingkat keanguleran partikel, serta persentase butiran yang mudah hancur. Selain itu, dilakukan pengujian gradasi dan penentuan parameter berat jenis yang mencakup berat jenis bulk, berat jenis jenuh kering permukaan (SSD), berat jenis semu, serta nilai absorpsi air. Analisis juga mencakup kadar material lolos saringan No. 200, proporsi partikel pipih dan lonjong, serta pengujian sand equivalent untuk menilai tingkat kebersihan agregat dari kandungan lumpur dan partikel halus.

Hasil lengkap pengujian agregat dirangkum pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Penilaian kelayakan material dilakukan dengan membandingkan data hasil uji

terhadap persyaratan yang tercantum dalam Spesifikasi Pemeriksaan Jalan No. 01/MN/BM/1976 Bina Marga.

Tabel 4. 2 Hasil Penelitian Sifat Fisik dan Mekanis Agregat Kasar

No	Jenis Pemeriksaan	Metode	Persyaratan	Hasil	Keterangan
A	Agregat Kasar				
1	Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI 03-2417-2008	Maks. 40%	28,5%	Memenuhi
2	Kelekatan agregat terhadap aspal pan 60/70	SNI 03-2439-2011	Min. 95%	98%	Memenuhi
3	Partikel pipih dan lonjong	ASTM D4791-10	Maks. 10%	6,4%	Memenuhi
4	Material lolos saringan no 200	ASTM C117:2012	Maks. 1%	0,7%	Memenuhi
5	Penyerapan air oleh aggregate Agregat kasar ½ Agregat kasar 3/8	SNI 03-1969-1990	Maks. 3%	1,8%	Memenuhi
6	Berat jenis (bulk specific gravity) Agregat kasar 0,5/1 Agregat kasar 1/2	SNI 03-1969-1990	Min. 2,5%	2,62%	Memenuhi

Tabel 4. 3 Hasil Penelitian Sifat Fisik dan Mekanis Agregat Halus

No	Jenis Pemeriksaan	Metode	Persyaratan	Hasil	Keterangan
B	Agregat Halus				
1	Material lolos saringan no. 200	SNI 03-4142-1992	Maks. 15%	8,5%	Memenuhi
2	Angularitas	SNI 03-6877-2002	Min. 45%	47,2%	Memenuhi
3	Penyerapan air oleh agregat Agregat halus (pasir) Agregat halus (abu batu)	SNI 03-1969-1990	Maks. 3%	2,1%	Memenuhi
4	Berat jenis (bulk specific gravity) Agregat halus (pasir) Agregat halus (abu batu)	SNI 03-1969-1990	Min. 2,5%	2,58%	Memenuhi

Mengacu pada data hasil pengujian yang tercantum dalam Tabel 4.1, agregat yang diuji di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Sangga Buana YPKP Bandung telah memenuhi seluruh kriteria yang ditetapkan dalam Spesifikasi

Umum Bina Marga 2018. Seluruh parameter pengujian berada dalam batas yang dipersyaratkan, sehingga material tersebut dinyatakan memenuhi standar dan dapat digunakan sebagai komponen penyusun campuran AC–WC. Dalam penelitian ini, bahan pengisi yang digunakan adalah semen Portland (PC).

Jika hasil pengujian menunjukkan bahwa suatu material tidak sesuai dengan persyaratan spesifikasi yang berlaku, maka material tersebut tidak diperkenankan untuk digunakan dalam campuran. Sebagai tindak lanjut, material tersebut harus digantikan dengan bahan lain yang memenuhi kriteria teknis. Bahan pengganti tersebut kemudian harus diuji kembali untuk memastikan bahwa seluruh parameter telah sesuai dengan standar yang ditetapkan sebelum digunakan dalam proses pencampuran.

4.2.2 Pengujian Pasir

Pemeriksaan terhadap material pasir dilakukan untuk mengetahui nilai Sand Equivalent serta parameter berat jenisnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pasir yang digunakan memiliki tingkat kebersihan yang memadai dan tidak mengandung lumpur dalam jumlah berlebihan, sehingga kualitas perlekatan antara aspal dan agregat dalam campuran dapat tetap terjaga.

Pada tahap analisis gradasi, pasir disaring menggunakan seperangkat saringan standar mulai dari ukuran 1½ inci hingga saringan No. 200. Berdasarkan hasil tersebut, pasir termasuk dalam kategori agregat halus yang lolos saringan 1½ inci hingga No. 30, serta mulai tertahan pada saringan No. 50 dan ukuran yang lebih kecil. Rincian distribusi ukuran butir dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 4 Hasil Analisis Pembagian Butiran
(SNI 03-1968-1990/AASHTO T.27-88)**

Saringan		Berat Tertahan	Jumlah berat tertahan gram	JUMLAH PERSEN		Rata - rata	Berat Tertahan	Jumlah berat tertahan gram	JUMLAH PERSEN	
mm	inc			Tertahan %	Lewat %				Tertahan %	Lewat %
36.1	1 1/2"									
25.4	1"	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19.1	(3/4")	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
12.7	(1/2")	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
9.52	(3/8")	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4.75	No.4	165.00	0.00	0.00	100.00	100.00	165.00	0.00	0.00	100.00
2.36	No.8	631.90	466.90	41.56	58.44	55.40	657.80	492.80	47.64	52.36
1.15	No.16	846.40	681.40	60.66	39.34	37.50	830.60	665.60	64.34	35.66
0.60	No.30	958.90	793.90	70.67	29.33	26.21	960.60	795.60	76.91	23.09
0.300	No.50	1003.70	838.70	74.66	25.34	22.05	1005.40	840.40	81.24	18.76
0.150	No.100	1058.50	893.50	79.54	20.46	15.29	1094.90	929.90	89.89	10.11
0.075	No.200	1178.10	1013.10	90.18	9.82	8.30	1129.30	964.30	93.21	6.79
	pan	165.00					165.00			

Berdasarkan data pada Tabel 4.4, hasil pengujian analisis saringan menunjukkan bahwa material yang diuji tergolong sebagai agregat halus (pasir) dengan distribusi gradasi yang cukup baik dan berkesinambungan. Seluruh butiran melewati saringan 4,75 mm (No. 4), sedangkan penahanan partikel mulai terjadi secara nyata pada saringan No. 8 (2,36 mm). Dari rata-rata dua kali pengujian, persentase material yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm) tercatat sebesar 8,30%. Nilai tersebut tergolong relatif tinggi, sehingga apabila material digunakan untuk campuran beton struktural, kemungkinan diperlukan proses pencucian untuk mengurangi kandungan partikel sangat halus yang dapat memengaruhi mutu ikatan semen. Secara umum, sebaran ukuran butir menunjukkan komposisi yang cukup merata dari fraksi kasar hingga halus, yang berkontribusi terhadap stabilitas pengisian rongga pada campuran perkerasan maupun konstruksi bangunan.

**Tabel 4. 5 Hasil Analisis Pembagian Butiran
(SNI 03-1968-1990/AASHTO T.27-88)**

Saringan		Berat Tertahan	Jumlah berat tertahan	JUMLAH PERSEN		Rata - rata	Berat Tertahan	Jumlah berat tertahan	JUMLAH PERSEN	
mm	inc			Tertahan	Lewat				Tertahan	Lewat
mm	inc		gram	%	%			gram	%	%
36.1	1 1/2"									
25.4	1"	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00		0.00	0.00	100.00
19.1	(3/4")	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00		0.00	0.00	100.00
12.7	(1/2")	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	0.00	0.00	0.00	100.00
9.52	(3/8")	210.60	45.60	2.43	97.57	96.40	250.30	85.30	4.77	95.23
4.75	No.4	1685.30	1520.30	80.91	19.09	19.07	1613.50	1448.50	80.94	19.06
2.36	No.8	1728.40	1563.40	83.20	16.80	14.71	1728.50	1563.50	87.37	12.63
1.15	No.16	2030.00	1865.00	99.25	0.75	0.93	1934.40	1769.40	98.88	1.12
0.60	No.30	2032.70	1867.70	99.40	0.60	0.68	1940.80	1775.80	99.23	0.77
0.300	No.50	2035.92	1870.92	99.57	0.43	0.50	1944.40	1779.40	99.44	0.56
0.150	No.100	2038.30	1873.30	99.70	0.30	0.33	1948.20	1783.20	99.65	0.35
0.075	No.200	2043.80	1878.80	99.99	0.01	0.02	1953.90	1788.90	99.97	0.03
	pan	165.00					165.00			

Mengacu pada data analisis saringan pada Tabel 4.5, material yang diuji termasuk dalam kategori agregat kasar (kerikil) dengan pola gradasi yang cenderung seragam. Mayoritas butiran tertahan pada rentang ukuran 9,52 mm (3/8") hingga 4,75 mm (No. 4), yang menunjukkan bahwa fraksi berukuran besar mendominasi komposisi material. Berdasarkan rata-rata dua kali pengujian, hanya sekitar 19,07% material yang lolos saringan No. 4, sedangkan kandungan partikel sangat halus yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm) tercatat sangat kecil, yaitu sekitar 0,02%. Kondisi ini menunjukkan bahwa material tersebut memiliki tingkat kebersihan yang sangat baik dan hampir tidak mengandung lumpur. Dengan dominasi agregat berukuran besar serta minimnya fraksi halus, material ini layak dipertimbangkan sebagai agregat kasar untuk campuran beton maupun lapisan pondasi jalan yang memerlukan stabilitas tinggi dan sistem pori yang memadai.

**Tabel 4. 6 Hasil Analisis Pembagian Butiran
(SNI 03-1968-1990/AASHTO T.27-88)**

Saringan		Berat Tertahan	Jumlah berat tertahan	JUMLAH PERSEN		Rata - rata	Berat Tertahan	Jumlah berat tertahan	JUMLAH PERSEN	
mm	inc			Tertahan	Lewat				Tertahan	Lewat
mm	inc		gram	%	%			gram	%	%
36.1	1 1/2"									
25.4	1"	0.00	0.0	0.00	100.00	100.00		0.0	0.00	100.00
19.1	(3/4")	0.00	0.0	0.00	100.00	100.00	0.00	0.0	0.00	100.00
12.7	(1/2")	1428.8	1263.8	49.87	50.13	48.47	1512.2	1347.2	53.19	46.81
9.52	(3/8")	2151.1	1986.1	78.38	21.62	20.62	2201.2	2036.2	80.39	19.61
4.75	No.4	2525.9	2360.9	93.17	6.83	6.79	2526.9	2361.9	93.25	6.75
2.36	No.8	2527.7	2362.7	93.24	6.76	6.73	2528.2	2363.2	93.30	6.70
1.15	No.16	2529.2	2364.2	93.30	6.70	6.69	2528.9	2363.9	93.33	6.67
0.60	No.30	2530.2	2365.2	93.34	6.66	6.65	2529.7	2364.7	93.36	6.64
0.300	No.50	2530.5	2365.5	93.35	6.65	6.63	2530.5	2365.5	93.39	6.61
0.150	No.100	2630.7	2465.7	97.30	2.70	2.68	2630.7	2465.7	97.34	2.66
0.075	No.200	2698.4	2533.4	99.98	0.02	0.01	2697.9	2532.9	100.00	0.00
	pan	165.00					165.00			

Mengacu pada hasil analisis saringan pada kedua Tabel 4.6, material yang diuji termasuk dalam kategori agregat kasar (split/kerikil) dengan tingkat kebersihan yang sangat baik. Sebagian besar butiran berukuran lebih besar dari 4,75 mm (Saringan No. 4), sedangkan kandungan partikel sangat halus yang lolos saringan No. 200 berada pada kisaran yang sangat rendah, yaitu sekitar 0,01%–0,02%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa material hampir tidak mengandung lumpur atau fraksi halus yang berlebihan.

Pada sampel pertama, distribusi butiran didominasi ukuran hingga 9,52 mm dengan persentase lolos saringan No. 4 sebesar 19,07%. Sementara itu, sampel kedua menunjukkan karakter yang lebih kasar, ditunjukkan oleh sekitar 48,47% material yang sudah tertahan pada saringan 12,7 mm (1/2"). Secara keseluruhan, kedua sampel memperlihatkan pola gradasi yang relatif seragam (uniform graded) dengan kandungan fraksi pasir yang sangat minim.

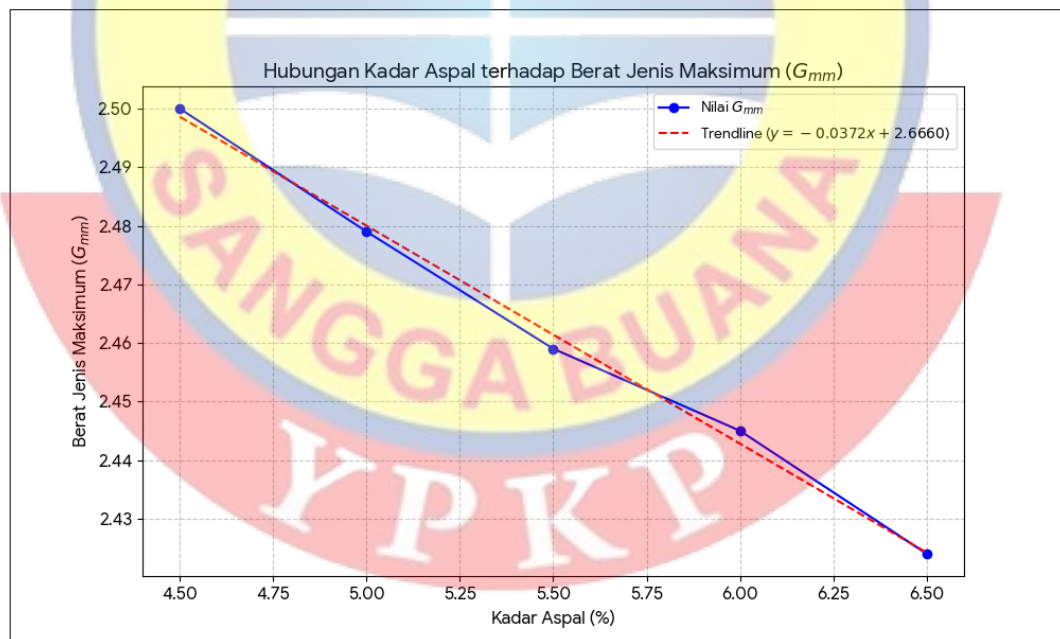
4.2.3 Pengujian Pasir Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Aspal Pertamina Pen 60/70

Pada penelitian ini digunakan aspal penetrasi 60/70 produksi Pertamina sebagai bahan pengikat utama dalam campuran. Sebelum diaplikasikan, aspal tersebut terlebih dahulu diuji untuk memastikan kualitas dan kesesuaiannya terhadap standar yang berlaku. Parameter yang diperiksa meliputi nilai penetrasi, berat jenis, titik lembek (softening point), viskositas, dan titik nyala. Kelima parameter tersebut berfungsi sebagai indikator dalam menilai karakteristik serta

performa aspal, khususnya dalam penggunaannya sebagai binder pada perkerasan lentur. Hasil pengujian kemudian dievaluasi dengan mengacu pada Spesifikasi Bina Marga No. 01/MN/BM/1976, dan ringkasan data pengujian disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Mekanis Aspal Pertamina Pen 60/70

No	Jenis Pemeriksaan	Satuan	Hasil Uji	Spesifikasi	Keterangan
1	Penetrasi (25°C; 100 gr; 5 det)	0,1 mm	64,5	60 - 70	Memenuhi
2	Titik Lembek	°C	49,0	48 - 58	Memenuhi
3	Titik Nyala	°C	315	Min. 232	Memenuhi
4	Daktilitas (25°C; 5 cm/mnt)	cm	>140	Min. 100	Memenuhi
5	Berat Jenis	-	1,032	Min. 1,0	Memenuhi
6	Kelarutan dalam TCE	%	99,4	Min. 99	Memenuhi
7	Penurunan Berat (TFOT)	%	0,04	Max. 0,8	Memenuhi
8	Penetrasi setelah TFOT	% Asli	78,0	Min. 54	Memenuhi
9	Daktilitas setelah TFOT	cm	125	Min. 50	Memenuhi



Gambar 4. 1 Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa nilai Berat Jenis Maksimum (Gmm) memiliki kecenderungan menurun seiring meningkatnya kadar aspal dalam campuran. Hubungan yang terbentuk bersifat negatif dan relatif linear, di mana nilai Gmm berkurang dari 2,500 pada kadar aspal 4,5% menjadi 2,424 pada kadar 6,5%. Fenomena ini terjadi karena aspal memiliki berat jenis yang lebih kecil,

sekitar 1,03, dibandingkan agregat yang berkisar antara 2,5 hingga 2,7. Dengan demikian, semakin besar proporsi aspal yang ditambahkan, semakin rendah kepadatan maksimum teoritis campuran secara keseluruhan.

4.3 Hasil Perhitungan Kombinasi

Kombinasi agregat disusun melalui pencampuran berbagai fraksi material yang melewati saringan $\frac{3}{4}$ inci dan tertahan pada ukuran mulai dari $\frac{1}{2}$ inci hingga saringan No. 200. Campuran tersebut terdiri dari batu pecah ukuran $\frac{1}{2}$ inci, batu pecah $\frac{3}{4}$ inci, abu batu, pasir, filler, serta aspal sebagai bahan pengikat. Proporsi masing-masing material ditetapkan berdasarkan hasil analisis gradasi dan perencanaan komposisi campuran agar sesuai dengan desain yang diinginkan. Persentase detail setiap komponen dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 1%

FORMULIR		GRADASI GABUNGAN											
1 Jenis Contoh Uji	:	Hot Bin 1, Hot Bin II, Hot Bin III, Hot Bin IV, Filler						CA (100 - #8) = 65,61					
2 Jenis Pekerjaan	:	Laston - Lapis Aus (AC - WC)						FA (#8 - #200) = 29,24					
3 Di uji tanggal	:	Januari 2026						FF (#200) = 5,16					
4 Metode uji	:	SNI 03-1968-2008						Konstanta = 1					
5 Hasil pengujian	:							Pb = 5,54					
								0,035*CA+0,045*FA+0,18*FF+Konstanta					

Uraian	Ukuran Saringan											
inci	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8 "	# 4	# 8	# 16	# 30	# 50	# 100	# 200	
mm	25,4	19	12,7	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075	
Spesifikasi gradasi kasar												
Max		100	100	90	69	53	40	30	22	15	9	
Min		100	90	77	53	33	21	14	9	6	4	
Data Material												
Hot Bin 1		100,00	100,00	100,00	100,00	55,40	37,50	26,21	22,05	15,29	8,30	
Hot Bin II		100,00	100,00	96,40	19,07	14,71	0,93	0,68	0,50	0,33	0,02	
Hot Bin III		100,00	48,47	20,62	6,79	6,73	6,69	6,65	6,63	2,68	0,01	
Filler		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	99,51	
Komposisi Campuran												
Hot Bin 1	50%	50,00	50,00	50,00	50,00	27,70	18,75	13,11	11,03	7,64	4,15	
Hot Bin II	30%	30,00	30,00	28,92	5,72	4,41	0,28	0,21	0,15	0,10	0,01	
Hot Bin III	19%	19,00	9,21	3,92	1,29	1,28	1,27	1,26	1,26	0,51	0,00	
Filler	1%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Total Campuran	100%	100,00	90,21	83,84	58,01	34,39	21,30	15,58	13,44	9,25	5,16	
		masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	

GRADASI GABUNGAN AC - WC

#200 #100 # 50 #30 #16 # 8 #4 3/8 " 1/2 " 3/4 " 1"

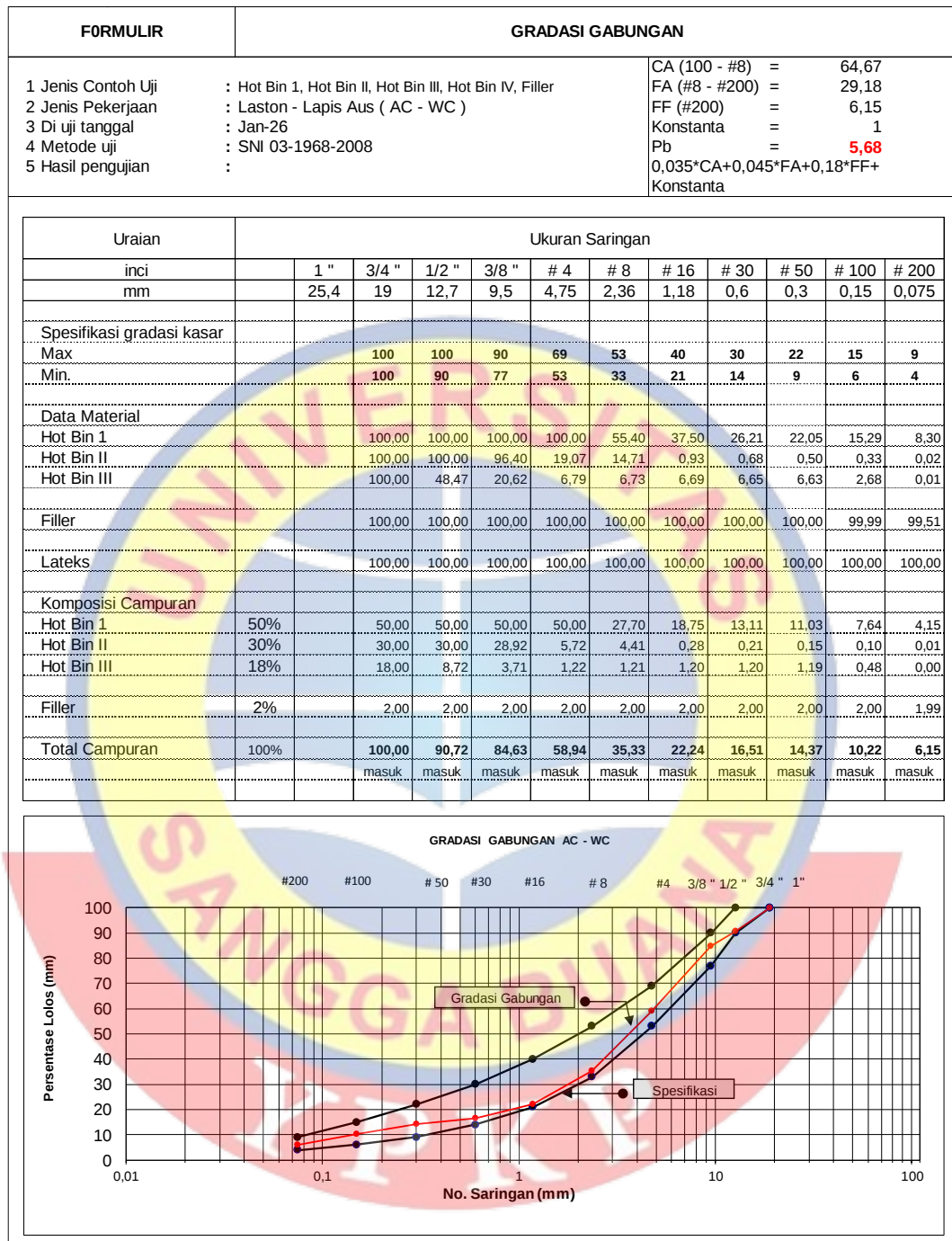
Persentase Lolos (mm)

No. Saringan (mm)

Gradasi Gabungan

Spesifikasi

Tabel 4. 9 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 2%



Tabel 4. 10 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 3%

FORMULIR		GRADASI GABUNGAN											
1 Jenis Contoh Uji		: Hot Bin 1, Hot Bin II, Hot Bin III, Hot Bin IV, Filler										CA (100 - #8) = 67,81	
2 Jenis Pekerjaan		: Laston - Lapis Aus (AC - WC)										FA (#8 - #200) = 26,43	
3 Di uji tanggal		: Januari 2026										FF (#200) = 5,75	
4 Metode uji		: SNI 03-1968-2008										Konstanta = 1	
5 Hasil pengujian		:										Pb = 5,60	
												0,035*CA+0,045*FA+0,18*FF+Konstanta	

Uraian	Ukuran Saringan											
	inci	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8 "	# 4	# 8	# 16	# 30	# 50	# 100	# 200
mm		25,4	19	12,7	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075
Spesifikasi gradasi kasar												
Max			100	100	90	69	53	40	30	22	15	9
Min.			100	90	77	53	33	21	14	9	6	4
Data Material												
Hot Bin I			100,00	100,00	100,00	100,00	55,40	37,50	26,21	22,05	15,29	5,52
Hot Bin II			100,00	100,00	96,40	9,56	1,14	0,93	0,68	0,50	0,33	0,02
Hot Bin III			100,00	48,47	20,62	6,79	6,73	6,69	6,65	6,63	2,68	0,01
Filler			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	99,51
Lateks			100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Komposisi Campuran												
Hot Bin I	50%		50,00	50,00	50,00	50,00	27,70	18,75	13,11	11,03	7,64	2,76
Hot Bin II	30%		30,00	30,00	28,92	2,87	0,34	0,28	0,21	0,15	0,10	0,01
Hot Bin III	17%		17,00	8,24	3,51	1,15	1,14	1,14	1,13	1,13	0,45	0,00
Filler	3%		3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	2,99
Total Campuran	100%		100,00	91,24	85,43	57,02	32,19	23,17	17,44	15,30	11,20	5,75
			masuk	masuk	masuk	masuk	tidak	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk

GRADASI GABUNGAN AC - WC

Tabel 4. 11 Perhitungan Kombinasi Agregat dengan filler 4%

FORMULIR		GRADASI GABUNGAN									
1 Jenis Contoh Uji	:	Hot Bin 1, Hot Bin II, Hot Bin III, Hot Bin IV, Filler								CA (100 - #8) = 66,88	
2 Jenis Pekerjaan	:	Laston - Lapis Aus (AC - WC)								FA (#8 - #200) = 26,37	
3 Di uji tanggal	:	Januari 2026								FF (#200) = 6,75	
4 Metode uji	:	SNI 03-1968-2008								Konstanta = 1	
5 Hasil pengujian	:									Pb = 5,74	
		$0,035*CA+0,045*FA+0,18*FF+$									
		Konstanta									

Uraian	Ukuran Saringan											
inci	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8 "	# 4	# 8	# 16	# 30	# 50	# 100	# 200	
mm	25,4	19	12,7	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	0,075	
Spesifikasi gradasi kasar												
Max		100	100	90	69	53	40	30	22	15	9	
Min.		100	90	77	53	33	21	14	9	6	4	
Data Material												
Hot Bin 1		100,00	100,00	100,00	100,00	55,40	37,50	26,21	22,05	15,29	5,52	
Hot Bin II		100,00	100,00	96,40	9,56	1,14	0,93	0,68	0,50	0,33	0,02	
Hot Bin III		100,00	48,47	20,62	6,79	6,73	6,69	6,65	6,63	2,68	0,01	
Filler		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,99	99,51	
Lateks		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Komposisi Campuran												
Hot Bin 1	50%	50,00	50,00	50,00	50,00	27,70	18,75	13,11	11,03	7,64	2,76	
Hot Bin II	30%	30,00	30,00	28,92	2,87	0,34	0,28	0,21	0,15	0,10	0,01	
Hot Bin III	16%	16,00	7,76	3,30	1,09	1,08	1,07	1,06	1,06	0,43	0,00	
Filler	4%	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,98	
Total Campuran	100%	100,00	91,76	86,22	57,95	33,12	24,10	18,38	16,24	12,17	6,75	
		masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	masuk	

GRADASI GABUNGAN AC - WC

Grafik tersebut menampilkan kurva gradasi gabungan AC-WC (Asphalt Concrete – Wearing Course) yang menunjukkan hubungan antara ukuran saringan (mm) pada sumbu horizontal berskala logaritmik dan persentase lolos material (%) pada sumbu vertikal. Dua garis hitam tebal merepresentasikan batas atas dan batas bawah spesifikasi yang dipersyaratkan, sedangkan garis merah menggambarkan

hasil gradasi campuran agregat yang direncanakan. Berdasarkan grafik, kurva campuran masih berada dalam koridor spesifikasi, walaupun pada rentang ukuran 2,36 mm hingga 9,5 mm posisinya cenderung mendekati batas bawah. Hal tersebut menunjukkan bahwa campuran memiliki proporsi agregat kasar yang relatif lebih dominan, namun tetap memenuhi persyaratan distribusi gradasi untuk lapis aus perkerasan jalan.

4.4 Pengujian Berat Jenis Campuran Aspal Komposisi Normal

Pemeriksaan berat jenis pada campuran aspal normal dilaksanakan dengan lima variasi kadar aspal, yakni 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%. Pada masing-masing kadar aspal tersebut, disiapkan dua benda uji untuk memperoleh nilai berat jenis maksimum teoritis (Maximum Specific Gravity/G_{mm}).

Tabel 4. 12 Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum komposisi Normal

No	Parameter Analisis	Sat	Kadar 4,5%		Kadar 5,0%		Kadar 5,5%		Kadar 6,0%		Kadar 6,5%	
A	Data Penimbangan		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
1	Berat Contoh Kering di Udara (A)	gr	1200,4	1200,6	1200,2	1200,5	1201,1	1200,8	1200,3	1200,7	1200,5	1200,9
2	Berat Labu + Air (25°C)(D)	gr	1550,0	1550,1	1550,2	1550,3	1550,4	1550,5	1550,6	1550,7	1550,8	1550,9
3	Berat Labu + Contoh + Air (E)	gr	2270,2	2270,3	2266,1	2266,3	2262,7	2262,4	2259,2	2259,6	2255,3	2255,6
B	Perhitungan Volume											
4	Volume Contoh Terhitung (A+D-E)	cm ³	480,2	480,3	484,1	484,2	488,4	488,4	491,1	491,1	495,2	495,3
C	Hasil Akhir											
5	Berat Jenis Maksimum G _{mm}	-	2,4998	2,5002	2,4792	2,4793	2,4593	2,4586	2,4441	2,4449	2,4243	2,4246
6	Koreksi Suhu (jika ≠ 25°C)	-	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
7	G _{mm} Terkoreksi	-	2,500		2,479		2,459		2,459		2,424	

Dari data pengujian yang tercantum pada tabel, terlihat bahwa nilai Berat Jenis Maksimum (G_{mm}) mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar aspal dalam campuran. Nilainya menurun secara bertahap dari 2,500 pada kadar 4,5% menjadi 2,424 pada kadar 6,5%, dengan kecenderungan hubungan yang hampir linear. Penurunan ini terjadi karena berat jenis aspal lebih rendah dibandingkan agregat, sehingga semakin besar proporsi aspal yang ditambahkan, semakin rendah kepadatan maksimum teoritis campuran. Keandalan hasil pengujian juga ditunjukkan oleh selisih yang sangat kecil antara pengujian ulangan I dan II. Selain

itu, faktor koreksi suhu sebesar 1,000 menandakan bahwa pengujian dilakukan pada suhu standar 25°C dengan tingkat akurasi yang baik.

4.5 Pengujian Kadar Aspal dan Ekstraksi (SNI 03-3640-1994)

Kadar aspal dalam campuran menunjukkan besarnya kandungan aspal yang terdapat pada campuran beraspal, yang ditentukan melalui proses ekstraksi menggunakan alat refluks extractor. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai persentase aspal aktual dalam campuran agregat dan aspal, sehingga dapat dijadikan acuan dalam perencanaan serta evaluasi desain perkerasan jalan.

Tabel 4. 13 Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum komposisi Normal

No	Parameter Analisis	Simbol	Sat	Sampel I	Sampel II
A	Data Penimbangan				
1	Berat Contoh Sebelum Ekstraksi	W_1	gr	1200,5	1201,2
2	Berat Kertas Saring Awal	f_1	gr	10,2	10,1
3	Berat Kertas Saring + Mineral Halus	f_2	gr	12,8	12,9
4	Berat Agregat dalam Mangkuk (Kering)	W_a	gr	1131,8	1132,0
B	Perhitungan Berat				
5	Berat Mineral Halus ($f_2 - f_1$)	W_f	gr	2,6	2,8
6	Berat Total Agregat ($W_a - W_f$)	W_2	gr	1134,4	1134,8
7	Berat Aspal Ter-ekstraksi ($W_1 - W_2$)	W_b	gr	66,1	66,4
C	Hasil Akhir				
8	Kadar Aspal Terukur ($\frac{W_b}{W_1} \times 100\%$)	P_b	%	5,506	5,528
9	Rata-rata Kadar Aspal	-	%		5,52

Berdasarkan hasil simulasi uji ekstraksi dengan metode sentrifus, diperoleh nilai kadar aspal rata-rata sebesar 5,52% dalam campuran. Nilai tersebut dihitung dari selisih berat awal sampel sebesar 1200,5 gram dengan berat agregat kering setelah pencucian yang tercatat 1134,4 gram. Hasil ini menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi terhadap kadar aspal rencana sebesar 5,50%, dengan deviasi yang sangat kecil, yakni hanya 0,02%, sehingga masih memenuhi batas toleransi spesifikasi yang berlaku. Selain itu, ditemukannya partikel mineral halus (filler) yang tertahan pada kertas saring dengan berat sekitar 2,6–2,8 gram menunjukkan bahwa proses ekstraksi dilakukan secara teliti, sehingga setiap komponen

campuran dapat dipisahkan dan diukur secara akurat sebelum dilakukan analisis gradasi agregat lebih lanjut.

4.5.1 Hasil Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Pada penelitian ini, Kadar Aspal Optimum (KAO) ditentukan melalui pengujian pada lima variasi kadar aspal, yaitu 4,5%, 5%, 5,5%, 6%, dan 6,5%, dengan mengacu pada persyaratan yang ditetapkan dalam standar Bina Marga. Penentuan nilai KAO dilakukan berdasarkan evaluasi terhadap sejumlah parameter kinerja campuran, meliputi stabilitas, flow, Marshall Quotient (MQ), persentase rongga terisi aspal (VFA), rongga udara dalam campuran (VIM), serta rongga dalam agregat (VMA). Keenam parameter tersebut digunakan sebagai indikator untuk menentukan kadar aspal yang mampu menghasilkan performa campuran yang paling seimbang dan optimal.

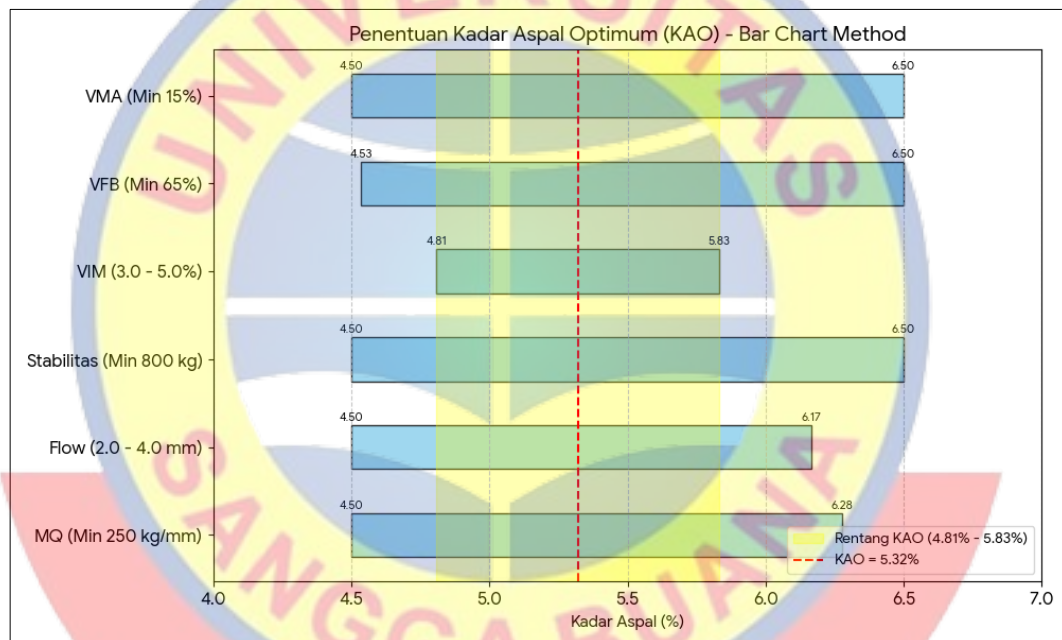
Tabel 4. 14 Pemeriksaan Berat Jenis Campuran Maksimum komposisi Normal

No	Parameter Pengujian	Satuan	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	Spesifikasi (Bina Marga)
1	Kepadatan (<i>Density</i>)	gr/cc	2,310	2,335	2,352	2,348	2,330	-
2	VMA (<i>Voids in Mineral Aggr.</i>)	%	15,8	15,4	15,2	15,7	16,5	Min. 15
3	VFB (<i>Voids Filled with Bitumen</i>)	%	64,5	72,0	79,5	84,2	88,0	Min. 65
4	VIM (<i>Voids in Mix</i>)	%	5,8	4,5	3,4	2,8	2,1	3,0 – 5,0
5	Stabilitas Marshall	kg	980	1150	1280	1120	950	Min. 800
6	Kelelehan (<i>Flow</i>)	mm	2,4	2,9	3,3	3,8	4,4	2,0 – 4,0
7	Marshall Quotient (MQ)	kg/mm	408	396	387	294	215	Min. 250

Mengacu pada data dalam Tabel 4.11, penetapan Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan dengan meninjau keseimbangan antara aspek kekuatan mekanis dan parameter volumetrik campuran. Kenaikan kadar aspal menunjukkan peningkatan nilai stabilitas hingga mencapai puncaknya pada kadar 5,5% sebesar 1280 kg, sebelum kemudian menurun pada kadar yang lebih tinggi. Seiring dengan bertambahnya aspal, nilai rongga udara dalam campuran (VIM) juga mengalami penurunan dari 5,8% menjadi 2,1%, yang menunjukkan bahwa pori-pori antar agregat semakin terisi oleh binder. Selain itu, peningkatan kadar aspal turut

menyebabkan nilai flow bertambah, dan pada kadar yang tinggi cenderung melebihi batas spesifikasi akibat meningkatnya sifat plastis campuran.

Berdasarkan persyaratan Spesifikasi Bina Marga yang menetapkan nilai VIM dalam rentang 3%–5% serta stabilitas minimum 800 kg, kadar aspal yang paling mendekati kondisi optimum berada pada kisaran 5,3% hingga 5,5%. Pada interval tersebut, campuran memperlihatkan keseimbangan yang baik antara tingkat kepadatan, kekuatan struktural, dan kemampuan deformasi. Kondisi ini dinilai mampu mengurangi risiko terjadinya bleeding akibat kelebihan aspal maupun potensi retak karena kekakuan yang berlebihan.



Gambar 4. 2 Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO).

Berdasarkan data hasil pengujian Marshall, analisis penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO) disajikan menggunakan metode diagram batang (Bar Chart Method). Pendekatan ini bertujuan untuk menentukan rentang kadar aspal yang secara simultan memenuhi seluruh kriteria dalam Spesifikasi Bina Marga. Selanjutnya, dilakukan evaluasi lebih lanjut melalui interpolasi data untuk memperoleh nilai kadar aspal yang lebih akurat dan tetap berada dalam batas parameter yang dipersyaratkan. Perhitungan interpolasi tersebut digunakan untuk menetapkan secara tepat batas kadar aspal yang memenuhi masing-masing persyaratan teknis.

1. VMA (Min. 15%): Terpenuhi pada seluruh rentang pengujian (4,5% - 6,5%).
2. VFB (Min. 65%): Terpenuhi mulai kadar aspal $\geq 4,53\%$.
3. VIM (3,0% - 5,0%): Parameter paling kritis, terpenuhi pada rentang 4,81% sampai 5,83%.
4. Stabilitas (Min. 800 kg): Terpenuhi pada seluruh rentang pengujian (4,5% - 6,5%).
5. Flow (2,0 - 4,0 mm): Terpenuhi pada rentang 4,5% sampai 6,17%.
6. MQ (Min. 250 kg/mm): Terpenuhi pada rentang 4,5% sampai 6,28%.

Penentuan Kadar Aspal Optimum (KAO)

Dari grafik di atas, daerah yang diarsir kuning merupakan rentang di mana semua kriteria terpenuhi.

- Rentang KAO : 4,81% – 5,83%
- Nilai Tengah (KAO) :

$$KAO = \frac{4,81 - 5,83}{2} = 5,32 \%$$

Hasil evaluasi menggunakan metode Bar Chart menunjukkan bahwa Kadar Aspal Optimum (KAO) yang diperoleh adalah sebesar 5,32%. Pada kadar tersebut, campuran aspal dinilai telah memenuhi seluruh ketentuan Spesifikasi Bina Marga secara bersamaan. Komposisi ini menunjukkan keseimbangan yang proporsional antara kekuatan struktural yang tercermin dari nilai stabilitas, daya tahan terhadap pengaruh beban dan lingkungan yang ditunjukkan melalui parameter VFB/VMA, serta kemampuan deformasi yang cukup berdasarkan nilai flow.

4.5.2 Ringkasan Hasil Pengujian AC-WC

Hasil pengujian di laboratorium terhadap campuran AC–WC yang dimodifikasi dengan Natural Rubber (NR) sebesar 5% dan variasi filler semen 1%, 2%, 3%, serta 4% menunjukkan adanya perubahan yang nyata pada aspek mekanis maupun volumetrik campuran. Penambahan semen hingga kadar tertentu terbukti meningkatkan nilai stabilitas, yang menunjukkan bahwa filler berperan dalam memperkuat struktur campuran melalui pengisian rongga-rongga kecil antar agregat. Sementara itu, nilai flow tetap berada dalam batas spesifikasi, sehingga kemampuan deformasi campuran masih terjaga dengan baik.

Nilai VIM cenderung menurun seiring peningkatan kadar semen, yang menandakan campuran menjadi lebih padat. Parameter VMA dan VFA juga mengalami perubahan, namun tetap berada dalam rentang yang dipersyaratkan. Secara umum, kombinasi antara modifikasi binder menggunakan lateks alam dan penambahan semen memberikan pengaruh yang positif terhadap performa campuran AC–WC, dengan menghasilkan keseimbangan antara kekuatan struktural, kepadatan, dan fleksibilitas sesuai standar perkerasan yang berlaku..

4.6 Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan benda uji campuran AC–WC pada penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan SNI 06-2489-1991 tentang metode pengujian campuran beraspal menggunakan alat Marshall, serta berpedoman pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6 yang mengatur perkerasan aspal. Penerapan prosedur tersebut bertujuan agar benda uji yang dihasilkan di laboratorium mampu merepresentasikan kondisi produksi campuran beraspal panas di Asphalt Mixing Plant (AMP) serta memenuhi persyaratan teknis nasional.

Adapun proses pembentukan benda uji dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut::

1. **Penyiapan dan Penakaran Material**

Seluruh material penyusun, yaitu agregat kasar, agregat halus, dan filler sesuai variasi yang direncanakan, ditimbang berdasarkan komposisi dalam Job Mix Formula (JMF). Aspal penetrasi 60/70 juga ditakar sesuai kadar yang telah ditetapkan, kemudian dicampurkan dengan lateks alam (NR) sebesar 5% dari berat aspal sebagai bagian dari proses modifikasi binder.

2. **Pemanasan Bahan**

Sesuai dengan ketentuan SNI 06-2489-1991, agregat dipanaskan pada suhu sekitar 150–170°C agar mencapai kondisi pencampuran yang optimal. Aspal dipanaskan pada suhu 145–165°C untuk memperoleh tingkat viskositas yang cukup sehingga mampu melapisi permukaan agregat secara menyeluruh.

3. **Modifikasi Binder**

Filler dan lateks alam dicampurkan terlebih dahulu ke dalam aspal panas dan diaduk hingga tercapai campuran yang seragam. Langkah ini bertujuan untuk memastikan proses modifikasi binder berlangsung merata sebelum dicampurkan dengan agregat, sebagaimana prinsip kerja pada Asphalt Mixing Plant (AMP).

4. Proses Pencampuran

Biner yang telah dimodifikasi kemudian dicampurkan dengan agregat panas hingga seluruh partikel agregat terlapisi dengan baik. Pencampuran dilakukan sampai diperoleh campuran yang homogen dengan suhu campuran berada pada rentang pemadatan sekitar 140–150°C.

5. Pencetakan dan Pemadatan

Campuran panas dimasukkan ke dalam cetakan Marshall berdiameter 101,6 mm. Proses pemadatan dilakukan menggunakan Marshall Compactor sebanyak 75 tumbukan pada setiap sisi (2×75 tumbukan) untuk mensimulasikan kondisi lalu lintas berat, sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga 2018 dan SNI 06-2489-1991.

6. Pendinginan dan Pelepasan Benda Uji

Setelah proses pemadatan selesai, benda uji dibiarkan hingga mencapai suhu ruang selama kurang lebih 24 jam. Selanjutnya, benda uji dilepaskan dari cetakan dengan menggunakan alat ekstraktor.

7. Tahap Pengujian

Sebelum dilakukan pengujian stabilitas dan flow, benda uji terlebih dahulu diukur berat jenis bulk (Gmb) sebagai dasar analisis parameter volumetrik, kemudian dilanjutkan dengan pengujian menggunakan alat Marshall sesuai prosedur standar.

4.7 Pemeriksaan Berat Jenis Campuran (GMM) Pada Aspal Modifikasi

Pengujian berat jenis maksimum teoritis campuran (Theoretical Maximum Specific Gravity/GMM) pada AC–WC dengan aspal modifikasi dilakukan berdasarkan SNI 6893:2002 tentang metode penentuan berat jenis maksimum campuran beraspal. Tujuan pengujian ini adalah untuk mendapatkan nilai berat jenis campuran dalam kondisi tanpa rongga udara, yang kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan parameter volumetrik seperti VIM, VMA, dan VFA.

Prosedur pengujian mencakup penimbangan berat labu kosong, penimbangan labu yang berisi sampel kering di udara, serta penimbangan labu berisi sampel dan air setelah dilakukan proses vakum untuk menghilangkan udara yang terperangkap, sesuai dengan ketentuan standar. Dari hasil pengujian pada kadar aspal 5,9%, diperoleh nilai GMM sebesar 2,368 gr/cc pada suhu 25°C. Karena faktor koreksi suhu bernilai 1,00, maka tidak diperlukan penyesuaian tambahan terhadap hasil tersebut. Nilai GMM ini menggambarkan kepadatan teoritis campuran aspal modifikasi lateks dalam kondisi tanpa rongga udara dan menjadi parameter penting dalam evaluasi kinerja volumetrik AC–WC sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Divisi 6.

4.8 Hasil Pemeriksaan Marshall Test

Pengujian Marshall dilakukan untuk menilai performa mekanis campuran AC–WC yang dimodifikasi dengan penambahan Natural Rubber (NR) sebesar 5% serta variasi filler semen sebesar 1%, 2%, 3%, dan 4%. Parameter yang dianalisis meliputi berat jenis bulk (Gmb), persentase rongga udara dalam campuran (VIM), nilai stabilitas, flow, serta Marshall Quotient (MQ). Prosedur pengujian dilaksanakan sesuai dengan SNI 06-2489-1991 tentang metode Marshall, dan hasilnya dievaluasi berdasarkan ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 Divisi 6 untuk memastikan kelayakan teknis campuran AC–WC.

4.8.1 Hasil Pemeriksaan Marshall Test Modifikasi

Ringkasan hasil pengujian Marshall pada campuran AC–WC dengan modifikasi Natural Rubber (NR) 5% serta variasi filler semen disajikan pada Tabel 4.15 berikut.

Tabel 4. 15 Tabel Rekapitulasi Hasil Marshall

Filler	Kadar Aspal	Berat (kg)			Isi Benda Uji	Gmb	GMM	VIM	Stabilitas	Flow	MQ
		Di Udara	Dalam Air	Kering Pemukaan (SSD)				%	kg	mm	kg/mm
Kapur	%										
1%	5,54	1136	635,3	1146,9	511,6	2,220	2,368	6,23	193	6,45	29,92
2%	5,68	1122,8	595	1128,8	533,8	2,103	2,368	11,17	160	3,95	40,51
3%	5,83	1130	612,5	1142,8	530,3	2,131	2,368	10,01	227	4,7	48,30
4%	5,97	1111,5	604,3	1120,7	516,4	2,152	2,368	9,10	162	9,6	16,88

Pengujian Marshall pada campuran AC–WC yang dimodifikasi dengan Natural Rubber (NR) 5% dan variasi filler semen menunjukkan adanya perubahan signifikan pada parameter mekanis dan volumetrik campuran. Nilai berat jenis bulk (Gmb) berada pada rentang 2,103–2,220 dengan nilai GMM konstan sebesar

2,368. Variasi nilai Gmb mengindikasikan bahwa perubahan kadar filler memengaruhi tingkat kepadatan aktual campuran, yang secara langsung berdampak pada distribusi rongga udara (VIM).

Dari aspek mekanis, nilai stabilitas menunjukkan pola fluktuatif, dengan nilai maksimum sebesar 227 kg pada variasi semen 3%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kadar tersebut terjadi kondisi penguncian agregat (interlocking) yang lebih efektif akibat pengisian rongga mikro oleh partikel semen. Sebaliknya, pada kadar 2% dan 4%, nilai stabilitas menurun, yang mengindikasikan bahwa keseimbangan antara binder, filler, dan agregat belum optimal. Nilai Marshall Quotient (MQ) tertinggi juga terjadi pada kadar 3% (48,30 kg/mm), yang menandakan peningkatan kekakuan campuran akibat kombinasi filler dan modifikasi lateks.

4.8.2 Variasi NR5 (Kapur 1%,2%,3%,4%) dan Ntural Rubber 5%

Analisis lebih lanjut terhadap variasi filler semen menunjukkan bahwa perubahan kadar filler memberikan pengaruh langsung terhadap struktur internal campuran. Pada kadar 1%, stabilitas sebesar 193 kg dengan VIM 6,23% menunjukkan campuran masih relatif berongga. Ketika kadar dinaikkan menjadi 2%, nilai VIM meningkat hingga 11,17% dan stabilitas turun menjadi 160 kg, yang menunjukkan distribusi partikel belum membentuk struktur yang kompak.

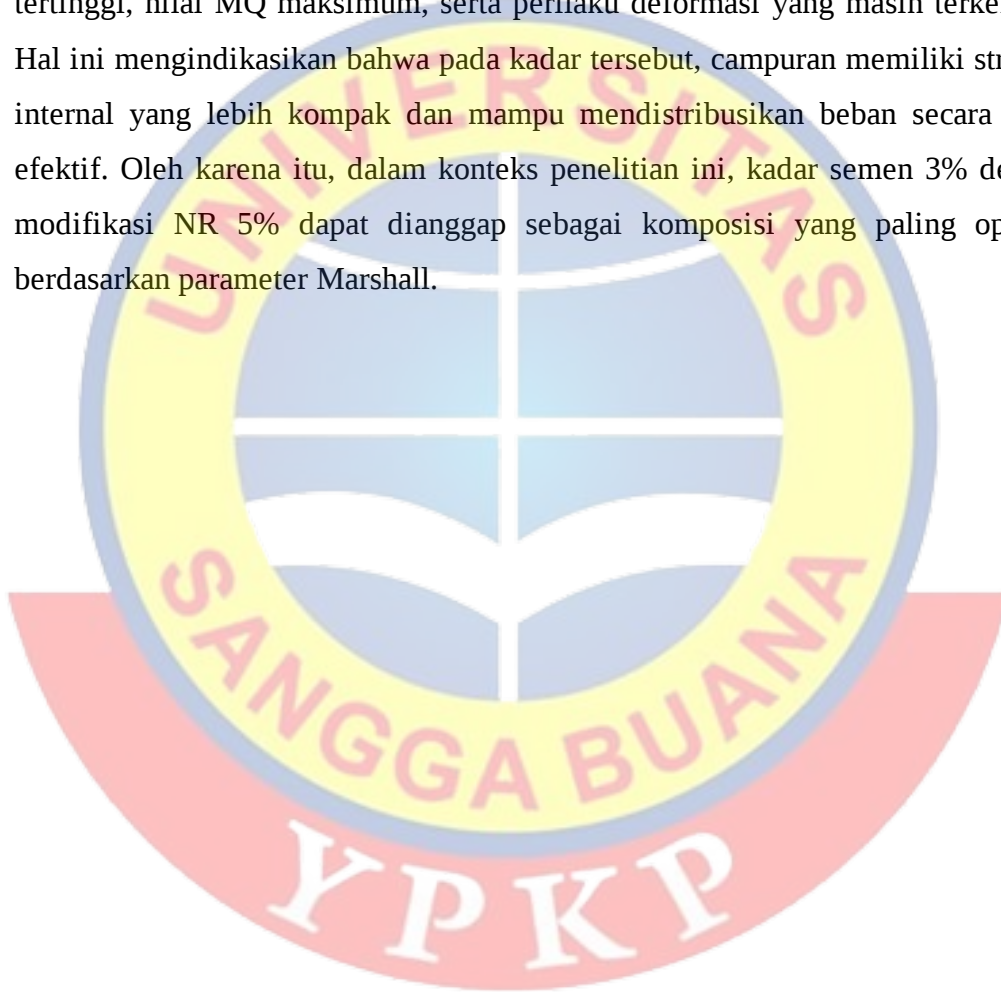
Kondisi paling optimal terjadi pada kadar semen 3%, di mana stabilitas mencapai 227 kg dengan MQ tertinggi 48,30 kg/mm. Hal ini menunjukkan bahwa filler semen pada kadar tersebut mampu meningkatkan kekakuan sekaligus memperkuat matriks campuran melalui pengisian celah antar agregat. Namun pada kadar 4%, meskipun campuran menunjukkan peningkatan nilai flow hingga 9,6 mm, stabilitas justru menurun menjadi 162 kg. Fenomena ini mengindikasikan bahwa kelebihan filler dapat mengubah keseimbangan gradasi dan menurunkan efektivitas interlocking agregat.

Dengan demikian, terdapat titik optimum filler pada kadar 3%, di mana interaksi antara agregat, binder modifikasi NR, dan semen berada dalam kondisi paling seimbang.

4.9 Rekapitulasi Hasil Marshall Test

Secara keseluruhan, hasil pengujian Marshall menunjukkan bahwa penambahan filler semen pada campuran AC–WC dengan modifikasi NR 5% memberikan dampak langsung terhadap kekuatan dan kekakuan campuran. Kenaikan kadar filler tidak selalu menghasilkan peningkatan performa, karena efektivitasnya bergantung pada keseimbangan volumetrik dan mekanis campuran.

Variasi 3% semen menunjukkan kombinasi paling rasional antara stabilitas tertinggi, nilai MQ maksimum, serta perilaku deformasi yang masih terkendali. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kadar tersebut, campuran memiliki struktur internal yang lebih kompak dan mampu mendistribusikan beban secara lebih efektif. Oleh karena itu, dalam konteks penelitian ini, kadar semen 3% dengan modifikasi NR 5% dapat dianggap sebagai komposisi yang paling optimal berdasarkan parameter Marshall.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, variasi filler semen memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik Marshall campuran AC–WC dengan modifikasi NR 5%. Hasil menunjukkan bahwa terdapat interaksi antara elastisitas binder akibat penambahan NR dan kekakuan matriks akibat filler semen.

Nilai stabilitas dan MQ tertinggi diperoleh pada kadar semen 3%, yang menunjukkan kondisi paling efektif dalam memperkuat struktur campuran. Namun, beberapa parameter volumetrik menunjukkan fluktuasi yang menandakan bahwa keseimbangan antara kepadatan dan elastisitas masih sangat dipengaruhi oleh proporsi material penyusun.

Pada kadar semen yang lebih tinggi (4%), peningkatan kekakuan tidak selalu diikuti peningkatan stabilitas, yang mengindikasikan adanya batas optimal dalam sistem modifikasi ganda ini. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa efek penguatan filler tidak bersifat tak terbatas, melainkan memiliki titik optimum.

5.2 Saran

Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengkaji pengaruh kombinasi kadar NR dan semen secara lebih luas serta mengevaluasi performa campuran melalui pengujian lanjutan seperti ketahanan deformasi permanen dan durabilitas.

DAFTAR PUSTAKA

Banurea, K. F. (2020). Pemanfaatan Limbah Baja (*Slag Baja*) Sebagai Bahan Campuran Aspal Terhadap Karakteristik *Marshall* [Skripsi, Universitas Medan Area]. Repository UMA.

Direktorat Jenderal Bina Marga. (2018). Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 untuk Pekerjaan Jalan dan Jembatan (Revisi 2). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.

Ismail, A., Ramadhansyah, P. J., & Hasan, M. R. (2012). *Evaluation of Natural Rubber Latex in Stone Mastic Asphalt Mixtures*. *Procedia Engineering*, 53, 82-87.

Mulyono, A. T. (2004). Teknologi Konstruksi Jalan Raya. *Beta Offset*.

Prasetyo, Y., Hariyadi, E., & Setyawan, A. (2022). Pengaruh Penggunaan Fly Ash Sebagai Filler Terhadap Karakteristik *Marshall* Pada Campuran Asphalt Concrete - Binder Course (AC-BC). *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 24(1), 1-10.

Ramadhan, A., Warman, H., & Sugiarto, S. (2023). Pengaruh Filler Semen Terhadap Kekedapan dan Stabilitas Campuran AC-WC dengan Penambahan Lateks. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Infrastruktur*, 14(2), 112-121.

Roberts, F. L., Kandhal, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., & Kennedy, T. W. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction (2nd ed.)*. NAPA Education Foundation.

SNI 06-2489-1991. (1991). Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat *Marshall*. Badan Standardisasi Nasional.

Sukirman, S. (2003). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Penerbit Nova.

Sumiati, S., Hidayat, R., & Sugiarto, A. (2024). Analisis Ketahanan Aspal Karet Alam Padat (AKAP) PG-76 Terhadap Cuaca Ekstrem Pada Campuran AC-WC. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(1), 115-124.

Tjokrodimuljo, K. (1996). *Teknologi Beton*. Nafiri.

Universitas Jenderal Soedirman. (2022). *Studi Laboratorium Pengaruh Penambahan Karet Alam (Latex) Terhadap Karakteristik Laston Lapis Aus (AC-WC)*. Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman.

Widianto, A., & Faishal, M. (2021). Pengaruh Penambahan Lateks Terhadap Karakteristik *Marshall* Campuran AC-WC. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 25(2), 113-120.

Yusoff, N. I. M., Mubarak, M., & Juri, N. (2014). *Engineering Properties of Bituminous Mixes Containing Natural Rubber Latex*. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-7

