TUGAS AKHIR

PENGARUH PENAMBAHAN LIMBAH ABU ARANG KAYU JATI SEBAGAI SUBSTITUSI *FILLER* PADA CAMPURAN PERKERASAN JALAN TERHADAP KARAKTERISTIK JENIS *STONE MATRIX ASPHALT* (*SMA*)

(*THE EFFECT OF ADDING TEAK WOOD CHARCOAL ASH WASTE AS A FILLER SUBSTITUTION IN ROAD PAVEMENT MIXTURES ON THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) TYPES*)

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil

Disusun Oleh:

Rafi Putra Roni

20511049

PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2025

TUGAS AKHIR

PENGARUH PENAMBAHAN LIMBAH ABU ARANG KAYU JATI SEBAGAI SUBSTITUSI *FILLER* PADA CAMPURAN PERKERASAN JALAN TERHADAP KARAKTERISTIK JENIS *STONE MATRIX ASPHALT (SMA)*

(*THE EFFECT OF ADDING TEAK WOOD CHARCOAL ASH WASTE AS A FILLER SUBSTITUTION IN ROAD PAVEMENT MIXTURES ON THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) TYPES*)

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil

Disusun oleh

Rafi Putra Roni

20511049

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk

memperoleh derajat Sarjana Teknik sipil

Diuji pada tanggal 27 Agustus 2025

Oleh Dewan Penguji

Dosen Pembimbing	Penguji I	Penguji II
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Prayogo Afang Pravitno, S.T., M.Sc.	Anggit Mas Arifuddin, S.T., M.T.
NIK : 215111307	NIK : 205111303	NIK : 185111304

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil

25/9 2025

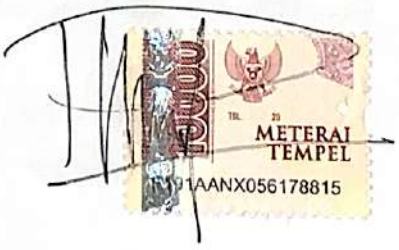
Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D (Eng)., IPM

NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 18 Juli 2025
Yang membuat pernyataan,



Rafi Putra Roni
(20511049)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji Syukur kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik dan hidaya-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Pemanfaatan Limbah Abu Arang Kayu Jati Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt.* Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

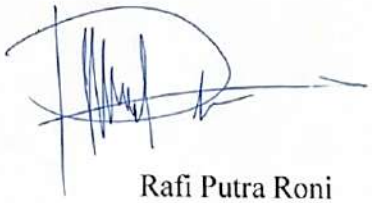
1. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing tugas akhir, yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penyusunan tugas akhir.
2. Bapak Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc. dan Bapak Anggit Mas Arifuddin, S.T., M.T. selaku penguji 1 dan 2 yang telah menguji hasil penelitian saya.
3. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng.) selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, yang telah memberikan semangat dan dukungan selama proses perkuliahan.
4. Para staff Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan UII, yang telah membantu menyelesaikan penelitian.
5. Kedua orang tua, Bapak Akhmad hamaroni dan Ibu Maryanti serta kedua Kakak kandung Saya, M. Al Fiqih Amaryan Roni dan Lufi Luqman Roni yang selalu memberikan motivasi, semangat, do'a, serta dukungan yang tulus dan tiada henti kepada penulis sehingga penulis bisa sampai pada titik

ini, dan

6. Rekan Laboratorium, Gading Ananda Syahri dan Ardhya Alga Lingga.
7. Teman-teman yang selalu memberikan nasihat dan dukungan selama penyusunan Laporan Tugas Akhir Dapeng, Pace, Jalu, CT, Bob, Fadhil, Gading, dan azka luwak.
8. Dan terakhir berterimakasih kepada diri saya sendiri, karena telah selesai mengerjakan Laporan Tugas Akhir ini dengan segala perjuangan, kerja keras, dan semangat yang membara.

Saya mohon maaf apabila terdapat kesalahan penulisan dan sebagaimana, Saya berharap Laporan Tugas Akir ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun orang lain.

Yogyakarta, 20 Juli 2025
Yang membuat pernyataan,



Rafi Putra Roni
(20511049)

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR i

TUGAS AKHIR ii

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI vi

DAFTAR GAMBAR xii

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Tujuan Penelitian 3

1.4 Manfaat Penelitian 4

1.5 Batasan Penelitian 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6

2.1 Tinjauan Pustaka 6

2.2 Fungsi *Filler* Pada Campuran Aspal Agregat Aspal 6

2.3 Pemanfaatan Limbah Abu Arang Kayu Sebagai Material Pengganti *Filler* 7

2.4 Rekayasa Subtitusi Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 8

2.5 Perbandingan Penelitian Trdahulu Dengan Penelitian Yang Telah Dilaksanan 10

BAB III LANDASAN TEORI 14

3.1 Perkerasan Jalan 14

3.2 Limbah Abu Arang Kayu Jati 14

3.3 Material Penyusun Perkerasan Jalan 15

3.3.4 Gradasi Agregat 18

3.4 *Stone Matrix Asphalt* (SMA) 19

3.5 Karakteristik Campuran Lapis Perkerasan Jalan 20

3.5.1 Stabilitas (*Stability*) 20

3.5.2 Daya Tahan (*Durability*) 21

3.6 Karakteristik Pengujian *Marshall* 21
3.6.1 Stabilitas (*Stability*) 21
3.6.2 Kepadatan (*Density*) 21
3.6.3 Kelelehan (*Flow*) 22
3.6.4 *Void in the Total Mix* (VITM) 22
3.6.5 *Void Filled With Asphalt* (VFWA) 23
3.6.6 *Void in Mineral Agregate* (VMA*)* 23
3.6.7 *Marshall Quotient (*MQ) 24
3.7 Pengujian *Index of Retained Strength* (IRS) 24
3.8 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS) 24
3.9 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (TSR) 25
3.10 Pengujian *Cantabro Loss* (CL) 25
3.11 Pengujian *Draindown* (DD) 26
BAB IV METODE PENELITIAN 27
4.1 Metode Penelitian 27
4.2 Metode Pengambilan Sampel 27
4.3 Metode Pengambilan Data 27
4.4 Tahapan Penelitian 27
4.4.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material 27
4.4.2 Persiapan Alat 30
4.4.3 Perencanaan Campuran 31
4.4.4 Pembuatan Campuran Benda Uji 38
4.4.5 Pengujian *Marshall* 39
4.4.6 Pengujian ITS 40
4.4.7 Pengujian TSR 40
4.4.8 Pengujian IRS 40
4.4.9 Pengujian DD 40
4.4.10 Pengujian CL 41
4.5 Analisis Data 41
4.5.1 Analisis Karakteristik *Marshall* 41
4.5.2 Analisis Pengujian IRS 43

4.5.3 Analisis Pengujian ITS 43
4.5.4 Analisis Pengujian TSR 43
4.5.5 Analisis Pengujian CL 43
4.5.6 Analisis Pengujian DD 43
4.6 Bagan Alir Penelitian 43
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 46
5.1 Hasil Pengujian Bahan Dan Campuran 46
5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 46
5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat 46
5.1.3 Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum 47
5.1.4 Hasil Pengujian Campuran pada Kadar Aspal Optimum 50
5.2 Pembahasan 53
5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 53
5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar 54
5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus 55
5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*) 56
5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran untuk Menentukan KAO 56
5.2.6 Karakteristik MS pada KAO Campuran dengan Substitusi Filler Abu Arang Kayu Jati 63
5.2.7 Karakteristik Pengujian VCA pada KAO Campuran dengan Substitusi *filler* Abu Arang Kayu Jati 74
5.2.8 Karakteristik Pengujian DD pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati 75
5.2.9 Karakteristik Pengujian CL pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati 76
5.2.10 Karakteristik Pengujian ITS pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu jati 77
5.2.11 Karakteristik Pengujian TSR pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati 79

5.2.12 Karakteristik Pengujian IRS pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati 81
5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran Menggunakan Substitusi Filler Abu Arang Kayu Jati 82
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 86
6.1 Kesimpulan 86
6.2 Saran 87
DAFTAR PUSTAKA 88

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Dilaksanakan	11
Tabel 3.1	Komposisi Karakterisasi	15
Tabel 3.2	Pengujian dan Persyaratan Aspal Keras Pen 60/70	16
Tabel 3.3	Persyaratan Agregat Halus Pada Campuran *Stone Matrix Asphalt*	17
Tabel 3.4	Persyaratan Agregat Kasar Pada Campuran *Stone Matrix Asphalt*	17
Tabel 3.5	Persyaratan Serat Selulosa	19
Tabel 3.6	Persyaratan Campuran *Stone Matrix Ashphalt*	20
Tabel 4.1	Gradasi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm	32
Tabel 4.2	Kebutuhan Agregat pada kadar aspal 5%	33
Tabel 4.3	Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5,5%	34
Tabel 4.4	Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6%	34
Tabel 4.5	Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6,5%	34
Tabel 4.6	Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 7%	35
Tabel 4.7	Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO	35
Tabel 4.8	Jumlah Benda Uji Untuk Subsitusi *Filler* Abu Serbuk Kayu pada KAO	36
Tabel 4.9	Kebutuhan Agregat Pada Variasi Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 0%	36
Tabel 4.10	Kebutuhan Agregat Pada Variasi Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 25%	37
Tabel 4.11	Kebutuhan Agregat Pada Variasi Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 50%	37
Tabel 4.12	Kebutuhan Agregat Pada Variasi Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 75%	37
Tabel 4.13	Kebutuhan Agregat Pada Variasi Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 100%	38
Tabel 5.1	Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70	46

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Agregat Kasar 47
Tabel 5.3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng 47
Tabel 5.4 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler* 47
Tabel 5.5 Hasil Pengujian Untuk Menentukan KAO 48
Tabel 5.6 Berat Debu Batu dan Abu Arang Kayu Jati 49
Tabel 5.7 Rekapitulasi Pengujian Marshall pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati 50
Tabel 5.8 Rekapitulasi Pengujian Nilai VCA pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati 51
Tabel 5.9 Rekapitulasi Pengujian DD pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati 51
Tabel 5.10 Rekapitulasi Pengujian IRS pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati 51
Tabel 5.11 Rekapitulasi Pengujian ITS pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati 52
Tabel 5.12 Rekapitulasi Nilai TSR pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Serbuk Arang Jati 52
Tabel 5.13 Rekapitulasi Pengujian CL pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati 52
Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan Subtitusi Abu Arang Kayu Jati 83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Limbah Abu Arang Kayu Jati	15
Gambar 4.1	Grafik Gradasi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm	32
Gambar 4.2	Bagan Alir Penelitian	44
Gambar 5.1	Penentuan KAO dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati 0%	48
Gambar 5.2	Abu Arang Kayu Jati	50
Gambar 5.3	Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas	57
Gambar 5.4	Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow*	58
Gambar 5.5	Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VITM	60
Gambar 5.6	Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VMA	61
Gambar 5.7	Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VCA	62
Gambar 5.8	Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai DD	63
Gambar 5.9	Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai IRS	63
Gambar 5.10	Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VITM	68
Gambar 5.11	Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VFWA	70
Gambar 5.12	Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VMA	71
Gambar 5.13	Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Density*	73
Gambar 5.14	Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Stabilitas	64
Gambar 5.15	Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Flow*	66
Gambar 5.16	Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai MQ	67

Gambar 5.17 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VCA 74
Gambar 5.18 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap DD 75
Gambar 5.19 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap CL 76
Gambar 5.20 Grafik Pengaruh Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap ITS 78
Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap TSR 79
Gambar 5.22 Grafik Hubungan antara Rendaman dan Stabilitas 86
Gambar 5.23 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap IRS 81

DAFTAR NOTASI

A0	= Konstanta
A	= Persentase agregat dan aspal yang tertinggal (%)
B	= Berat akhir piring penampung (gr)
C	= Berat awal jumlah campuran yang diuji (gr)
a	= Persentase aspal terhadap batu
b	= Persentase aspal terhadap campuran
c	= Berat benda uji sebelum direndam (gr)
d	= Berat benda uji dalam keadaan jenuh (SSD) (gr)
e	= Berat dalam air (gr)
f	= Volume (cm3)
g	= Berat isi sampel (gr/cc)
GCA	= Berat jenis bulk dari fraksi campuran agregat kasar
Gmb	= Berat jenis bulk dari campuran aspal yang telah dipadatkan
h	= Berat jenis maksimum teoritis campuran
L	= Persentase kehilangan berat (%)
l	= Nilai VMA (%)
m	= Nilai rongga terisi aspal (VFWA) (%)
MQ	= Nilai *Marshall Quotient* (kg/mm)
Mo	= Berat sebelum diabrasi (gr)
Mi	= Berat setelah diabrasi (gr)
n	= Nilai rongga dalam campuran (VITM) (%)
PCA	= Persentase campuran agregat kasar dalam total campuran aspal
q	= Nilai stabilitas (kg)
r	= Nilai *flow* (mm)
r	= Indeks penurunan stabilitas (%)
S1	= Stabilitas setelah direndam selama 0,5 jam

S2 = Stabilitas setelah direndam selama 24 jam

S1 = Rata-rata nilai ITS tanpa rendaman

S2 = Rata-rata nilai ITS setelah perendaman 24 jam (kg)

t1+1 = Periode perendaman

Vs = Volume silinder takaran (m3)

Ws = Berat silinder takaran (kg)

Ws+w = Berat silinder takaran dengan air (kg)

Yw = Kepadatan atau berat satuan air pada suhu tertentu (kg/ m3)

Yw = Berat satuan agregat kasar dalam kondisi *dry-roDDed* (kg/ m3)

DAFTAR SINGKATAN

ITS	= *Indirect Tensile Strength*
IRS	= *Index of Retained Strength*
TSR	= *Tensile Strength Ratio*
KAO	= Kadar Aspal Optimum
DD	= *Draindown*
MQ	= *Marshall Quotient*
CL	= *Cantabro Loss*
MS	= *Marshall Standart*
SMA	= *Stone Matrix Asphalt*
SNI	= Standar Nasional Indonesia
VITM	= *Void in the Total Mix*
VFWA	= *Void Filled With Asphalt*
VMA	= *Void in Mineral Agregate*
VCA	= *Void in Coarse Aggregate*
VCADRC	= *Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition*
VCAMIX	= *Void Coarse Aggregate Mix*
AAK	= Abu Arang Kayu
AAT	= Abu Ampas Tebu
ASP	= Abu Sekam Padi

ABSTRAK

Peningkatan limbah industri, khususnya dari sisa pembakaran kayu jati, memicu perlunya pemanfaatan kembali limbah tersebut dalam konstruksi berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh penggunaan abu arang kayu jati sebagai pengganti *filler* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) dengan variasi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Pengujian meliputi karakteristik *Marshall*, *Void in Coarse Aggregate* (VCA), *Indirect Tensile Strength* (ITS), *Tensile Strength Ratio* (TSR), *Index of Retained Strength* (IRS), *draindown*, dan *Cantabro Loss*, mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.

Pengujian diawali dengan pemeriksaan fisik agregat dan aspal, dilanjutkan penentuan KAO berdasarkan parameter stabilitas, *flow*, MQ, VITM, VMA, VCA, *draindown*, dan IRS. Campuran diuji dengan metode Marshall, ITS, TSR, IRS, VCA, DD, dan CL sesuai variasi substitusi *filler*.

Hasil menunjukkan kadar optimum 25% dengan stabilitas tertinggi 1028,53 kg. Penambahan *filler* 50% dan 100% menurunkan stabilitas menjadi 934,99 kg. *Flow* meningkat dari kadar subtitusi *filler* 25% hingga 100%, sedangkan MQ naik pada kadar subtitusi *filler* 25% lalu turun pada 75% dan 100%, namun masih memenuhi spesifikasi. IRS meningkat pada kadar subtitusi *filler* 0%, 25%, dan 50%, tetapi menurun pada 75% dan 100%. ITS tertinggi 454,14 kPa pada kadar subtitusi *filler* 25% lalu menurun hingga 100%. Nilai DD maksimum 0,03%, di bawah batas. CL meningkat dengan kadar *filler*, tertinggi 15,59% pada subtitusi *filler* 100%, namun tetap <20%. Secara keseluruhan, kadar subtitusi *filler* 25% memberikan kombinasi stabilitas tinggi, *flow* rendah, dan ketahanan terhadap air yang baik, sedangkan kadar 75% dan 100% menurunkan kinerja campuran.

Kata Kunci : Limbah Industri, Abu arang kayu jati, *Stone Matrix Asphalt, Filler, Marshall.*

ABSTRACT

The increase in industrial waste, particularly from teak wood combustion residues, underscores the need for its reuse in sustainable construction. This study aims to evaluate the effect of using teak wood charcoal ash as a filler substitute in Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures with substitution levels of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. The tests included Marshall characteristics, Void in Coarse Aggregate (VCA), Indirect Tensile Strength (ITS), Tensile Strength Ratio (TSR), Index of Retained Strength (IRS), draindown, and Cantabro Loss (CL), following the 2018 Bina Marga Specification Revision 2.

The experimental work began with physical testing of aggregates and asphalt, followed by determining the Optimum Asphalt Content (KAO) based on parameters such as stability, flow, Marshall Quotient (MQ), Void in the Total Mix (VITM), Void in Mineral Aggregate (VMA), VCA, draindown, and IRS. The mixtures were then tested using Marshall, ITS, TSR, IRS, VCA, DD, and CL methods according to the filler substitution variations.

The results showed an optimum substitution level of 25% with the highest stability of 1028.53 kg. Increasing the filler substitution to 50% and 100% reduced stability to 934.99 kg. Flow increased from 25% to 100% filler substitution, while MQ rose at 25% substitution but decreased at 75% and 100%, although it still met the specifications. IRS increased at 0%, 25%, and 50% substitution levels, but declined at 75% and 100%. The highest ITS value was 454.14 kPa at 25% substitution, then decreased up to 100%. The maximum DD value was 0.03%, below the limit. CL increased with higher filler content, peaking at 15.59% at 100% substitution, but remained under 20%. Overall, 25% filler substitution provided a combination of high stability, low flow, and good moisture resistance, while 75% and 100% substitution levels reduced the mixture performance.

Keywords *: Industrial Waste, Teak Wood Charcoal Ash, Stone Matrix Asphalt, Filler, Marshall.*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan industri perkayuan dan aktivitas pembakaran biomassa di sektor rumah tangga maupun industri telah menghasilkan limbah padat berupa abu arang kayu dalam jumlah yang signifikan. Abu arang kayu merupakan residu sisa pembakaran tidak sempurna dari kayu dan serbuk gergaji, yang umumnya hanya dibuang begitu saja ke lingkungan. Padahal, limbah ini berpotensi mencemari tanah dan air, serta menimbulkan gangguan estetika dan kesehatan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik.

Di sisi lain, dalam beberapa tahun terakhir, tren pembangunan berkelanjutan dan penggunaan bahan ramah lingkungan telah mendorong upaya pemanfaatan limbah industri sebagai bahan tambahan (*aditive*) pada material konstruksi. Dapat mempengaruhi kekuatan tekan, daya serap air, dan berat jenis material. Kegiatan industri pengolahan kayu serta penggunaan kayu sebagai bahan bakar dalam rumah tangga dan sektor industri menghasilkan sisa pembakaran berupa abu arang kayu. Limbah padat ini sering kali tidak dimanfaatkan dan hanya dibuang ke lingkungan sekitar. Jika terus menumpuk berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kualitas tanah dan air, serta menambah beban pencemaran lingkungan.

Abu arang kayu memiliki potensi yang belum dimanfaatkan secara maksimal yaitu hasil sisa dari proses pembakaran kayu pada temperatur tinggi menghasilkan material berwarna hitam dengan massa yang ringan, dimana sekitar 80% kandungannya terdiri dari karbon. Arang kayu ini terutama terdiri dari karbon, dengan kisaran 85% hingga 98%, sedangkan sisanya adalah abu atau zat kimia lainnya Putra dan Fidausi (2019).

Upaya pemanfaatan abu arang kayu tidak hanya berdampak pada peningkatan nilai guna limbah, tetapi juga dapat membantu mengurangi konsumsi bahan baku konvensional yang semakin terbatas. Selain itu, hal ini mendukung prinsip - prinsip

pembangunan berkelanjutan, yakni dengan menerapkan konsep pemanfaatan limbah sebagai sumber daya alternatif.

Abu arang kayu hasil pembakaran disaring menggunakan saringan No.200 agar diperoleh butiran yang halus. Sejalan dengan meningkatnya kenutuhan akan bahan bangunan dan percepatan laju konstruksi, diperlukan pencarian solusi alternatif dengan menggunakan sumber daya alam yang tersedia. Oleh karena itu, inovasi perlu dilakukan dengan memanfaatkan limbah sebagai bahan pengganti Simanjuntak, dkk (2021).

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan Wijaya, (2021) menyatakan bahwa abu arang diyakini memiliki sifat-sifat yang baik sebagai *filler* pemadat karena memiliki 2 sifat sementasi dan mempunyai ukuran butiran yang dapat dihaluskan. Selain itu juga penggunaan arang sebagai bahan *filler* pada konstruksi lapis perkerasan jalan menunjukan kinerja arang dalam campuran aspal panas HRS-WC cukup baik karena nilai-nilai parameter kinerjanya memenuhi persyaratan Bina Marga.

Perkerasan jalan merupakan lapisan perkerasan yang terletak di antara lapisan tanah dasar dan roda kendaraan, yang berfungsi memberikan pelayanan kepada sarana transportasi, dan selama masa pelayanannya diharapkan tidak terjadi kerusakan yang berarti. Campuran aspal yang mempunyai kadar aspal yang relatif tinggi dan dapat memenuhi sifat rongga yang terisi aspal sehingga daya tahan aspal meningkat adalah *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

SMA adalah suatu campuran lapis perkerasan beraspal panas yang digunakan sebagai lapis permukaan jalan, SMA menggunakan agregat kasar dan *filler*, yang disusun dalam susunan agregat bergradasi terbuka. Kadar *filler* pada campuran SMA relatif sedikit namun dapat memberi dampak yang besar dikarenakan dapat meningkatkan stabilitas dari campuran. *Filler* pada campuran aspal panas walaupun memiliki kandungan sekitar 1% sampai dengan 2% tetapi sangat mempengaruhi sifat aspal sebagai bahan pengikat Nofrianto, dkk (2021).

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menilai potensi penggunaan abu arang kayu jati sebagai substitusi *filler* dalam campuran SMA. Pengujian dalam studi ini mencakup *Marshall Test, Indirect Resilient Strength*

(IRS), *Indirect Tensile Strength* (ITS), *Draindown* (DD)*, Voids In Coarse Aggregate* (VCA*), dan Cantabro Loss* (CL). Limbah yang dihasilkan dari industri pengolahan kayu diharapkan dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan alternatif yang memiliki kinerja dan kualitas setara, atau bahkan melebihi *filler* konvensional seperti semen maupun abu batu.

1.2 Rumusan Masalah

Di dalam Tugas Akhir ini, masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh penggunaan pemanfaatan limbah abu arang kayu jati sebagai pengganti agregat halus untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekuatan struktural campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan pemanfaatan limbah abu arang kayu jati sebagai substitusi agregat halus terhadap karakteristik volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan pemanfaatan limbah abu arang kayu jati sebagai substitusi agregat halus terhadap durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah abu arang kayu jati sebagai substitusi agregat halus terhadap kekuatan struktur campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)?
2. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah abu arang kayu jati sebagai substitusi agregat halus terhadap karakteristik volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)?
3. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah abu arang kayu jati sebagai substitusi agregat halus terhadap durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)?

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah abu arang kayu jati sebagai bahan tambahan pada campuran aspal.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan limbah abu arang kayu jati sebagai pengganti *filler* terhadap durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA).
3. Memberikan pengetahuan dalam hal substitusi yang menggunakan abu arang kayu jati sebagai pengganti agregat halus, khususnya metode campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan penelitian dilakukan agar dapat terarah dan tepat sasaran, adalah sebagai berikut :

1. Campuran yang di teliti merupakan campuran bergradasi *Stone Matrix Asphalt* sesuai dengan SNI 8129:2015.
2. Bahan ikat yang digunakan adalah aspal Pertamina Pen 60/70.
3. Agregat kasar diperoleh dari yang ada di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
4. Agregat halus diperoleh dari yang ada di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
5. Dalam Perencanaan dan pengujian campuran karakteristik campuran dengan menggunakan metode *Marshall Standar.*
6. Penelitian ini dilakukan subsitusi *filler* dengan variasi kadar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap *filler* abu arang kayu jati.
7. Serat Selulosa yang digunakan adalah pabrikasi VIATOP^{66}.
8. Tidak meneliti dan menguji kandungan senyawa kimia yang terkandung pada pabrikasi VIATOP$^{66.}$
9. Bahan pengisi yang digunakan berupa debu batu dan abu arang kayu jati sebagai *filler* pengganti.

10. Limbah kayu jati hasil pengrajin mebel kayu jati TPK Kab. Jepara, Jawa Tengah.
11. Tinjauan pengujian terhadap struktural campuran aspal berdasarkan stabilitas, *flow,* MQ, ITS.
12. Tinjauan pengujian terhadap volumetrik campuran aspal berdasarkan VITM, VMA, VFWA, *Density.*
13. Tinjauan pengujian terhadap durabilitas campuran aspal berdasarkan IRS, TSR, DD, dan CL.
14. Tidak meneliti dan menguji kandungan unsur mineral yang terkandung pada limbah abu arang kayu jati.
15. Bahan aspal yang digunakan adalah aspal Pertamina dengan penetrasi 60/70.
16. Pada penelitian ini tidak menguji stabilitas dinamis.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Tinjauan pustaka merupakan kegiatan penelitian dengan cara meninjau kembali dan mengumpulkan informasi penting sesuai dengan topik yang menjadi objek penelitian. Pada penelitian ini, tinjauan pustaka dilakukan untuk menganalisis permasalahan terhadap pengaruh penambahan limbah serbuk kayu sebagai subtitusi *filler* pada campuran perkerasan jalan terhadap karakteristik jenis *Stone Matrix Asphalt* (SMA).

2.2 Fungsi *Filler* Pada Campuran Aspal Agregat Aspal

Menurut DPU-Bina Marga (1983), *filler* adalah sekumpulan mineral agregat yang umumnya lolos saringan No. 200, *filler* atau bahan pengisi ini akan mengisi rongga di antara partikel agregat kasar dalam rangka mengurangi besarnya rongga, meningkatkan kerapatan dan stabilitas dari massa tersebut. Fungsi utama agregat halus adalah untuk menyediakan stabilitas dan mengurangi deformasi permanen dari perkerasan melalui keadaan saling mengunci (*interlocking*) dan gesekan antar butiran.

Rosyad dan Ardian (2019) melakukan penelitian terkait penggunaan serbuk kayu. Dari penelitian ini variasi kadar semen yang Presentase *filler* yang digunakan adalah abu serbuk kayu dengan presentase 0%, 2%, 4%, 6%, dan 8% dihasilkan Berdasarkan analisis kadar masing-masing *filler* abu serbuk kayu di peroleh nilai tertinggi stabilitas sebesar 1185 kg, nilai *flow* sebesar 3,78 mm, VIM sebesar 5.0%, VMA sebesar 17,963%, VFB sebesar 70,33%, dan *Density* sebesar 2,302 gr.

Hidayati dan Fauziah (2018) melakukan penelitian terkait penggunaan *filler* abu sekam padi pada campuran SMA. Dari penelitian ini variasi kadar semen yang digunakan adalah 0%, 25%, 50%, dan 75%. Nilai CL yang dihasilkan untuk setiap kadar *filler* semen berturut-turut adalah 4,964%, 7,592%, 10,73% Dalam spesifikasi Bina Marga 2010, persyaratan kehilangan berat tidak boleh dari

20% agar memenuhi standar tersebut. Namun, pada campuran dengan kadar *filler* pengganti aspal sebesar 75%, persentase kehilangan berat mencapai 45,98%, yang melampaui batasan yang ditetapkan. Hasil penelitian ini memunjukkan bahwa kadar maksimum *filler* ASP dalam campuran SMA dimana nilai CL 0%, 25%, 50% masih memenuhi spesifikasi adalah maksimum 20% dan kadar 75% tidak memenuhi spesifikasi.

2.3 Pemanfaatan Limbah Abu Arang Kayu Sebagai Material Pengganti *Filler*

Abu arang kayu merupakan hasil sisa dari proses pembakaran kayu, baik secara sengaja untuk bahan bakar maupun sebagai limbah industri pengolahan kayu. Limbah ini sering kali dibuang begitu saja tanpa pemanfaatan yang berarti, padahal kandungan kimia di dalamnya, seperti silika, kalsium, dan karbon, memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam konstruksi. Secara fisik, abu arang kayu jati memiliki butiran halus dan ringan, menjadikannya kandidat yang layak untuk digunakan sebagai bahan tambahan atau substitusi dalam campuran perkerasan jalan, khususnya sebagai *filler*.

Anggreana dan Hardian (2024) meneliti penggunaan *filler* arang kayu dalam campuran AC-BC. Hasil penelitian dari karakteristik Marshall pada campuran AC-BC terhadap pengaruh penggunaan *filler* abu kayu kulim 0%, 10%, 20%, 30% dan 40% yaitu semakin besar campuran komposisi *filler* abu kayu kulim, maka nilai VMA dan VIM semakin rendah, sedangkan pada nilai VFA semakin tinggi. Untuk nilai VMA, VFA dan Stabilitas masih memenuhi persyartan Spesifikasi Bina Marga 2018. Pada nilai VIM dan *flow* mengalami kenaikan dan penurunan pada setiap variasi abu kayu kulim yang dicampurkan. Untuk nilai stabilitas pada variasi 0% dan 10% campuran abu kayu kulim, mengalami kenaikan dari 1815,261 kg – 1863,761 kg, namun pada variasi 20% hingga 40% mengalami penurunan dari 1551,979 kg – 1281,768 kg tetapi masih di atas batas persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 yaitu minimum 800 kg. Pada nilai *flow* pada variasi 0% dan 10% mengalami kenaikan dari 3,57 mm – 3,87 mm, namun pada variasi 20% hingga 40% juga mengalami kenaikan yang melawati batas maksimum Spesifikasi Bina

Marga 2018 dari 4,03 mm – 4,70 mm yang mana batas spesifikasi Bina Marga 2018 untuk campuran aspal *AC-BC* yaitu minimum 2 mm dan maksimum 4 mm. Pada semua komposisi *filler* abu kayu kulim yang digunakan, hanya pada variasi 0% dan 10% abu kayu kulim yang memenuhi persyaratan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Sedangkan untuk komposisi maksimum dari campuran *filler* abu kayu kulim didapat pada variasi 10% abu kayu kulim dengan nilai VMA sebesar 16,995%, VIM sebesar 3,891%, VFA sebesar 77,102%, Stabilitas sebesar 1863,761 kg dan *Flow* 3,87 mm.

Laras, dkk (2022) berdasarkan hasil penelitian, pada pengujian pertama diperoleh kadar aspal (KAO) sebesar 7,10% dengan *filler* sebesar 4,35% dari berat total campuran. Kemudian, pada pengujian kedua dilakukan variasi penambahan kadar *filler* arang kayu tumbuk sebesar 6%, 8%, dan 10% dari berat total agregat. Hasilnya menunjukkan bahwa kadar penambahan arang kayu tumbuk maksimum yang memenuhi persyaratan spesifikasi adalah pada kadar 8%. Dari hasil pembacaan alat *Marshall Test*, terjadi peningkatan stabilitas lebih dari 600 kg/mm, peningkatan nilai *flow* menjadi 0,03 mm, penurunan rongga dalam campuran (VIM) sebesar 1,47%, penurunan rongga antar agregat (VMA) sebesar 0,92%, peningkatan rongga terisi aspal (VFB) sebesar 6,1%, dan peningkatan hasil bagi *Marshall* sebesar 12,31 kg/mm.

Simanjuntak (2021) melakukan penelitian tentang Penggunaan Abu Serbuk Kayu Sebagai Tambahan *Filler* Dalam Campuran Perkerasan Jalan Jenis HRS-WC, Berdasarkan hasil analisa menunjukkan bahwa parameter *Marshall* memenuhi spesifikasi kecuali nilai VIM pada penambahan kadar abu serbuk kayu sebesar 3% dan 4,5%, yang berturut-turut adalah 3,83% dan 3,39%. Evaluasi karakteristik *Marshall* menunjukkan bahwa rentang kadar abu serbuk kayu maksimum dari 0% hingga 1,8% memenuhi semua persyaratan Spesifikasi Bina Marga 2018.

2.4 Rekayasa Subtitusi Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)

SMA adalah jenis beton aspal dengan kandungan agegat kasar ± 70%-80% dan *filler* ± 11%. Campuran tahan terhadap deformasi yang lebih mempunyai skid resistance tinggi karena kadar agregat kasarnya besar, Selain itu, campuran ini

cenderung memiliki daya tahan yang lebih tinggi karena mengandung kadar aspal yang besar dan distabilkan menggunakan serat selulosa, sehingga lebih mampu mendukung lalu lintas kendaraan berat secara optimal.

NAPA (1999) campuran SMA merupakan campuran yang dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan dan daya tahan bekas roda kendaraan. Ketahanan campuran SMA bergantung pada sifat agregat karena kontak antar agregat dapat mengurangi deformasi (*rutting*).

Purbanto, dkk (2022) melakukan penelitian tentang serabut kelapa sebagai serat selulosa pada campuran SMA. Persentase kadar serabut kelapa dibuat bervariasi, yaitu 0,2%, 0,3%, dan 0,4% terhadap berat total campuran. Serabut kelapa digunakan sebagai bahan alternatif pengganti serat sintetis. Pada parameter nilai karakteristik *Marshall* , akibat penggunaan serabut kelapa menunjukkan hasil yang sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga. 2018 Serabut kelapa mampu memperkecil pengaliran aspal, ditunjukkan dengan berkurangnya nilai DD dan keausan campuran seiring dengan bertambahnya kadar persentase yang digunakan. Akan tetapi, pada nilai IRS dan ITS menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya persentase kadar.

Hidayat (2019) melakukan penelitian tentang Analisis Karakteristik Campuran SMA Dengan Abu Ampas Tebu Sebagai *Filler* Pengganti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai stabilitas campuran SMA meningkat seiring dengan penambahan *filler* abu ampas tebu hingga kadar 25%, dengan kenaikan sebesar 39,73% mencapai 1199,484 kg. Namun, stabilitas mulai menurun pada kadar 50% dan 75%, dengan nilai mencapai 901,116 kg. Peningkatan nilai *flow* terjadi pada campuran dengan kadar abu ampas tebu 50% dan 75%. Nilai *Marshall Quotient* (MQ) menunjukkan pola yang mirip dengan stabilitas. Untuk nilai *Indeks Retensi Stabilitas* (IRS), kadar *filler* pengganti sebesar 0%, 25%, dan 50% masing-masing menunjukkan angka 95,051%, 97,318%, dan 97,794%, yang seluruhnya telah memenuhi standar Bina Marga (2010) yakni di atas 90%. Sementara itu, pada kadar 75%, IRS menurun menjadi 88,280% dan tidak memenuhi standar. Nilai *Indirect Tensile Strength* (ITS) meningkat hingga kadar 50%, dengan hasil tertinggi sebesar 16,887 kg/cm^2. Sementara itu, nilai CL mengalami peningkatan seiring

bertambahnya kadar abu ampas tebu, dengan nilai tertinggi sebesar 14,280% pada kadar 75%, namun masih berada dalam batas standar Bina Marga, yaitu kurang dari 20%.

2.5 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Dilaksanakan

Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang penyusun lakukan dapat dilihat pada Tabel 2.1 di halaman selanjutnya.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Dilaksanakan

`NO.	Penelitian Terdahulu							Penelitian Sekarang
	Aspek	**Farlin dan Ardian (2019)**	**Tinambunan, dkk (2019)**	**Putra dan Firdausi (2019)**	**Muslimin, dkk (2022)**	**Akter, dkk (2023)**	**Pratama (2025)**	**Roni (2025)**
1.	Judul	Analisis Pengaruh Pengganti *Filler* Dengan Abu Serbuk Kayu Terhadap Kinerja Perkerasan Aspal AC-WC	Analisa Kinerja Campuran AC-BC Dengan Pemanfaatan Kombinasi Limbah Abu Serbuk Kayu Dan Abu Bata Sebagai *Filler*	Studi *Eksperimental* Penambahan Serbuk Arang Kayu Dengan Kadar 10% Terhadap *Filler* Semen Pada Campuran Perkerasan AC-WC	Pemanfaatan Limbah Serbuk Kayu Jati Sebagai Material Pengisi Pada Campuran *Asphalt Treated Base* (ATB) Ditinjau Dari Uji *Marshall*	*Performance Evaluation Of Coal Dust And Wood Powder Ash As Alternates Of Conventional Filler In The Asphalt Concrete*	Pemanfaat Limbah Abu Arang Kayu Mindi Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA)	Penambahan Limbah Abu Arang Kayu Jati Sebagai Subtitusi *Filler* Pada Campuran Perkerasan Jalan Terhadap Karakteristik *Stone Matrix Asphalt* (SMA)
2.	Jenis Campuran	AC-WC	AC-BC	AC-WC	ATB	*Asphalt Concrete*	SMA	SMA
3.	Jenis Bahan Ikat	Pen 60/70	Pen 60/70	Pen 60/70	Pen 60/70	Pen 60/70	Pen 60/70	Pen 60/70

Sumber : Farlin dan Ardian (2019), Tinambunan, dkk (2019), Putra dan Firdausi (2019), Muslimin, dkk (2022), Akter, dkk (2023), Pratama (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Dilaksanakan

No.	Aspek	Farlin dan Ardian (2019)	Tinambunan, dkk (2019)	Putra dan Firdausi (2020)	Aditya (2021)	Akter, dkk (2023)	Pratama (2025)	Roni (2025)
4.	Bahan Pengisi (*Filler*)	Abu Serbuk Kayu	Abu Serbuk kayu dan Abu Bata	Serbuk Arang Kayu	Serbuk Kayu Jati	Abu Serbuk Kayu dan Abu batu bara	Limbah Abu Arang Kayu Mindi	Limbah Abu Arang Kayu Jati
5.	Bahan Tambah (*ADDitive*)	-	-	-	-	-	Serat Selulosa	Serat Selulosa
6.	Jenis Pengujian	*Marshall*	*Marshall*	*Marshall*	*Marshall*	*Marshall*	*Marshall* , IRS, TSR, ITS, CL, VCA dan DD	*Marshall* , IRS, TSR, ITS, CL, VCA dan DD
7.	Simulasi Keadaan	Pengaruh Serbuk Kayu terhadap kinerja perkerasan aspal AC-WC	Pengaruh Penggunaan *filler* abu serbuk kayu dan abu bata terhadap kinerja campuran AC-BC	Pengaruh penambahan serbuk arang kayu terhadap filler semen pada campuran AC-WC	Pengaruh serbuk kayu Jati sebagai material pengisi pada campuran ATB	Pengaruh abu serbuk kayu dan abu batu bara sebagai pengganti *filler* pada campuran *Asphalt Concrete*	Pengaruh *fillter* limbah abu arang kayu mindi terhadap karakteristik campuran SMA	Pengaruh *fillter* limbah abu arang kayu jati terhadap karakteristik campuran SMA

Sumber : Farlin dan Ardian (2019), Tinambunan, dkk (2019), Putra dan Firdausi (2019), Muslimin, dkk (2022), Akter, dkk (2023), Pratama (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Dilaksanakan

No.	Aspek	Farlin dan Ardian (2019)	Tinambunan, dkk (2019)	Putra dan Firdausi (2020)	Muslimin, dkk (2022)	Akter, dkk (2023)	Pratama (2025)	Roni (2025)
8.	Hasil	Nilai kepadatan mengalami penurunan pada setiap benda uji berturut-turut, Nilai VIM,VMA, dan VFB memenuhi persyaratan karena tidak melebihi batas maksimal yang di syaratkan.	Hasil uji karakteristik *Mars hall* dari ketiga kombinasi telah memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018. Namun, stabilitas tertinggi dihasilkan oleh kombinasi bahan pengisi 6% abu serbuk kayu dan 94% abu bata, yaitu 1.187,45 kg. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase abu serbuk kayu yang digunakan maka nilai stabilitas juga mengalami kenaikan.	Penggunaan serbuk arang kayu dengan kadar 10% memenuhi persyaratan sesuai Spesifikasi Bina Marga 2010. Pada benda uji dengan kadar serbuk arang kayu 10%, tercatat *Volume Void in Mix* (VIM) sebesar 5,32%, *Volume Void in Mineral Aggregate (*VMA*)* sebesar 17,81%, *Marshall Quotient (*MQ) sebesar 427,5.	Nilai *Marshall* test masih berada pada syarat yang ditentukan spesifikasi DBU Bina Marga Tahun 2018 dan serbuk kayu jati layak sebagai material pengisi campuran ATB.	Dari hasil pengujian *Marshall*, KAO menunjukkan kecenderungan berbeda, yaitu campuran dengan abu batubara memerlukan kadar aspal sedikit lebih tinggi (sekitar 6,3%) dibandingkan abu serbuk kayu (sekitar 6,1%) maupun filler konvensional (sekitar 6,0%).	Peningkatan pada nilai stabilitas campuran SMA seiring bertambahnya kadar *filler* pengganti abu arang kayu , turun mulai pada kadar abu arang kayu 50% hingga 100% sampai nilai stabilitas 934,99 kg. Dan memenuhi spesifikasi Bina Marga (2018) Revisi 2.	Kadar aspal optimum yang diperoleh sebesar 6,4%. Nilai VITM dan VMA berada dalam batas yang dipersyaratkan , sementara nilai stabilitas, *flow*, MQ juga memenuhi spesifikasi yang berlaku. Namun, nilai ITS dan TSR menunjukkan adanya penurunan dibandingkan campuran kontrol.

Sumber : Farlin dan Ardian (2019), Tinambunan, dkk (2019), Putra dan Firdausi (2019), Muslimin, dkk (2022), Akter, dkk (2023), Pratama (2025)

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan raya merupakan bagian jalan raya yang diperkeras dengan lapis konstruksi tertentu, yang memiliki ketebalan, kekuatan, dan kekakuan, serta kestabilan tertentu agar mampu menyalurkan beban lalu lintas diatasnya ke tanah dasar secara aman. Lapisan yang terletak di antara lapisan tanah dasar dan roda kendaraan, yang berfungsi memberikan pelayanan kepada sarana transportasi dan selama masa pelayanannya diharapkan tidak terjadi kerusakan yang berarti.

Fungsi dari perkerasan jalan menurut Sukirman (2003) yaitu berfungsi untuk menahan serta mendistribusikan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya. Tipe perkerasan jalan terdiri dari tiga jenis, yaitu perkerasan lentur (*flexible pavement*), perkerasan kaku (*rigid pavement*), dan perkerasan komposit (*composite pavement*).

3.2 Limbah Abu Arang Kayu Jati

Limbah Arang Kayu Jati merupakan limbah yang diperoleh dari hasil penggergajian kayu jati yang menggunakan mesin maupun manual. Industri penggergajian kayu tentu akan menghasilkan limbah kayu jati yang berupa serbuk kayu jati dan potongan kayu jati (Krisdianto, 2016). Biasanya, limbah yang di hasilkan dari industri penggergajian kayu masih belum termanfaatkan secara maksimal. Sementara ini penanganan limbah serbuk kayu hanya dibiarkan membusuk, ditumpuk dan dibakar yang kesemuanya berdampak negatif terhadap lingkungan Saptari, dkk (2016). Serbuk kayu jati tersebut mengandung zat kimia seperti selulosa (45-55%), hemiselulosa (25-30%), lignin (20-30%), dan substansi ekstraktif (1-3%) Nikotin (1975). Shohib, dkk (2023) melakukan penelitian tentang analisis komposisi dari selulosa, lignin, dan hemuselulosa dengan hasil pada Tabel 3.1 di halaman selanjutnya.

Tabel 3.1 Komposisi Karakterisasi

No.	Jenis Bahan Baku	Analisis			
		Lignin	**Selulosa**	**Hemiselulosa**	**Abu**
1.	Serbuk Kayu Jati	25 %	32 %	8 %	6,4 %
2.	Serbuk Kayu Mahoni	21 %	47 %	3 %	15,38 %
3.	Serbuk Kayu Sengon	5 %	27 %	41 %	3,70 %

Sumber : Shohib dkk (2023)



Gambar 3.1 Limbah Abu Arang Kayu Jati

Sumber : Dokumentasi Pribadi (2024)

3.3 Material Penyusun Perkerasan Jalan

Pada dasar nya bahan penyusun material konstruksi perkerasan jalan terdiri dari agregat (agregat kasar dan agregat halus), *filler*, dan aspal. Untuk mendapatkan hasil yang baik dan berkualitas dalam menghasilkan perkerasan jalan, maka bahan-bahan tersebut harus memiliki kualitas yang baik pula.

3.3.1 Aspal

Aspal merupakan material perekat berwarna hitam atau coklat tua dengan unsur utama bitumen yang diperoleh dari residu hasil pengilangan minyak bumi berfungsi sebagai pengikat agregat dalam pembuatan jalan. Aspal banyak digunakan dalam konstruksi perkerasan jalan karena memiliki sifat sebagai

pengikat dan pengisi rongga udara antara agregat. Aspal memiliki sifat termoplastik pada suhu ruang, artinya adalah akan meleleh ketika dipanaskan hingga suhu tertentu dan akan mengeras kembali saat suhu menurun. Bersama dengan agregat, aspal menjadi salah satu komponen utama dalam campuran perkerasan jalan. Kandungan aspal dalam campuran tersebut umumnya berkisar antara 4–10% dari berat total campuran, atau sekitar 10–15% jika dihitung berdasarkan volumenya (sukirman, 1992). Aspal yang dipergunakan dalam penelitian ini berupa aspal dengan penetrasi 60/70 dengan persyaratan dapat dilihat pada Tabel 3.1 di halaman selanjutnya.

Tabel 3.2 Pengujian dan Persyaratan Aspal Keras Pen 60/70

No.	Jenis Pengujian		Standar	Nilai Persyaratan
1	Berat Jenis		SNI-06-2441-1991	≥ 1,0
2	Penetrasi pada 25°C	(0,1 mm)	SNI 06-2456-1991	60 - 70
3	Daktilitas pada 25°C	(cm)	SNI-06-2432-1991	≥ 100
4	Titik Nyala	(°C)	SNI-06-2433-1991	≥ 232
5	Kelarutan dalam TCE	(%)	ASTM D5546	≥ 99
6	Titik Lembek	(°C)	SNI 06-2434-1991	≥ 48

Sumber : Bina Marga (2018)

3.3.2 Agregat

Agregat merupakan butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton. Kandungan agregat dalam campuran beton biasanya sangat tinggi, yaitu berkisar 60% - 70% dari volume beton. Agregat di definisikan secara umum sebagai formasi kulit bumi yang keras dan pada berupa massa berukuran besar ataupun berupa fragmen-fragmen. Agregat dibedakan menjadi 2 yaitu :

1. Agregat Halus

Agregat Halus merupakan mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton yang memiliki ukuran butiran kurang dari 5 mm dan

tertahan pada saringan no.200. Fungsi utama dari agregat halus adalah menyediakan stabilitas dan mengurangi deformasi permanen.

Tabel 3.3 Persyaratan Agregat Halus Pada Campuran *Stone Matrix Asphalt*

Pengujian	Standar	Nilai
Nilai setara pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50%
Material lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10 %
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%

Sumber : Bina Marga (2018)

2. Agregat Kasar

Agregat Kasar merupakan agregat yang berukuran lebih besar dari 5 mm, sifat yang paling penting dari suatu agregat kasar adalah kekuatan hancur dan ketahanan terhadap benturan yang dapat mempengaruhi ikatannya dengan pasta semen, porositas dan karakteristik penyerapan air yang mempengaruhi daya tahan terhadap proses pembekuan waktu musim dingin dan agresi kimia.

Tabel 3.4 Persyaratan Agregat Kasar Pada Campuran *Stone Matrix Asphalt*

Pengujian	Standar	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium atau magnesium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12 %
Abrasi dengan mesin Los Angeles	SNI 2417:2008	Maks. 30%
Kelekatan agregat terhadap aspal	SNI 2439:2008	Min. 95 %
Angularitas	ASTM D 5821-01	100/90[(1)]
Partikel pipih dan lonjong (Perbandingan 1:5)	RSNI T-01-2005	Maks. 5 %
Material lolos Ayakan No.200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 1%

Sumber : Bina Marga (2018)

3.3.3 Bahan Pengisi (*filler*)

Bahan pengisi (*filler*) adalah material pengisi yang lolos saringan N0.200 yang bisa berupa seperti debu batu kapur, debu kapur padam, debu kapur

magnesium, dolomit, semen, dan abu terbang yang sesuai dengan Bina Marga 2018 Revisi 2.

3.3.4 Gradasi Agregat

Gradasi agregat adalah susunan butir agregat sesuai ukurannya, merupakan sifat yang sangat luas pengaruhnya terhadap kualitas perkerasan secara keseluruhan. Gradasi agregat diperoleh dari hasil saringan dengan menggunakan 1 set saringan, yaitu dengan melewatkan sejumlah material melalui serangkaian saringan dari dengan bukaan paling besar diletakkan teratas dan yang paling halus terbawah sebelum pan. Gradasi berdasarkan agregat merupakan hal yang penting dalam menentukan stabilitas perkerasan.

3.3.5 Aditif

Aditif merupakan bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam campuran panas agregat dan aspal dengan tujuan untuk menstabilkan aspal. Dalam campuran SMA, aditif yang umum digunakan adalah serat selulosa, yang berperan dalam mencegah terjadinya segregasi selama proses pencampuran, pengangkutan, penyebaran, dan pemadatan.

Pada penelitian ini menggunakan bahan aditif berupa serat selulosa yang berupa Viatop66. Serat ini berfungsi mengurangi risiko terjadinya segregasi antara agregat dan aspal saat proses pencampuran, pengangkutan, maupun pemadatan. Selain itu, serat selulosa mampu menyerap kelebihan aspal sehingga dapat mencegah terjadinya *draindown* serta membantu distribusi aspal agar lebih merata. Kehadiran aditif ini juga meningkatkan ketahanan campuran terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan, sehingga karakteristik mekanis SMA seperti stabilitas, durabilitas, dan keausan tetap terjaga sesuai standar yang berlaku. Viatop66 terbuat dari *arbocel* dan bahan tambahan lainnya, dikemas dalam bentuk butiran silinder yang berwarna abu-abu kehitaman. *Arbocel* sendiri adalah serat selulosa yang juga dimanfaatkan sebagai bahan aditif dalam campuran aspal panas (Erikasari dkk, 2020).

Berikut ini merupakan persyaratan serat selulosa dapat dilihat pada Tabel 3.5 di halaman selanjutnya.

Tabel 3.5 Persyaratan Serat Selulosa

Pengujian	Satuan	Persyaratan
Serat :		
Panjang Serat	mm	Maks. 6,35
Lolos ayakan No. 20	%	85 ± 10
Lolos ayakan No. 40	%	40 ± 10
Lolos ayakan No. 140	%	30 ± 10
pH	-	7,5 ± 1,0
Penyerapan minyak	-	7,5 ± 1,0 kali berat serat selulosa
Kadar Air	%	Maks. 5
Selulosa Pelet		
Diameter	mm	3,8-4,0
Panjang	mm	5,9-6,1

Sumber : Bina Marga (2018)

3.4 *Stone Matrix Asphalt* (SMA)

Berdasarkan SNI 8129:2015 SMA merupakan suatu campuran lapis perkerasan beraspal panas dimana komposisinya terdiri dari 2 bahan penyusun diantaranya yaitu skeleton agregat kasar dan bahan pengikat berupa aspal pen 60 dengan proporsi penggunaannya yang tinggi.

Pada penelitian ini SMA dipilih karena campuran ini memiliki komposisi agregat kasar yang cukup dominan serta kadar aspal yang relatif tinggi, sehingga mampu memberikan stabilitas yang baik, tahan terhadap deformasi permanen (*rutting*), dan memiliki ketahanan yang lebih lama terhadap beban lalu lintas berat. Selain itu, SMA dikenal memiliki tingkat ketahanan geser (*skid resistance*) yang tinggi sehingga aman digunakan pada jalur dengan intensitas lalu lintas padat. Dengan karakteristik tersebut, jenis perkerasan ini sangat sesuai untuk mendukung umur layanan jalan yang panjang serta telah banyak direkomendasikan dalam spesifikasi teknis Bina Marga 2018 Revisi 2.

Penggunaan SMA dalam penelitian ini dianggap tepat untuk memperoleh performa lapis perkerasan yang optimal. Dengan demikian, SMA dianggap sebagai salah satu pilihan campuran beraspal yang efisien untuk perkerasan jalan dengan tuntutan kinerja tinggi. Tetapi, pada saat temperatur tinggi campuran ini cenderung

akan mengalami aliran aspal keluar dari agregat sehingga ketebalan aspal yang menutupi agregat menjadi berkurang, sehingga diperlukan bahan penstabil (Musu, dkk. 2022). Persyaratan campuran SMA dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6 Persyaratan Campuran *Stone Matrix Ashphalt*

Sifat-sifat campuran		Persyaratan	
		SMA	SMA Mod
Jumlah tumbukan per bidang		50	
Rongga dalam campuran (VIM), %	Min.	3,0	
	Maks.	5,0	
Rongga dalam agregat (VMA), %	Min.	17	
Rasio VCA_{MIX}/VCA_{DRC}		< 1	
Draindown pada temperatur produksi, % berat dalam campuran (waktu 1 jam)	Maks.	0,3	
Stabilitas *Marshall* , kg	Min.	600	750
Pelelehan, mm	Min.	2	
	Maks.	4,5	
Stabilitas Marshal Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60ºC	Min.	90	
Stabilitas dinamis, lintasan/mm	Min.	2500	3000

Sumber : Bina Marga (2018)

3.5 Karakteristik Campuran Lapis Perkerasan Jalan

Karakteristik yang harus dimiliki oleh campuran lapis perkerasan jalan sebagai berikut.

3.5.1 Stabilitas (*Stability*)

Menurut Sukirman (2003), Stabilitas merupakan kemampuan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk tetap seperti gelombang,alur, dan bleeding. Untuk mendapatkan stabilitas yang tinggi, maka menggunakan :

1. Agregat dengan gradasi yang rapat,
2. Agregat dengan permukaan yang kasar,
3. Aspal dengan penetrasi rendah, dan
4. Aspal dalam jumlah yang mencukupi untuk ikatan antar butir.

3.5.2 Daya Tahan (*Durability*)

Daya tahan merupakan kemampuan aspal dalam menjaga karakteristik aslinya terhadap pengaruh kondisi cuaca selama masa penggunaan jalan. Beberapa faktor yang memengaruhi ketahanan tersebut antara lain adalah sebagai berikut.

1. VITM kecil sehingga lapis kedap air dan udara tidak masuk ke dalam campuran yang menyebabkan terjadinya oksidasi dan aspal menjadi rapuh.
2. VMA besar sehingga lapisan aspal dapat dibuat tebal, jika VMA dan VITM kecil serta kadar aspal tinggi maka kemungkinan terjadinya bleeding cukup besar. Untuk mencapai VMA yang besar ini dipergunakan agregat bergradasi senjang.
3. Selimut aspal yang tebal dapat menghasilkan lapis aspal beton yang ber durabilitas tinggi, tetapi kemungkinan potensi terjadinya *bleeding* menjadi besar.

3.6 Karakteristik Pengujian *Marshall*

Pengujian *marshall* merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan kekuatan aspal, Pengujian *marshall* memiliki tujuan untuk mengetahui karaktetisitik fisik dan mekanik dari campuran aspal. Parameter yang harus di ukur dalam pengujian campuran beton aspal pada karakteristik *marshall* adalah sebagai betikut.

3.6.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas merupakan suatu kemampuan lapis perkerasan dalam menerima beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan bentuk tetap seperti gelombang alur atau *bleeding*. Nilai stabilitas dapat diperoleh dengan Persamaan 3.1.

$$q = p \text{ x } s \qquad (3.1)$$

keterangan :

q = angka stabilitas,

p = pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat, dan

s = angka koreksi tebal benda uji.

3.6.2 Kepadatan (*Density*)

Nilai *Density* campuran menunjukkan derajat kepadatan suatu campuran setelah dipadatkan. Campuran dengan density tinggi akan mampu menahan beban

yang lebih besar dibandingkan dengan campuran yang memiliki kepadatan yang rendah. Nilai *density* dapat diperoleh dari Persamaan 3.2 dan Persamaan 3.3.

$$g = \frac{c}{f} \tag{3.2}$$

$$f = d - e \tag{3.3}$$

keterangan :

g = nilai *density* (gr/cc),

c = berat benda uji sebelum direndam (gr),

d = berat benda uji dalan keadaan jenuh / *SSD* (gr),

e = berat dalam air (gr), dan

f = volume / isi (cm^3).

3.6.3 Kelelehan (*Flow*)

Flow merupakan besar nya penurunan atau deformasi yang terjadi pada lapis aspal beton akibat menahan beaban yang bekerja. Nilai *flow* dipengaruhi oleh gradasi agregat, viskositas aspal, dan kadar aspal. Nilai *flow* meningkat seiring dengan peningkatan aspal, sehingga mengurangi gesekan antar agregat yang disebabkan selimut aspal yang lebih tebal.

3.6.4 *Void in the Total Mix* (VITM)

VITM merupakan nilai persentase rongga terhadap campuran perkerasan aspal. Nilai VITM dapat diperoleh dari Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.5.

$$n = 100 - \left(100 - \frac{g}{h}\right) \tag{3.4}$$

$$h = 100 - \left[\frac{100}{\left(\frac{\%\ \text{Agregat}}{\text{BJ Agregat}} + \frac{\%\ \text{Aspal}}{\text{BJ Aspal}}\right)}\right] \tag{3.5}$$

keterangan :

n = nilai VITM,

g = berat isi sampel (gr/cc), dan

h = berat jenis maksimum teoritis campuran

3.6.5 *Void Filled With Asphalt* (VFWA)

VFWA merupakan persentase rongga yang terisi aspal pada campuran setelah dipadatkan. Nilai VFWA dipengaruhi juga dengan jumlah tumbukan dan suhu saat campuran aspal dipadatkan, gradasi agregat dan banyaknya kadar aspal. Nilai VFWA dapat dilihat dari Persamaan 3.6 sampai Persamaan 3.8.

1. Persentase aspal terhadap campuran

$$b = \frac{a}{100 + a} \text{ x } 100 \quad (3.6)$$

keterangan :

a = persentase aspal terhadap batuan, dan

b = persentase aspal terhadap campuran.

2. Persentase aspal terhadap agregat

$$m = 100 \text{ x } \left(\frac{\text{i}}{\text{l}}\right) \quad (3.7)$$

$$i = \frac{b \; x \; g}{BJ \; Aspal} \quad (3.8)$$

keterangan :

m = VFWA (%),

g = berat isi sampel (gr/cc), dan

b = persentase aspal terhadap campuran.

3.6.6 *Void in Mineral Agregate* (VMA*)*

VMA merupakan rongga udara yang terdapat diantara mineral agregat termasuk ruang yang terisi aspal pada campuran beraspal yang dipadatkan. Nilai VMA dapat diperoleh dari Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10.

$$l = 100 - j \quad (3.9)$$

$$\text{j} = \left(\frac{(100-\text{b}) \text{ x g}}{\text{BJ Aspal}}\right) \quad (3.10)$$

keterangan :

l = nilai VMA (%),

b = persentase aspal terhadap campuran (%), dan

g = berat isi sampel (gr/cc).

3.6.7 *Marshall Quotient (*MQ)

MQ merupakan nilai pendekatan yang hampir menunjukkan nilai kekakuan suatu campuran beraspal dalam menerima beban. Nilai MQ dapat diperoleh dari Persamaan 3.11.

$$\text{MQ} = \frac{q}{r} \tag{3.11}$$

keterangan :

MQ = nilai *Marshall Quotient* (kg/mm),

q = nilai stabilitas (kg), dan

r = nilai *flow* (mm).

3.7 Pengujian *Index of Retained Strength* (IRS)

IRS merupakan suatu metode pengujian untuk mengetahui besarnya nilai IRS. Nilai indeks ketahanan campuran aspal diperoleh dari persentase perbandingan antara stabilitas campuran yang telah direndam selama 0,5 jam dan 24 jam (S2) terhadap stabilitas campuran tanpa perendaman (S1). Seperti tercantum pada Persamaan 3.12 di bawah ini.

$$\textit{Index of retained strength} = \frac{S_2}{S_1} \text{ x } 100\% \tag{3.12}$$

keterangan :

S_1 = stabilitas setelah direndam selama 0,5 jam, dan

S_2 = stabilitas setelah direndam selama 24 jam.

3.8 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS)

ITS merupakan metode untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran aspal . Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui indikasi akan terjadinya retak di lapangan. yang membedakan pengujian ini dengan *Marshall* hanyalah pada pengujian kuat tarik tak langsung tidak menggunakan cincin penguji (*proving ring*)

sebagai beban tetapi menggunakan plat berbentuk cekung (*strip loading*) dengan lebar 0,5 inch.

ITS adalah kuat tarik maksimum dihitung dari puncak beban seperti pada Persamaan 3.13.

$$\text{ITS} = \frac{P\ runtuh}{h} \text{ x } A_0 \tag{3.13}$$

keterangan :

ITS = kuat tarik tidak langsung (kg/cm^2),

P runtuh = beban puncak (kg),

h = tinggi sampel (cm), dan

A_0 = konstanta.

3.9 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (TSR)

Nilai TSR biasanya digunakan untuk mengevaluasi kerentanan terhadap kerusakan air dan kelembaban dalam campuran aspal. Sehingga didapatkan Persamaan 3.14 sebagai berikut.

$$\text{TSR} = (T_2/T_1) \text{ x } 100 \tag{3.14}$$

keterangan :

S_1 = rata-rata nilai ITS tanpa rendaman, dan

S_2 = rata-rata nilai ITS setelah perendaman 24 jam (kg).

3.10 Pengujian *Cantabro Loss* (CL)

CL merupakan proses bekurang berat sampel akibat pengaruh tumbukan yang terjadi dalam mesin *Los Angeles Abrasion Test.* Hal ini bertujuan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap pengaruh beban lalu lintas yang berulang-ulang yang akan menyebabkan perkerasan menjadi aus dan mengalami penurunan kekuatan. Spesimen dibiarkan selama 48 jam pada suhu ruang, dan setidaknya selama 6 jam sebelum pengujian, suhunya harus tetap stabil pada suhu ruang. Sebelum dimasukkan ke dalam mesin *Los Angeles*, benda uji ditimbang terlebih dahulu

untuk memperoleh berat awal sebelum mengalami abrasi (*Mo*). Mesin dijalankan dengan kecepatan antara 30 hingga 33 rpm selama 300 putaran. Setelah proses selesai, benda uji dikeluarkan dan kembali ditimbang untuk mendapatkan berat setelah abrasi (*Mi*). Kehilangan berat dapat dihitung dengan Persamaan 3.15 sebagai berikut.

$$L = \frac{Mo-Mi}{Mo} \text{ x } 100\% \quad (3.15)$$

dengan :

M*o* = berat sebelum diabrasi (*gr*),

M*i* = berat setelah diabrasi (*gr*), dan

L = persentase kehilangan berat(%).

3.11 Pengujian *Draindown* (DD)

Pengujian DD merupakan pengujian yang bertujuan untuk mengetahui jumlah DD yang terjadi pada campuran beraspal yang belum dipadatkan, yaitu selama produksi, pengangkutan, dan penempatan campuran. Nilai DD merupakan rata-rata dari setiap pengujian campuran, yang dinyatakan dalam persentase (%). Nilai DD dihitung dengan Persamaan 3.16.

$$DD = \frac{A-B}{C} X\ 100 \quad (3.16)$$

dengan :

DD = persentase agregat dan aspal yang tertinggal (%),

A = berat akhir piring penampung (gr),

B = berat awal piring penampung (gr), dan

C = berat awal jumlah campuran yang diuji (gr).

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental, yaitu suatu pendekatan yang melibatkan serangkaian percobaan untuk memperoleh data. Data yang didapat kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan spesifikasi atau ketentuan yang berlaku. Acuan standar spesifikasi dan prosedur dalam penelitian ini mengikuti pedoman dari Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018 Revisi 2.

4.2 Metode Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sampel dilakukan dengan metode *nonprobability sampling* dengan penerapan *purposive sampling*. Metode tersebut merupakan metode dengan pengambilan sample yang tidak dipilih secara acak dan disesuaikan dengan kriteria yang sudah ditetapkan berdasarkan tujuan awal penelitian.

4.3 Metode Pengambilan Data

Metode data yang dikumpulkan dalam penelitian ini termasuk dalam kategori data primer, yang diperoleh secara langsung selama proses pengujian berlangsung. Oleh karena itu, diperlukan pengelompokan benda uji untuk memperoleh data seperti nilai stabilitas*, densitity, flow,* MQ, VITM, VMA, VFWA, VCA, serta nilai ITS, IRS, TSR, DD, CL.

4.4 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Adapun tahapan pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut.

4.4.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material

Pemeriksaan material penelitian dilakukan untuk mengetahui layak atau tidaknya dari suatu material yang didasarkan pada spesifikasi yang digunakan. Spesifikasi nilai yang digunakan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

Material yang dilakukan pemeriksaan untuk campuran SMA adalah agregat, aspal, dan *filler*. Untuk pemeriksaan serat selulosa tidak diuji dikarenakan menggunakan serat selulosa pabrik. Pemeriksaan material dilakukan sebagai berikut.

1. Pengujian Agregat
    a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar dan agregat halus (SNI 1969:2016)

        Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh nilai berat jenis curah (*bulk*), berat kering dalam kondisi jenuh permukaan (*Saturated Surface Dry*/SSD), berat jenis semu (*Apparent Specific Gravity*), serta tingkat penyerapan air dari agregat kasar. Berdasarkan ketentuan Bina Marga 2018, batas maksimum penyerapan air untuk agregat kasar adalah 3%.
    b. Pengujian kelekatan agregat terhadap aspal (SNI 2439:2011)

        Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kelekatan agregat terhadap aspal. Kelekatan agregat terhadap aspal merupakan presentase luas permukaan batuan yang tertutup oleh aspal terhadap keseluruhan luas permukaan. Persayratan yang di izinkan menurut Bina Marga adalah 95%.
    c. Pengujian analisa saringan (SNI ASTM C136-2012)

        Pengujian ini menggunakan satu set saringan yang bertujuan untuk menentukan gradasi agregat kasar dan agregat halus.
    d. Pengujian *Sand Equivalent* (SNI 3423:2008)

        Pengujian ini dilakukan untuk menentukan kandungan debu, tanah liat, atau partikel lempung yang terdapat dalam agregat halus.
    e. Pengujian abrasi pada mesin *Los Angeles* (SNI 2417:2008)

        Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengukur tingkat ketahanan agregat kasar terhadap keausan dengan memanfaatkan alat uji *Los Angeles*.
2. Pengujian Aspal

    Aspal merupakan bahan pengikat antar agregat pada campuran perkerasan. Pada penelitian ini menggunakan bahan ikat aspal AC 60/70. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kualitas aspal adalah sebagai berikut.

a. Pengujian berat jenis aspal (SNI 2441:2011)

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis aspal yang akan digunakan. Besarnya berat jenis aspal sangat berpengaruh dalam membuat perencanaan campuran aspal karena digunakan dalam menentukan kadar aspal dalam campuran aspal.

b. Pengujian daktilitas (SNI 2432:2011)

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kohesi dan kelenturan aspal. Pada proses pengujian ini dilakukan pada suhu 25°C dengan meletakkan aspal pada dua cetakan berbeda kemudian aspal ditarik dengan kecepatan 50 mm/menit, lalu diukur jarak terpanjang aspal sebelum aspal putus maka kita dapat melakukan pengukuran nilai daktilitasnya. Aspal yang daktilitasnya lebih besar akan mengikat butiran agregat lebih baik tetapi lebih peka terhadap perubahan suhu atau temperatur.

c. Pengujian titik lembek (SNI 2434:2011)

   Pengujian ini bertujuan untuk menentukan titik lembek aspal. Pengujian dilakukan dengan cara *ring and ball*, yaitu denga lapisan aspal yang ditekan dalam cincin yang didesak oleh bola baja dengan berat tertentu sampai lapisan aspal tersebut menyentuh plat dasar yang berada di permukaan bawah cincin.

d. Pengujian penetrasi aspal (SNI 2456:2011)

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan bitumen dimana aspal tersebut termasuk kedalam kategori aspal keras atau lembek. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan jarum berukuran 0,1 mm, beban, dan waktu tertentu pada suhu tertentu.

e. Pengujian kelarutan pada *Trichlor Ethylen* (TCE) ASTM D2042

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kelarutan aspal dengan menggunakan larutan TCE sehingga dapat diketahui nilai kemurnian aspal tersebut.

f. Pengujian titik nyala dan bakar (SNI 2433:2011)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui suhu dari aspal ketika terjadi nyala singkat diatas permukaan aspal (titik nyala) dan aspal terbakar sekitar 5 detik pada suatu titik (titik bakar).

3. Pengujian *Filler*

   Filler adalah bahan berbutir halus yang mempunyai fungsi sebagai pengeisi pada pembuatan campuran aspal. Pada penelitian ini digunakan *filler* berupa limbah serbuk kayu jati yang berbentuk abu.

4.4.2 Persiapan Alat

Seluruh peralatan yang digunakan untuk mendukung jalannya penelitian ini disediakan oleh Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Perangkat uji fisik agregat, antara lain mesin Los Angeles, saringan standar, tabung *sand equivalent*, dan alat getar (*vibrator*).
2. Peralatan uji aspal, termasuk alat untuk menguji daktilitas, penetrasi, kelarutan, titik nyala, titik bakar, serta titik lembek aspal.
3. Cetakan benda uji (*mold*) berdiameter 10 cm dan tinggi 7,5 cm.
4. Alat pengujian *Marshall ,* terdiri dari
   a. Ring penguji berkapasitas 2500 kg dengan ketelitian 12,5 kg.
   b. Kepala penekan berbentuk melengkung (*breaking head*).
   c. Arloji tekan dengan ketelitian 0,0025 cm.
   d. Arloji pengukur *flow* dengan ketelitian 0,25 mm beserta perlengkapannya.
5. Alat penumbuk benda uji dengan berat 4,536 kg dan tinggi jatuhan beban 45,7 cm bernama *compactor*.
6. Alat untuk mengeluarkan benda uji dari cetakan bernama *ejector*.
7. Timbangan berkapasitas 2 kg dengan ketelitian 0,1 gr dan timbangan berkapasitas 5 kg dengan ketelitian 1 gr yang dilengkapi penggantung.
8. Bak perendam (*waterbath*) yang digunakan untuk merendam benda uji sebelum dilakukan pengujian dilengkapi pengatur suhu minimum 20°C.
9. *Oven* digunakan untuk memanaskan benda uji dengan pengatur suhu sampai (200±3) °C.

10 Alat uji ITS dan TSR yang meliputi sebagai berikut.

a. Alat ukur tekan dengan lebar 0,5 inchi.
b. Arloji stabilitas dan *flow* dengan ketelitian 0,25 mm.
c. Perlatan penunjang lain selama proses penelitian seperti kompor, *thermometer*, spatula, wajan, gelas ukur, nampan, bak plastik, kain lap, jangka sorong, dan lainnya.

11 Alat pengujian DD

a. Timbangan benda uji.
b. Oven untuk memanaskan benda uji.
c. Keranjang kawat berbentuk silinder berdiameter 108 mm dan 165 mm, ukuran lubang jaring-jaring kawat sebesar 3,65 mm (1/4 inchi).
d. Piring almunium kecil sebagai alas penampung lelehan *mastic* atau aspal.

4.4.3 Perencanaan Campuran

Perencanaan campuran benda uji bergradasi SMA 12,5 mm didasarkan pada SNI 8129:2015 dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 sebagai berikut.

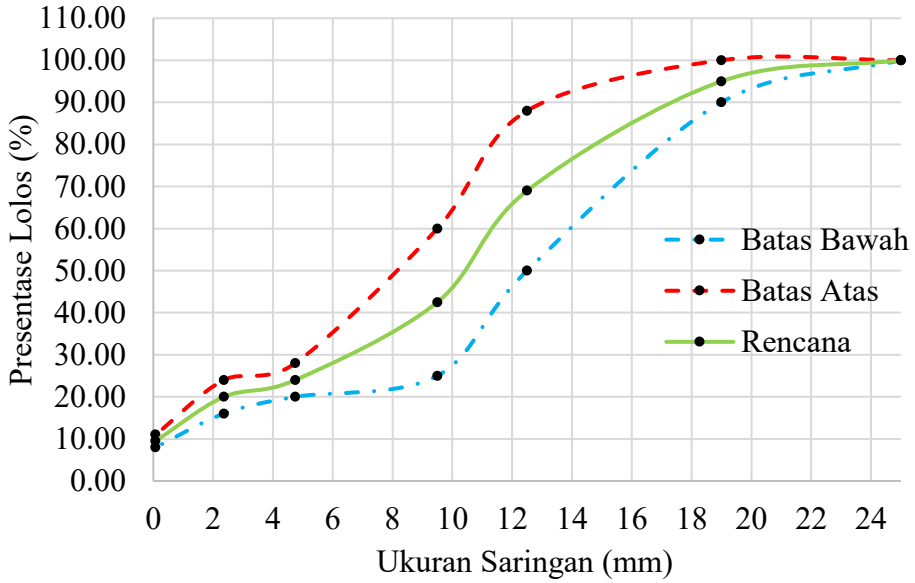
1. Menentukan komposisi agregat.
2. Menentukan variasi kadar aspal pada campuran dengan menggunakan perhitungan Pb.
3. Melakukan pembuatan benda uji dengan 2 x 50 tumbukan menggunakan alat pemadat *Marshall* .
4. Menentukan nilai KAO berdasarkan parameter berikut.
   a. Kadar aspal dengan syarat campuran minimum 6% dan maksimum 7%.
   b. VITM dengan syarat minimum 3% dan maksimum 5%
   c. VIM dengan syarat minimum 4% dan maksimum 5%.
   d. VMA dengan syarat minimum 17%.
   e. Stabilitas *Marshall* campuran dengan syarat minimum 600 kg.
   f. *Flow* campuran dengan syarat minimum 2mm dan maksimum 4,5 mm.
   g. DD dengan syarat maksimum 0,3%.
   h. IRS dengan syarat minimum 90%, dan
   i. VCA dengan syarat maksimum 1.

Perencanaan gradasi agregat dari campuran SMA 12,5 mm dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Gradasi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm

Ukuran Ayakan		Spesifikasi (%)		Jumlah Persen (%)	
Inchi	(mm)	Min	Maks	Lolos	Tertahan
1"	25	100	100	100	0
3/4	19	90	100	95	5
1/2	12.5	50	88	69	31
3/8	9.5	25	60	42,5	57,5
# 4	4.75	20	28	24	76
# 8	2.36	16	24	20	80
# 200	0.075	8	11	9,5	90,5
Pan		0	0	0	100

Berdasarkan Tabel 4.1 maka membentuk sebuah grafik gradasi rencana campuran SMA halus 12,5 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Grafik Gradasi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm

Penentuan kadar aspal optimum rencana dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.1.

$$\text{Pb} = 0{,}035\ (\%CA) + 0{,}045\ (\%FA) + 0{,}18\ (\%Filler) + K \qquad (4.1)$$

keterangan :

Pb = kadar aspal,

CA = persen agregat tertahan saringan No. 4,

FA = persen agregat lolos saringan No. 4 dan tertahan No. 200,

Filler = persen agregat lolos saringan No. 200, dan

K = konstanta 1-2 untuk campuran SMA 12,5mm.

Berdasarkan Tabel 4.1, maka didapatkan CA 76%, FA 14,5%, *Filler* 9,5%, dan K menggunakan 1. Maka dapat dicari kadar aspal optimum rencana dengan menggunakan Persamaan 4.1, didapatkan perhitungan Pb = $0{,}035\,(76) + 0{,}045\,(14{,}5) + 0{,}18\,(9{,}5) + 1$ = 6,02% dibulatkan menjadi 6%. Pada penggunaan nilai KAO, variasi kadar aspal yang digunakan adalah 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7% terhadap berat total campuran seberat 1200 gr. Kadar bahan tambah pada setiap benda uji adalah 0,3% dari berat total campuran benda uji, yaitu sebanyak 3,6 gr. Sedangkan total kebutuhan agregat tiap campuran berdasarkan berat total campuran yang dikurangi berat total aspal yang dibutuhkan. Adapun kebutuhan kadar subtitusi *filler* 0%, Untuk tiap-tiap kadar aspal dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat pada kadar aspal 5%

Ukuran Saringan		**Spesifikasi**		**Persen Agregat (%)**		**Berat Tertahan (gr)**	
Inchi	**mm**	**Min**	**Max**	**Lolos**	**Tertahan**	**Tertahan**	**Jumlah**
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0
1/2	12,5	90,0	100,0	95,0	5,0	57,0	57,0
3/8	9,5	50,0	80,0	65,0	30,0	342,0	399,0
# 4	4,75	20,0	35,0	27,5	37,5	427,5	826,5
# 8	2,36	16,0	24,0	20,0	7,5	85,5	912,0
# 200	0,075	8,0	11,0	9,5	10,5	119,7	1031,7
Pan		0,0	0,0	0,0	9,5	108,3	1140,0

Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	Mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,70	56,70
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	294,84	351,54
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	300,51	652,05
# 4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	209,79	861,84
# 8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	45,36	907,20
# 200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	119,07	1026,27
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	107,73	1134,00

Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	95,00	95,00	5,00	56,40	56,40
1/2	12,5	50,00	69,00	69,00	26,00	293,28	349,68
3/8	9,5	25,00	42,50	42,50	26,50	298,92	648,60
# 4	4,75	20,00	24,00	24,00	18,50	208,68	857,28
# 8	2,36	16,00	20,00	20,00	4,00	45,12	902,40
# 200	0,075	8,00	9,50	9,50	10,50	118,44	1020,84
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	107,16	1128,00

Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0
1/2	12,5	90,0	100,0	95,0	5,0	56,1	56,1
3/8	9,5	50,0	80,0	65,0	30,0	336,6	392,7
# 4	4,75	20,0	35,0	27,5	37,5	420,8	813,5
# 8	2,36	16,0	24,0	20,0	7,5	84,2	897,6
# 200	0,075	8,0	11,0	9,5	10,5	117,8	1015,4
Pan		0,0	0,0	0,0	9,5	106,6	1122,0

Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 7%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	55,80	55,80
1/2	12.5	50,00	88,00	69,00	26,00	290,16	345,96
3/8	9.5	25,00	60,00	42,50	26,50	295,74	641,70
# 4	4.75	20,00	28,00	24,00	18,50	206,46	848,16
# 8	2.36	16,00	24,00	20,00	4,00	44,64	892,80
# 200	0.075	8,00	11,00	9,50	10,50	117,18	1009,98
Pan		0.00	0,00	0,00	9,50	106,02	1116,00

Rincian spesimen yang digunakan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) serta spesimen berdasarkan variasi substitusi agregat kasar disajikan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 berikut :

Tabel 4.7 Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO

Kadar Aspal (%)	Pengujian		
	Marshall	IRS	DD
5	3	3	3
5,5	3	3	3
6	3	3	3
6,5	3	3	3
7	3	3	3
Jumlah Benda Uji	15	15	15
Jumlah Benda Uji	45		

Jumlah keseluruhan benda uji yang digunakan mencapai 45 sampel, Menunjukkan bahwa rancangan penelitian ini telah mempertimbangkan kebutuhan data yang memadai untuk memperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) secara akurat. Setelah jumlah total benda uji ditentukan pada Tabel 4.7, Rincian kebutuhan agregat dan material jumlah benda uji untuk subtitusi *filler* abu arang kayu jati dilihat pada Tabel 4.8. di halaman selanjutnya.

Tabel 4.8 Jumlah Benda Uji Untuk Subsitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati pada KAO

Jenis Pengujian	Jumlah Benda Uji Berdasarkan Variasi Subtitusi Agregat Kasar (Buah)				
	0%	25%	50%	75%	100%
Marshall	3	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3	3
ITS	3	3	3	3	3
TSR	3	3	3	3	3
DD	3	3	3	3	3
CL	3	3	3	3	3
Jumlah	18	18	18	18	18
Total	90				

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 dan 4.8 maka total benda uji dalam penelitian ini adalah 135 buah. Campuran aspal terdiri dari agregat kasar, agregat halus, dan *filler*. Masing-masing bahan ini mempunyai persyaratan khusus. Dilakukan penyesuaian perhitungan berdasarkan berat jenisnya untuk memastikan komposisi campuran tetap akurat. Pada penelitian ini peneliti mengganti *filler* limbah abu arang kayu jati dengan berbagai proporsi (0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%). Perhitungan detail untuk setiap sampel uji dengan variasi bahan pengisi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.9 sampai 4.13.

Tabel 4.9 Kebutuhan Agregat Pada Variasi Subtitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 0%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
3/4	25	90,00	100,00	95,00	5,00	56,16	55,16
1/2	19	50,00	88,00	69,00	26,00	292,03	348,19
3/8	12,5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,65	645,84
# 4	9,5	20,00	28,00	24,00	18,50	207,79	853,63
# 8	4,75	16,00	24,00	20,00	4,00	44,93	898,56
# 200	2,36	8,00	11,00	9,50	10,50	117,94	1016,50
Filler Abu batu						106,70	1123,20
Filler Abu Arang Kayu Jati						0,00	1123,20

Tabel 4.10 Kebutuhan Agregat Pada Variasi Subtitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 25 %

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
3/4	25	90,00	100,00	95,00	5,00	56,16	55,16
1/2	19	50,00	88,00	69,00	26,00	292,03	348,19
3/8	12,5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,65	645,84
# 4	9,5	20,00	28,00	24,00	18,50	207,79	853,63
# 8	4,75	16,00	24,00	20,00	4,00	44,93	898,56
# 200	2,36	8,00	11,00	9,50	10,50	117,94	1016,50
Filler Abu batu						80,03	1096,53
Filler Abu Arang Kayu Jati						14,77	1111,30

Tabel 4.11 Kebutuhan Agregat Pada Variasi Subtitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 50%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
3/4	25	90,00	100,00	95,00	5,00	56,16	55,16
1/2	19	50,00	88,00	69,00	26,00	292,03	348,19
3/8	12,5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,65	645,84
# 4	9,5	20,00	28,00	24,00	18,50	207,79	853,63
# 8	4,75	16,00	24,00	20,00	4,00	44,93	898,56
# 200	2,36	8,00	11,00	9,50	10,50	117,94	1016,50
Filler Abu batu						53,35	1069,85
Filler Abu Arang Kayu Jati						29,55	1099,40

Tabel 4.12 Kebutuhan Agregat Pada Variasi Subtitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 75%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
3/4	25	90,00	100,00	95,00	5,00	56,16	55,16
1/2	19	50,00	88,00	69,00	26,00	292,03	348,19
3/8	12,5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,65	645,84
# 4	9,5	20,00	28,00	24,00	18,50	207,79	853,63
# 8	4,75	16,00	24,00	20,00	4,00	44,93	898,56
# 200	2,36	8,00	11,00	9,50	10,50	117,94	1016,50
Filler Abu batu						26,68	1043,18
Filler Abu Arang Kayu Jati						44,32	1087,50

Tabel 4.13 Kebutuhan Agregat Pada Variasi Subtitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati Kadar 100%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	**mm**	**Min**	**Max**	**Lolos**	**Tertahan**	**Tertahan**	**Jumlah**
3/4	25	90,00	100,00	95,00	5,00	56,16	55,16
1/2	19	50,00	88,00	69,00	26,00	292,03	348,19
3/8	12,5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,65	645,84
# 4	9,5	20,00	28,00	24,00	18,50	207,79	853,63
# 8	4,75	16,00	24,00	20,00	4,00	44,93	898,56
# 200	2,36	8,00	11,00	9,50	10,50	117,94	1016,50
Filler Abu batu						0,00	1016,50
Filler Abu Arang Kayu Jati						59,10	1075,60

4.4.4 Pembuatan Campuran Benda Uji

Proses pembuatan campuran benda uji dilakukan setelah melakukan perencanaan campuran dengan melakukan penyaringan agregat untuk memisahkan distribusi butir sesuai dengan nomor saringan yang digunakan.setiap agregat yang tertahan pada nomor saringan kemudian ditimbang. Langkah-langkah pembuatan campuran benda uji adalah sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Memanaskan aspal pada suhu tertentu, pada penelitian ini menggunakan aspal AC 60/70 yang dipanaskan mencapai suhu 160°C.
3. Memanaskan agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan serat selulosa sampai suhu 170°C, kemudian mencampurkan kadar aspal sesuai dengan persentase yang telah direncanakan dan mengaduk sampai homogen.
4. Membersihkan cetakan benda uji dan mengolesi bagian dalam cetakan dengan menggunakan oli.
5. Meletakkan kertas yang telah dicetak sesuai dengan ukuran cetakan pada bagian bawah. Kemudian memasukkan campuran benda uji yang telah tercampur merata sebanyak 1/3 bagian dari volume cetakan dan ditusuk-tusuk menggunakan spatula sebanyak 25 kali. Dengan cara yang sama , benda uji dimasukkan sampai cetakan penuh kemudian meletakkan kertas di bagian atas.

6. Meletakkan cetakan yang telah berisi benda uji diatas mesin pemadat.
7. Setelah selesai pemadatan, benda uji dikeluarkan dari mesin pemadat dan didiamkan agar tidak terlalu panas.
8. Mengeluarkan benda uji dari cetakan menggunakan *ejector hydarulic pump*, kemudian mendiamkan benda uji tersebut dan mengambil kertas pada kedua sisi.

4.4.5 Pengujian *Marshall*

Marshall merupakan pengujian yang bertujuan untuk memperoleh nilai stabilitas, *density, flow*, MQ, VITM, VMA, dan VFWA dari suatu campuran perkerasan. Pengujian *Marshall* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan benda uji yang akan digunakan.
2. Membersihkan benda uji dari kotoran yang masih menempel dari proses pembuatan sampel.
3. Mengukur tinggi benda uji pada tiga sisi dengan menggunakan kaliper kemudian menimbang benda uji dalam keadaan kering udara.
4. Merendam benda uji di dalam air pada suhu ruang selama 20 sampai 24 jam untuk mendapatkan kejenuhan, kemudian menimbang benda uji di dalam air dan mencatat hasilnya.
5. Mengelap benda uji yang telah ditimbang dalam air dengan menggunakan kain lap sampai mencapai kondisi SSD, kemudian menimbang benda uji sehingga diperoleh berat dalam keadaan SSD.
6. Menempatkan benda uji ke dalam waterbath pada suhu 60°C selama waktu 30 menit.
7. Memeriksa mesin *Marshall* beserta dial pelengkapnya dan menyiapkan *breaking head* yang telah diolesi dengan oli.
8. Mengambil benda uji dari *waterbath* dan meletakkannya ke dalam *breaking head,* kemudian memasang dial *flow* dan menaikkan *breaking head* sampai benda uji menyentuh cincin penguji.
9. Mengatur jarum pada dial stabilitas dan *flow* pada posisi angka nol.
10 Menghidupkan mesin dan mengamati pembebanan sampai dial stabilitas mencapai angka maksimum.

11 Mencatat hasil pembacaan dari dial stabilitas dan dial *flow*.

4.4.6 Pengujian ITS

Langkah-langkah pengujian ITS dapat dilakukan dengan cara berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian Marshall .
3. Meletakkan benda uji pada mesin ITS.
4. Menyalakan mesin uji dan mengamati pembacaan dial dan mencatat hasilnya.

4.4.7 Pengujian TSR

Langkah-langkah pengujian TSR berpedoman pada SNI 8129:2015 dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *Marshall* .
3. Merendam benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam, kemudian mendiamkan benda uji pada suhu ruang selama 24 jam.
4. Meletakkan benda uji mesin TSR.
5. Menyalakan mesin uji dan mengamati pembacaan dial dan mencatat hasilnya.

4.4.8 Pengujian IRS

Pengujian IRS dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *Marshall* .
3. Merendam benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam.
4. Melakukan serangkain pengujian *Marshall* sesuai dengan sub bab 4.4.5.

4.4.9 Pengujian DD

Pengujian DD sesuai dengan ketentuan Bina Marga 2018 revisi 2 sebagai berikut.

1. Persiapkan 2 unit oven, oven pertama diatur hingga mencapai kisaran suhu sesuai temperatur produksi dan oven kedua diatur hingga mencapai kisaran

suhu 15°C lebih tinggi dari temperatur produksi masing-masing variasi benda uji dari hasil uji viskositas.

2. Masing-masing keranjang kawat dan alas almunium ditimbang.
3. Campuran aspal dalam kondisi *loose* dituang kedalam keranjang kawat dengan piring almunium sebagai alas lalu dilakukan penimbangan.
4. Benda uji tersebut ditempatkan dalam *oven*. Sebelum ditempatkan dalam *oven*, terlebih dahulu dilakukan pengukuran suhu benda uji menggunakan *thermometer*.
5. Bahan uji kemudian disimpan dalam *oven* selama 60±5 menit, namun jika suhu benda uji saat akan dimasukkan ke dalam *oven* sudah menurun menjadi lebih rendah 25°C dibawah temperatur pengujian, maka waktu penyimpanan benda uji dalam *oven* selama 70±5 menit.
6. Setelah waktu pemanasan dalam ven terpenuhi, dilakukan penimbangan alas piring almunium yang telah menampung lelehan *mastic* atau aspal dengan ketelitian 0,1 gr.

4.4.10 Pengujian CL

Pengujian CL dapat dilakukan sebagai berikut.

1. Menyiapkan seluruh material yang diperlukan.
2. Menimbang spesimen untuk memperoleh berat awal sebelum mengalami abrasi (Mo).
3. Menempatkan spesimen ke dalam mesin *Los Angeles* tanpa menggunakan bola baja.
4. Menjalankan mesin pada kecepatan 30–33 rpm sebanyak 300 putaran.
5. Setelah proses pemutaran selesai, mengeluarkan spesimen dari mesin dan menimbang kembali untuk mengetahui berat setelah pengujian abrasi (Mi).

4.5 Analisis Data

Setelah dilakukan berbagai macam pengujian, maka dilakukan analisis data untuk mendapatkan parameter hasil pengujian secara lengkap.

4.5.1 Analisis Karakteristik *Marshall*

Parameter hasil pengujian *Marshall* diperoleh data sebagai berikut.

1. Berat benda uji kering udara (gram)

2. Berat benda uji dalam air (gram)
3. Berat benda uji SSD (gram)
4. Tebal benda uji (mm)
5. Pembacaan dial stabilitas (kg)
6. Pembacaan dial *flow* (mm)

Karakteristik *Marshall Test* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

1. Berat jenis aspal

Berat jenis aspal dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.2 berikut.

$$\text{Bj Aspal} = \frac{C-A}{(B-A)-(D-C)} \tag{4.2}$$

dengan :

A = berat piknometer dengan penutup (gr),

B = berat piknometer berisi air (gr),

C = berat piknometer berisi aspal, dan

D = berat piknometer berisi air dan aspal.

2. Berat jenis agregat

Berat jenis agregat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.3 berikut.

$$\text{Bj Agregat} = \frac{(A\ x\ F1)+(B\ x\ F2)}{100} \tag{4.3}$$

dengan :

A = persentase agregat kasar (%),

B = persentase agregat halus (%),

F1 = berat jenis agregat kasar, dan

F2 = berat jenis agregat halus.

3. Nilai *stability* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.1.
4. Nilai *density* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.2 dan 3.3.
5. Nilai *flow* diperoleh dari hasil pembacaan dial *flow*.
6. Nilai VITM dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.4 dan 3.5.

7. Nilai VFWA dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.6-3.8.
8. Nilai VMA dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.9 dan 3.10.
9. Nilai MQ dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.11.

4.5.2 Analisis Pengujian IRS

Nilai pengujian IRS dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.12.

4.5.3 Analisis Pengujian ITS

Nilai pengujian ITS dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.13.

4.5.4 Analisis Pengujian TSR

Nilai pengujian TSR dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.14.

4.5.5 Analisis Pengujian CL

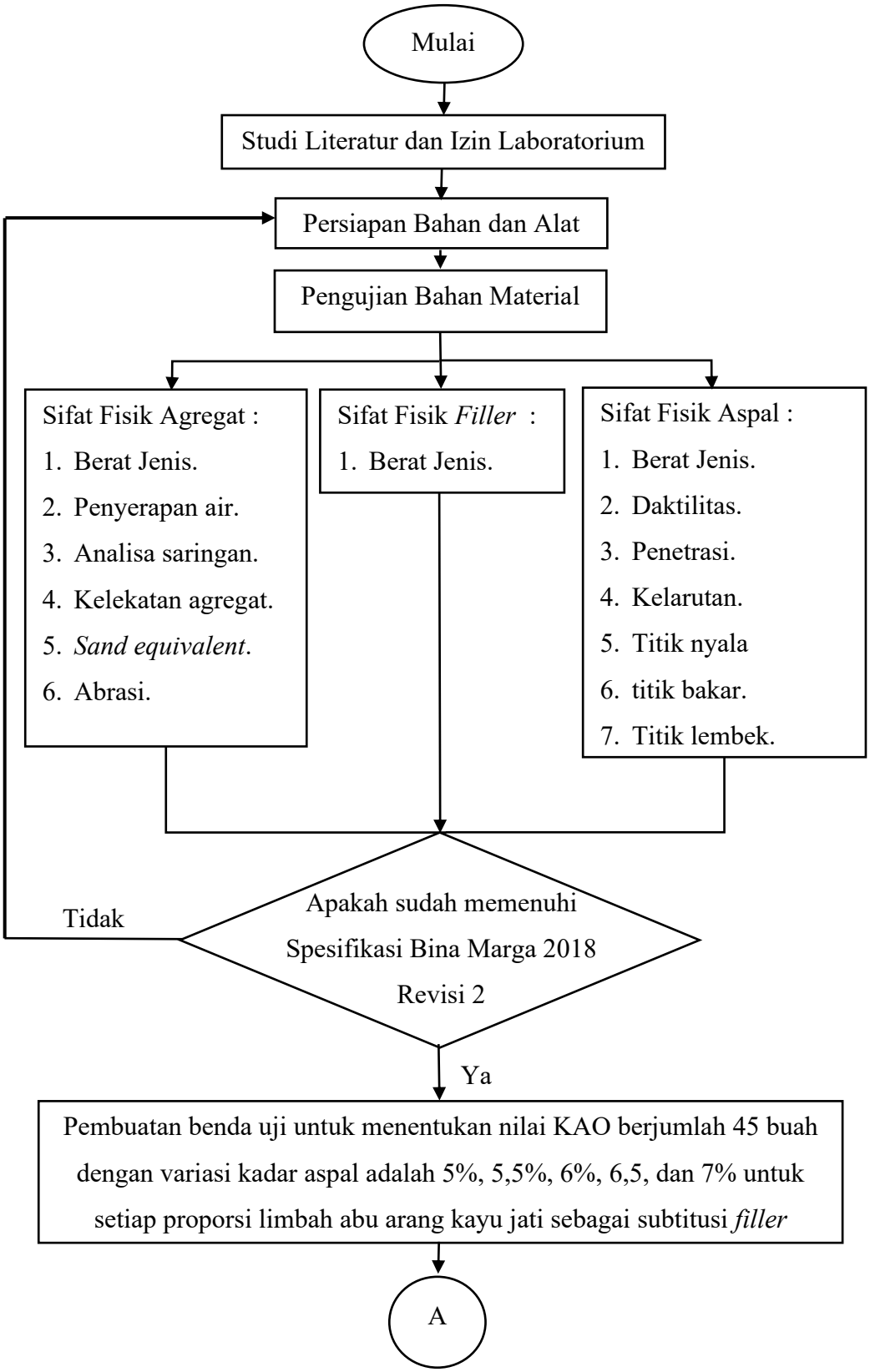
Nilai pengujian CL dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.15.

4.5.6 Analisis Pengujian DD

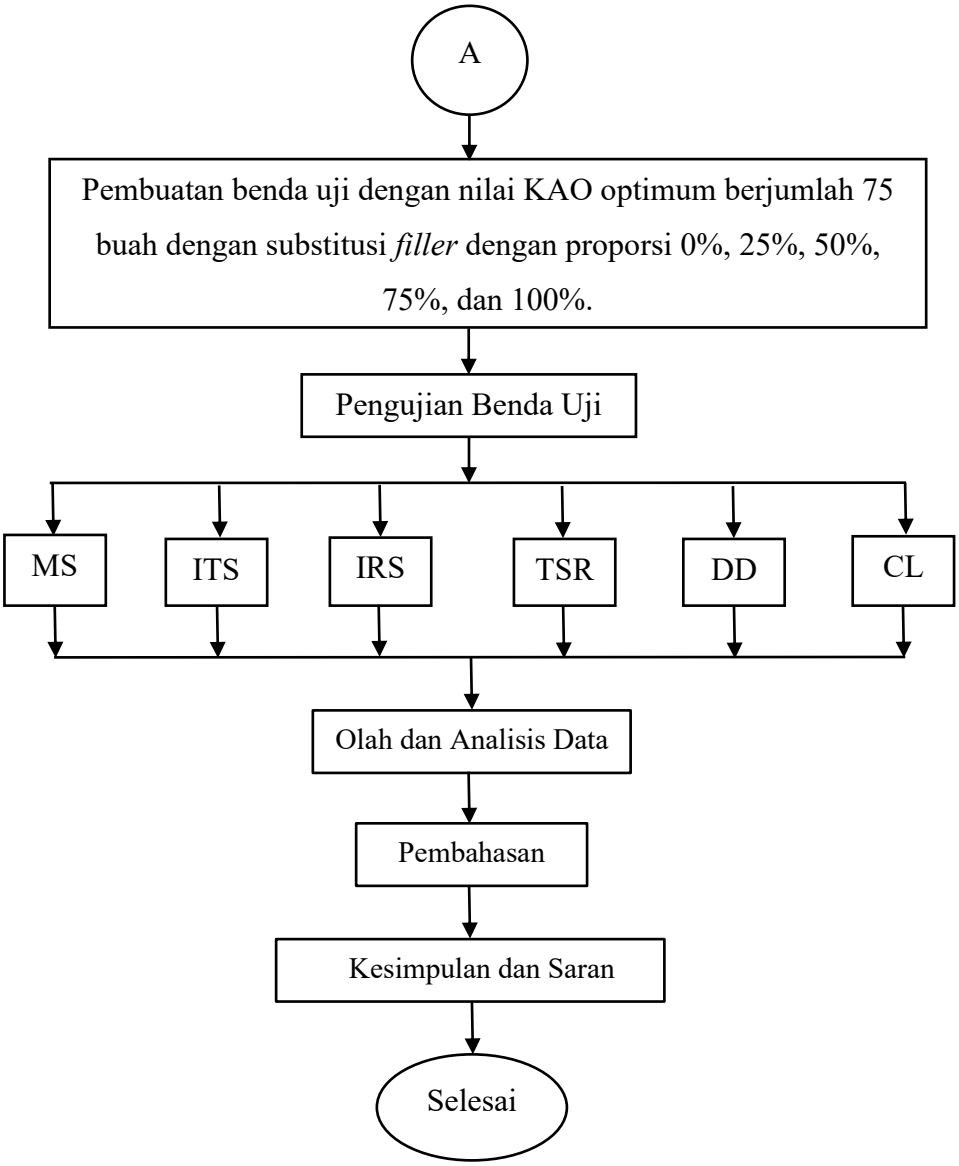
Nilai pengujian DD dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.16.

4.6 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian menunjukkan alir atau tahapan dari suatu penelitian yang dilakukan secara lebih singkat dan jelas. Pada penelitian ini, bagan alir dapat dilihat pada Gambar 4.2 di halaman selanjutnya.



Gambar 4.1 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian

BAB V
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian Bahan Dan Campuran

Berdasarkan rangkaian pengujian yang telah dilakukan, maka didapatkan hasil dari setiap pengujian sebagai berikut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pengujian terhadap karakteristik aspal dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Dalam pengujian ini digunakan aspal jenis Penetrasi 60/70, dan hasil pengujian mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 sebagai pedoman. Rekapitulasi hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis	≥ 1,0	1,040	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	60-70	66,50	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	≥ 100	164	Memenuhi
4	Titik Lembek (ºC)	≥ 48	48,5	Memenuhi
5	Titik Nyala (ºC)	≥ 232	310,5	Memenuhi
6	Titik Bakar (ºC)	≥ 232	313	Memenuhi
7	Kelarutan pada TCE (%)	≥ 99	99,51	Memenuhi

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian terhadap karakteristik agregat dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pengujian ini menggunakan agregat yang berasal dari Sungai Clereng, Kulon Progo, Yogyakarta. Data hasil pengujian ini berpedoman pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, rekapitulasi hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.2-Tabel 5.5 di halaman selanjutnya.

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat Jenis	≥ 2,5	2,57
2	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)	≤ 2	2,59
3	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal (%)	≥ 95	96
4	Keausan Agregat dengan Mesin *Los Angeles* (%)	≤ 40	12,20

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat Jenis	≥ 2,5	2,65
2	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)	≤ 2	2,61
3	*Sand Equivalent* (%)	≥ 50	71,62

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler*

No	Jenis Pengujian	Hasil
1	Berat Jenis (Debu Batu)	2,56
2	Berat Jenis (Abu Serbuk Kayu Jati)	1,409

Berdasarkan Tabel 5.4 terlihat bahwa berat jenis *filler* debu batu sebesar 2,56, sedangkan abu serbuk kayu jati hanya sebesar 1,409. Perbedaan ini menunjukkan bahwa *filler* abu arang kayu jati memiliki massa jenis yang jauh lebih ringan dibandingkan *filler* debu batu.

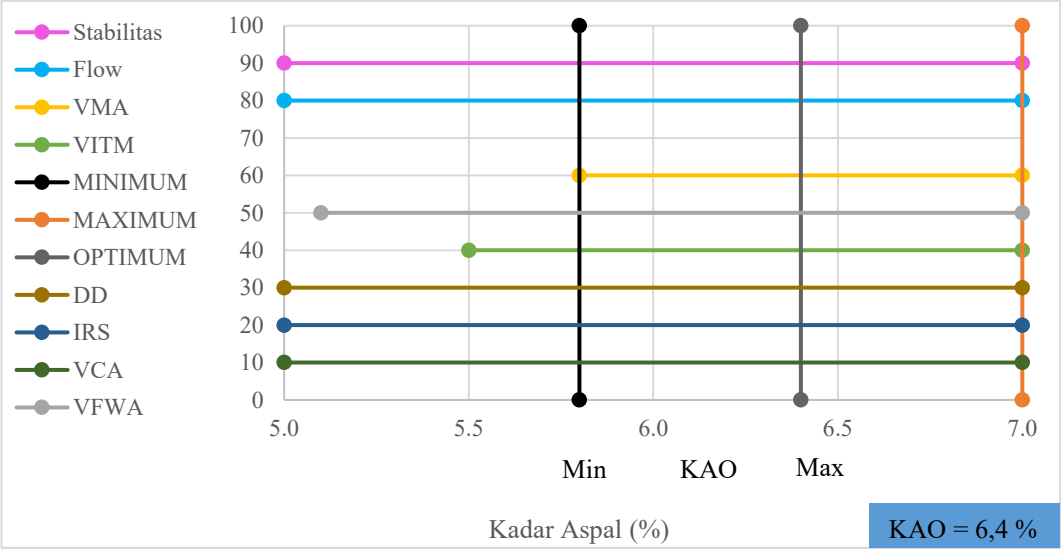
5.1.3 Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran SMA 25 mm yang menggunakan aspal penetrasi 60/70. Data hasil pengujian meliputi nilai stabilitas*, flow,* MQ, VMA, VITM, IRS, DD, dan VCA yang disajikan pada Tabel 5.5 di halaman selanjutnya.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian Untuk Menentukan KAO

Pengujian	5	5,5	6	6,5	7	Spesifikasi
Stabilitas (kg)	666,22	687,85	727,53	697,82	673,15	> 600
Flow (mm)	2,23	2,38	2,55	2,63	2,68	2-4,5
VITM (%)	6,24	5,17	4,23	3,73	3,17	3-5
VMA (%)	17,06	17,13	17,31	17,88	18,40	> 17
DD (%)	0,04	0,07	0,09	0,14	0,15	< 0,3
IRS (%)	115,43	117,35	119,74	122,22	124,76	> 90
VCA (%)	1,932	0,944	0,949	0,956	0,966	<1

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, diperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) untuk campuran SMA 25 mm. Nilai KAO ini ditentukan melalui metode perhitungan grafis, yang ditampilkan pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5.1 Penentuan KAO dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati 0%

Berdasarkan Gambar 5.1, maka Kadar Aspal Optimum yang digunakan untuk variasi substitusi *filler* adalah 6,4%. Pada variasi Kadar Aspal Optimum 6,4%

didapatkan berat agregat yang lolos saringan no. 200 sehingga didapatkan berat *filler* yang akan digunakan.

Setelah dilakukan pengujian terhadap berat jenis, diperoleh hasil bahwa *filler* berupa abu arang kayu memiliki berat jenis yang lebih ringan daripada *filler* debu batu, Pengujian ini bertujuan untuk menyamakan berat berdasarkan perbandingan volume. Persamaan dan contoh perhitungan matematis untuk menentukan kadar *filler* berat debu batu dan abu arang kayu jati pada Persamaan 5.1 dan 5.2 sebagai berikut, Dan hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Persamaan menentukan perbandingan kadar *filler* berat abu batu :

BJ Abu Batu – (BJ Abu Batu X Proporsi *Filler* %) (5.1)

Persamaan menentukan perbandingan kadar *filler* berat abu arang kayu jati :

$$\frac{\text{BJ } \textit{Filler} \text{ AAK x Berat Acuan x Proporsi } \textit{Filler} \%}{\text{BJ Abu Batu}} \quad (5.2)$$

Contoh perhitungan kadar *filler* perbandingan kadar *filler* berat abu batu

2,544 – (2,544 X 25%) = 80,03 gr

Contoh perhitungan kadar *filler* perbandingan kadar *filler* berat abu arang kayu jati

$$\frac{1{,}409 \text{ x } 106{,}70 \text{ x } 25\%}{2{,}544} = 14{,}71 \text{ gr}$$

Tabel 5.6 Berat Debu Batu dan Abu Arang Kayu Jati

Kadar Variasi Substitusi *Filler* (%)	**Berat Debu Batu (gr)**	**Berat Abu Arang Kayu Jati (gr)**
0	106,70	0,00
25	80,03	14,71
50	53,35	29,41
75	26,68	44,12
100	0,00	58,82

Berikut ini adalah gambar abu arang kayu jati yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.2 di sebagai berikut.



Gambar 5.2 Abu Arang Kayu Jati

5.1.4 Hasil Pengujian Campuran pada Kadar Aspal Optimum

Hasil pengujian campuran SMA 25 mm pada Kadar Aspal Optimum dengan substitusi abu arang kayu jati sebagai pengganti *filler* dengan pengujian MQ, VCA, DD, IRS, ITS, TSR, dan CL dapat dilihat pada Tabel 5.7-Tabel 5.13.

1. Abu Serbuk Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Marshall*

Tabel 5.7 Rekapitulasi Pengujian *Marshall* pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati

Kadar Substitusi *Filler* (%)	**Stabilitas (kg)**	***Flow* (mm)**	**MQ (kg/mm)**	**VITM (%)**	**VFWA (%)**	**VMA (%)**	***Density* (gr/cc)**
0	942,25	2,72	346,86	3,86	78,05	17,49	2,384
25	917,92	2,80	330,45	4,16	76,43	17,63	2,356
50	896,21	3,00	300,03	4,49	74,80	17,80	2,328
75	870,44	3,20	272,61	4,65	73,98	17,82	2,304
100	856,46	3,38	253,22	4,85	72,98	17,87	2,279
Spesifikasi	> 600	2-4,5	> 250	3-5	> 65	> 17	

2. Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian VCA

Tabel 5.8 Rekapitulasi Pengujian Nilai VCA pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati

Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati (%)	VCA_{MIX}/VCA_{DRC}
0	0,593
25	0,625
50	0,651
75	0,672
100	0,692

3. Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian DD

Tabel 5.9 Rekapitulasi Pengujian DD pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati

Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati (%)	DD (%)
0	0,10
25	0,07
50	0,05
75	0,042
100	0,029

4. Abu Serbuk Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian IRS

Tabel 5.10 Rekapitulasi Pengujian IRS pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati

Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati (%)	IRS (%)
0	96,30
25	95,18
50	93,04
75	92,31
100	90,66

5. Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian ITS

Tabel 5.11 Rekapitulasi Pengujian ITS pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati

Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati (%)	ITS (kPa)
0	843,91
25	837,31
50	818,80
75	808,62
100	803,50

6. Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian TSR.

Tabel 5.12 Rekapitulasi Nilai TSR pada KAO Setiap Kadar Substitusi Abu Serbuk Arang Jati

Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati (%)	TSR (%)
0	92,63
25	91,27
50	90,35
75	88,33
100	85,78

7. Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian CL

Tabel 5.13 Rekapitulasi Pengujian CL pada KAO Setiap KadarSubstitusi Abu Arang Kayu Jati

Kadar Substitusi Abu Arang Kayu Jati (%)	Kehilangan Berat (%)
0	5,825
25	7,957
50	9,766
75	12,981
100	15,614

5.2 Pembahasan

Berikut ini merupakan uraian pembahasan dari hasil pengujian yang telah dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pengujian dalam penelitian ini menggunakan aspal dengan jenis Pertamina Pen 60/70, pengujian ini mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Berikut merupakan hasil pengujian karakteristik aspal yang sebelumnya telah disajikan pada Tabel 5.1.

1. Berat Jenis Aspal

   Nilai berat jenis aspal diperoleh dengan membandingkan massa aspal terhadap massa air suling dalam volume yang sama pada suhu tertentu. Pada pengujian ini, diperoleh berat jenis aspal sebesar 1,040, yang telah memenuhi persyaratan sesuai Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu lebih dari 1,00.

2. Penetrasi Aspal

   Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui nilai penetrasi pada aspal, sehingga dapat ditentukan kualitas dan tingkat kekerasannya. Hasil pengujian terhadap aspal Pertamina Pen 60/70 menunjukkan nilai penetrasi sebesar 66,50 mm, yang sesuai dengan ketentuan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu berada dalam rentang 60 mm hingga 70 mm.

3. Daktilitas Aspal

   Pengujian daktilitis bertujuan untuk mengetahui keelastisitasan aspal dan sifat kohesi pada aspal. Hasil pengujian daktilitis sebesar 134,5 cm**,** hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 100 cm.

4. Titik Nyala Aspal dan Titik Bakar Aspal

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pada suhu berapa aspal mulai menyala dan aspal mulai memercikkan api. Hasil pengujian ini diperoleh titik nyala pada aspal sebesar 307°C dan 312°C**,** hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 232ºC.

5. Titik Lembek Aspal

Pengujian bertujuan untuk mengetahui kepekaan aspal terhadap temperatur, pada pengujian ini didapatkan nilai sebesar 48 ºC**,** hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 48ºC.

6. Kelarutan dalam *Trychloroethylene* (TCE)

Pengujian ini dilakukan untuk mengidentifikasi kandungan mineral lain yang terdapat dalam aspal, karena keberadaan mineral tersebut dapat mengganggu ikatan antara aspal dan agregat. Semakin tinggi persentase kelarutan, maka semakin sedikit kandungan mineral lainnya dalam aspal. Pada pengujian ini diperoleh hasil kelarutan sebesar 99,51%, yang telah memenuhi persyaratan minimal sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu ≥ 99%.

5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Pembahasan untuk pengujian karakteristik agregat kasar adalah sebagai berikut.

1. Berat Jenis Agregat Kasar

Berat jenis adalah rasio antara massa volume agregat terhadap volume air pada suhu tertentu. Nilai berat jenis agregat dalam campuran berperan penting dalam menentukan jumlah pori; semakin tinggi berat jenis agregat, maka pori-pori yang terbentuk akan semakin kecil, sehingga kebutuhan aspal menjadi lebih sedikit, dan sebaliknya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis agregat kasar Clereng adalah 2,57, nilai ini telah memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu > 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Kasar

Pengujian penyerapan air oleh agregat bertujuan untuk mengetahui sejauh mana agregat mampu menyerap air yang masuk melalui pori-pori atau rongga di dalamnya, mulai dari kondisi kering hingga mencapai keadaan jenuh. Agregat dengan porositas tinggi akan memiliki tingkat penyerapan air yang lebih besar, sehingga memerlukan lebih banyak aspal untuk mengisi rongga tersebut, dan sebaliknya. Berdasarkan hasil pengujian, penyerapan air agregat kasar Clereng sebesar 2,59%, nilai ini sesuai dengan batas maksimum 3% menurut spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.

3. Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

   Pengujian kelekatan Agregat terhadap aspal bertujuan untuk menentukan persentase luas permukaan agregat yang terselimuti aspal terhadap permukaan agregat. Hasil dari pengujian agregat kasar sebesar 96%**,** hasil tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 95%.

4. Keausan Agregat Kasar dengan Mesin *Los Angeles*

   Pengujian keausan menggunakan mesin *Los Angeles* dilakukan untuk menilai sejauh mana agregat kasar mampu bertahan terhadap proses penghancuran atau degradasi. Dari pengujian ini diperoleh nilai keausan sebesar 12,20%, yang masih sesuai dengan batas maksimum yang ditetapkan dalam Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu ≤ 40%.

5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Pengujian terhadap karakteristik agregat halus bertujuan untuk mengidentifikasi sifat fisik dan karakteristik dari material tersebut. Dalam penelitian ini, agregat halus yang digunakan berasal dari Clereng, Kulon Progo. Adapun karakteristiknya disajikan sebagai berikut.

1. Berat Jenis Agregat Halus

   Berat jenis merupakan rasio antara massa per satuan volume suatu material dengan massa air pada volume yang sama pada suhu tertentu. Berdasarkan hasil pengujian, berat jenis agregat halus dari Clereng, Kulon Progo adalah 2,65, dan nilai tersebut telah memenuhi ketentuan minimum menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu ≥ 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Halus

   Penyerapan air oleh agregat menunjukkan sejauh mana material tersebut dapat menyerap air melalui rongga atau pori-pori yang dimilikinya. Agregat dengan pori-pori yang lebih besar akan memerlukan lebih banyak aspal karena tingkat penyerapannya yang tinggi. Dari hasil pengujian, agregat halus asal Clereng, Kulon Progo memiliki nilai penyerapan air sebesar 2,61%, dan nilai tersebut memenuhi spesifikasi syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≤ 2%.

3. *Sand Equivalent*

Pengujian *sand equivalent* bertujuan untuk mengetahui tingkat kebersihan agregat dari kontaminasi seperti debu, lumpur, atau kotoran lainnya. Agregat halus dari Clereng menunjukkan nilai *sand equivalent* sebesar 71,62 %, yang telah memenuhi batas minimum sesuai Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu ≥ 50%. Hasil ini mengindikasikan bahwa agregat halus tersebut memiliki tingkat kebersihan yang tinggi dan minim kandungan material halus yang dapat mengganggu daya rekat antara aspal dan agregat.

5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*)

Pengujian karakteristik bahan pengisi (*filler*) bertujuan untuk mengetahui karakteristik bahan pengisi (*filler*). Berikut pembahasan dari pengujian bahan pengisi.

1. Pengujian Berat Jenis Debu Batu

Berat jenis merupakan rasio antara massa per satuan volume suatu material dengan massa air pada volume yang sama pada suhu tertentu. Dari hasil pengujian, berat jenis *filler* berupa debu batu diperoleh sebesar 2,544.

2. Pengujian Berat Jenis Abu Arang Kayu Jati

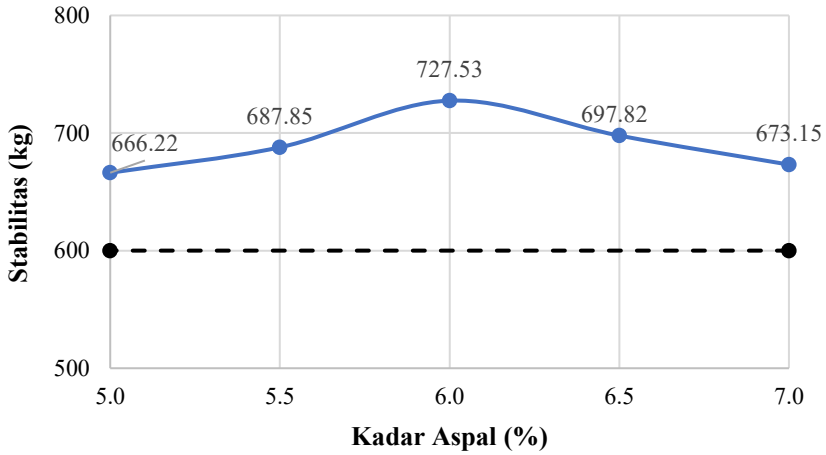
Berat jenis merupakan rasio antara massa per satuan volume suatu material dengan massa air pada volume yang setara pada suhu tertentu. Berdasarkan hasil pengujian, *filler* abu arang kayu jati memiliki berat jenis sebesar 1,409.

Dalam menentukan berat volume perlu diketahui berat jenis pada masing-masing *filler*. Hal ini guna mengetahui perbandingan volume antar *filler* sehingga dapat melingkupi volume yang sama karena berat jenis abu arang kayu jati sebagai *filler* pengganti lebih kecil dari berat jenis *filler* debu batu.

5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran untuk Menentukan KAO

1. Analisis Pengaruh Nilai Stabilitas untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Stabilitas adalah kemampuan campuran beton aspal untuk menahan beban sampai campuran mengalami kelelehan plastis. Grafik hasil nilai stabilitas akibat meningkatnya kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.3 di halaman selanjutnya.

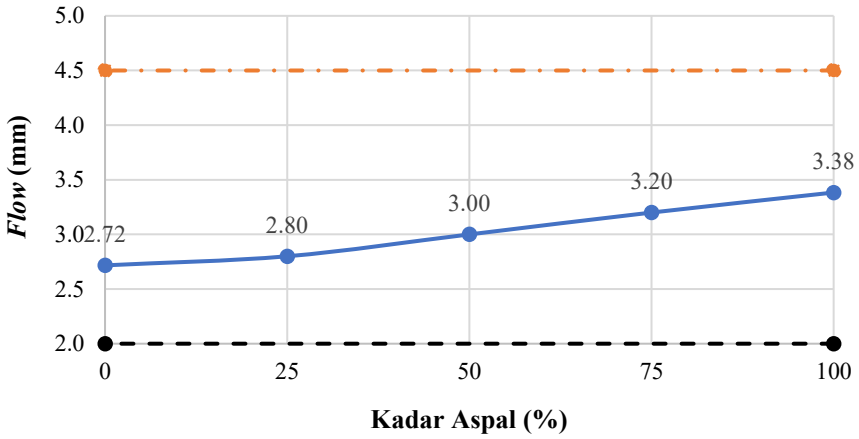


Gambar 5.3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas

Berdasarkan Gambar 5.3 Dapat disimpulkan bahwa stabilitas campuran mengalami peningkatan seiring dengan penambahan kadar aspal. Namun, setelah mencapai nilai maksimum, stabilitas mulai menurun. Titik stabilitas optimum terjadi pada kadar aspal sebesar 6%, kemudian mengalami penurunan setelah melewati titik tersebut. Kenaikan stabilitas berlangsung seiring bertambahnya kadar aspal hingga mencapai batas optimum, dan akan menurun jika kadar aspal melebihi batas tersebut. Penurunan ini disebabkan oleh terbentuknya lapisan aspal yang terlalu tebal, sehingga mengurangi gesekan antar butir agregat dan mengubah fungsi aspal dari bahan pengikat menjadi pelicin antar agregat. Berdasarkan ketentuan Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai stabilitas minimum untuk campuran SMA ditetapkan sebesar 600 kg. Rentang kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0% telah memenuhi ketentuan minimum tersebut.

2. Analisis Pengaruh Nilai *flow* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Flow merupakan keadaan dimana campuran aspal mengalami perubahan bentuk akibat beban yang diterimanya. *Flow* merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja campuran aspal, khususnya dalam konstruksi perkerasan jalan. Grafik perubahan nilai *flow* akibat peningkatan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.4 di halaman selanjutnya.

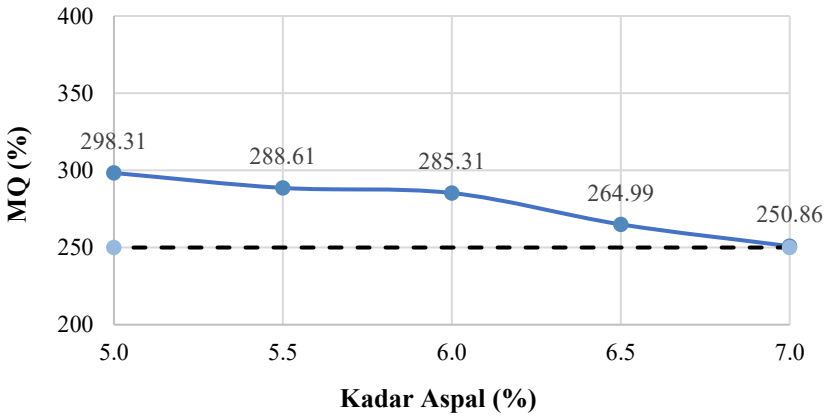


Gambar 5.4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow*

Berdasarkan Gambar 5.4 Dapat terlihat bahwa nilai *flow* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal, yang disebabkan oleh terbentuknya lapisan aspal yang semakin tebal dalam campuran. Penambahan kadar aspal yang lebih tinggi cenderung menaikkan nilai *flow*, yang mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih plastis. Akibatnya, penambahan kadar aspal memang dapat meningkatkan nilai *flow*, tetapi jika terlalu berlebihan justru dapat membuat campuran menjadi terlalu plastis dan berpotensi menurunkan stabilitas jangka panjang atau perubahan bentuk saat menerima beban. Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* yang diperbolehkan berada dalam kisaran 2 hingga 4,5 mm. Nilai *flow* pada kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0% masih berada dalam batas yang ditentukan sesuai standar.

3. Analisis Pengaruh Nilai MQ untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

   Nilai MQ diperoleh dari pembagian antara stabilitas dan kelelehan (*flow*), yang menggambarkan tingkat kekakuan serta fleksibilitas campuran. Semakin tinggi nilai MQ, maka campuran cenderung lebih kaku, sedangkan nilai MQ yang rendah menunjukkan bahwa campuran bersifat lebih lentur. Grafik perubahan nilai MQ ditampilkan pada Gambar 5.5 di halaman selanjutnya.

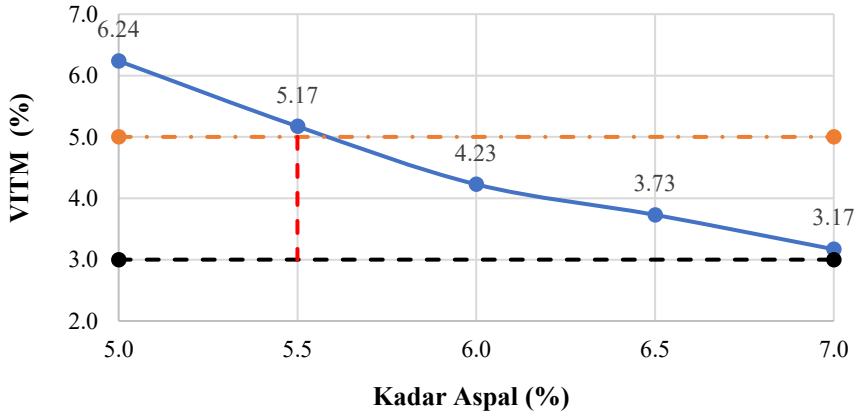


Gambar 5.5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai MQ

Pada Gambar 5.5 dapat dilihat bahwa nilai MQ cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Penurunan ini disebabkan oleh perubahan pada struktur dan komposisi campuran antara aspal dan agregat. Peningkatan kadar aspal menyebabkan nilai *flow* ikut naik, yang menunjukkan bahwa campuran menjadi lebih rentan terhadap deformasi ketika menerima beban. Hal ini berkontribusi pada penurunan nilai MQ, karena tingginya *flow* menunjukkan rendahnya kemampuan campuran dalam menahan beban. Selain itu, kelebihan aspal dapat mengurangi ikatan antar partikel agregat, menurunkan gaya gesek di antara partikel, dan melemahkan struktur campuran secara keseluruhan. Akibatnya, kadar aspal yang terlalu tinggi menghasilkan campuran yang lebih plastis, mudah mengalami perubahan bentuk, dan memiliki kekakuan yang lebih rendah. Namun demikian, nilai MQ pada kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0% masih sesuai dengan batas minimum yang ditetapkan dalam spesifikasi.

4. Analisis Pengaruh Nilai VITM untuk menentukan kadar aspal optimum

   VITM adalah persentase volume rongga di antara butir-butir agregat yang diselimuti aspal atau volume rongga dalam beton aspal padat. Grafik hasil nilai VITM akibat meningkatnya kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.6 di halaman selanjutnya.

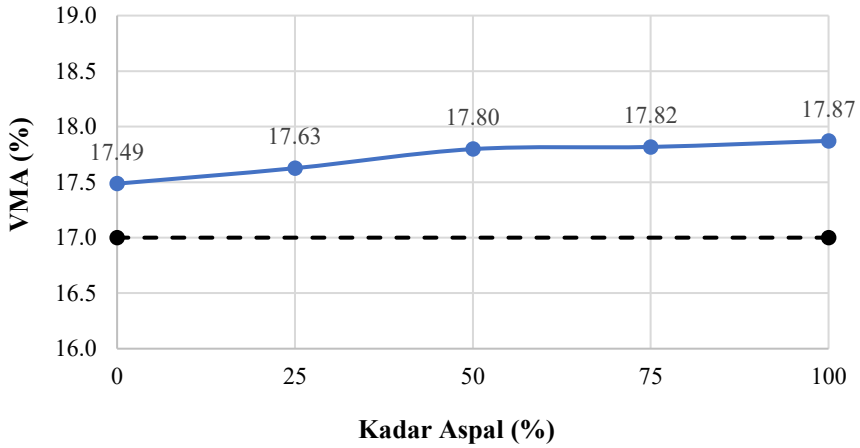


Gambar 5.6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VITM

Berdasarkan Gambar 5.6 dapat dilihat bahwa nilai VITM cenderung menurun seiring meningkatnya kadar aspal dalam campuran. Penurunan ini disebabkan oleh peningkatan jumlah aspal yang mengisi rongga antar agregat, atau meningkatnya nilai VFWA, sehingga volume rongga dalam campuran berkurang. Pada kadar aspal 5%, nilai VITM tidak memenuhi ketentuan dalam Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yang mensyaratkan nilai VITM untuk campuran SMA berada dalam rentang 3% hingga 5%. Kenaikan kadar aspal menyebabkan semakin rendahnya nilai VITM, yang menjadikan campuran lebih kedap terhadap air dan udara. Akibatnya, sirkulasi udara terhambat, mempercepat proses oksidasi, dan dapat membuat aspal menjadi getas atau rapuh.

5. Analisis Pengaruh Nilai VMA untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

VMA merupakan volume rongga yang terbentuk di antara partikel agregat dalam campuran beton aspal padat, yang dinyatakan dalam persen terhadap volume total campuran. VMA berperan sebagai ruang untuk menampung aspal serta rongga udara yang diperlukan dalam campuran. Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga Revisi 2 Tahun 2018, nilai VMA pada campuran SMA harus lebih dari 17%. Grafik perubahan nilai VMA seiring meningkatnya kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.7 di halaman selanjutnya.

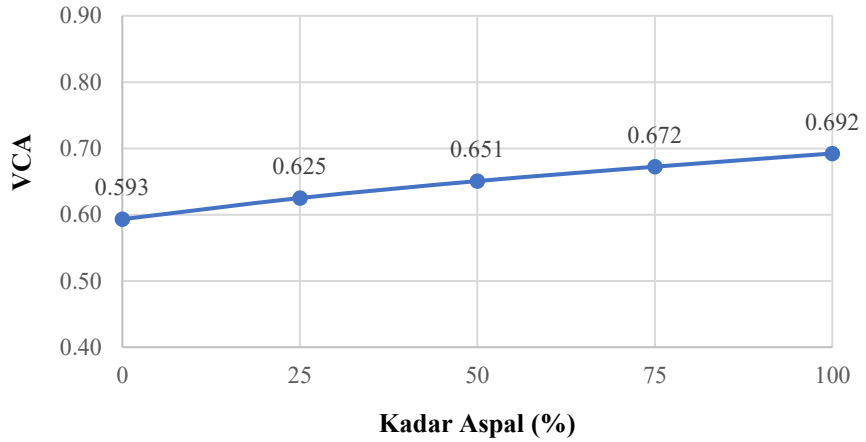


Gambar 5.7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VMA

Berdasarkan Gambar 5.7 dapat dilihat bahwa nilai VMA cenderung meningkat seiring dengan penambahan kadar aspal. Peningkatan ini terjadi karena jumlah aspal yang lebih banyak mampu melapisi agregat serta mengisi rongga di antara partikel. Menunjukkan bahwa volume rongga dalam campuran semakin besar seiring bertambahnya kadar aspal. Kondisi ini menguntungkan karena menyediakan rongga yang cukup bagi aspal, Namun jika peningkatannya berlebihan dapat menurunkan stabilitas campuran. Nilai VMA yang terlalu tinggi dapat menyebabkan *film* aspal yang menutup agregat menjadi terlalu tebal, sehingga campuran lebih mudah mengalami deformasi plastis atau bleeding ketika mendapat beban lalu lintas. Nilai VMA masih sesuai dengan ketentuan Spesifikasi Bina Marga Revisi 2 Tahun 2018, yaitu nilai minimum VMA untuk campuran SMA adalah 17.

6. Analisis Pengaruh Nilai VCA untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

VCA adalah Kondisi *stone-on-stone contact* pada campuran SMA didefinisikan sebagai volume rongga pada partikel agregat kasar, termasuk di dalamnya berupa *filler*, agregat halus, rongga udara, aspal, dan serat selulosa (apabila digunakan). Campuran ini harus memenuhi persyaratan nilai VCA yang ditetapkan AASHTO yaitu $VCA_{MIX} < VCA_{DRC}$ atau $VCA_{MIX}/VCA_{DRC} < 1$. Grafik hasil nilai VCA akibat meningkatnya kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.8 di halaman selanjutnya.

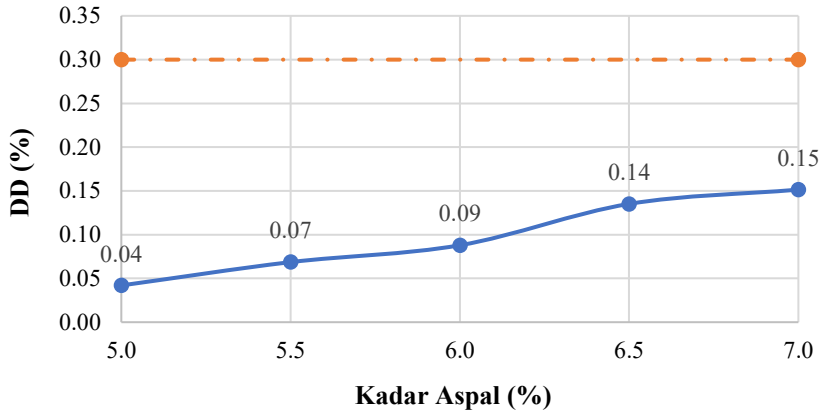


Gambar 5.8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VCA

Berdasarkan Gambar 5.8 Terlihat bahwa nilai VCA meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal dalam campuran. Peningkatan ini terjadi karena volume aspal yang lebih besar membentuk lapisan yang lebih tebal. Kadar aspal yang digunakan terlalu tinggi menyebabkan fenomena *bleeding* atau pelapisan berlebih pada permukaan jalan, yang justru berisiko menurunkan stabilitas struktural. Sebaliknya, jika kadar aspal terlalu rendah, rongga antar agregat kasar tidak terisi sempurna sehingga campuran menjadi lebih mudah retak akibat kurangnya ikatan antar partikel.sehingga memperbesar jarak antar partikel agregat. Akibatnya, kontak langsung antar agregat dalam campuran SMA menjadi berkurang. Meskipun demikian, Kondisi ini akan memastikan kerangka agregat tetap kokoh, namun rongga antar agregat masih cukup terisi aspal untuk menjamin daya lekat dan durabilitas campuran.berdasarkan grafik, seluruh variasi kadar aspal masih berada dalam batas yang dipersyaratkan oleh Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu nilai maksimum VCA untuk campuran SMA adalah 1.

7. Analisis Pengaruh Nilai DD untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

   Pengujian DD pada campuran SMA dilakukan pengujian dikarenakan memiliki kadar aspal yang tinggi, sehingga berpotensi terjadinya pengaliran aspal yang dapat mempengaruhi kualitas campuran. Grafik hasil nilai DD akibat meningkatnya kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.9 di halaman selanjutnya.

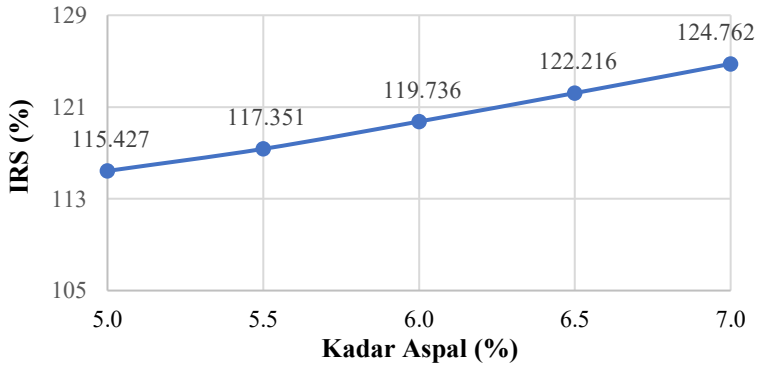


Gambar 5.9 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai DD

Berdasarkan Gambar 5.9 dapat dilihat nilai DD mengalami peningkatan setiap penambahan kadar aspal. Kondisi ini terjadi akibat bertambahnya kadar aspal dalam campuran yang menyebabkan aspal cenderung mengalir. Namun, nilai DD masih sesuai dengan ketentuan Spesifikasi Bina Marga Revisi 2 Tahun 2018, yaitu kurang dari 0,3% untuk campuran SMA.

8. Analisis Pengaruh Nilai IRS untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Nilai IRS diperoleh dari perbandingan dilakukan antara nilai stabilitas campuran setelah direndam selama 24 jam pada waterbath bersuhu 60°C dengan stabilitas campuran setelah perendaman selama 0,5 jam. Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga Revisi 2 Tahun 2018, nilai IRS untuk campuran SMA harus lebih dari 90%. Grafik perubahan nilai IRS akibat peningkatan kadar aspal ditampilkan pada Gambar 5.10 sebagai berikut.



Gambar 5.10 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai IRS

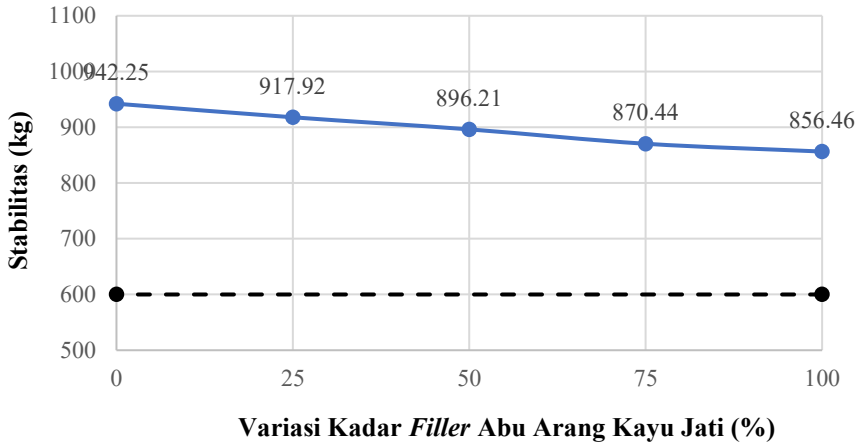
Berdasarkan Gambar 5.10 dapat dilihat nilai IRS mengalami peningkatan setiap penambahan kadar aspal. Hal ini disebabkan campuran memiliki nilai VITM yang mengalami penurunan dan nilai VMA yang mengalami peningkatan, sehingga campuran yang dihasilkan dapat menahan keausan akibat pengaruh cuaca, air, dan perubahan suhu.

5.2.6 Karakteristik MS pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Berdasarkan hasil pengujian MS pada campuran SMA 25 mm dengan substitusi abu arang kayu jati. Berdasarkan pengujian berat jenis, nilai berat jenis abu arang kayu jati lebih kecil daripada nilai berat jenis debu batu Clereng, maka hal ini akan berpengaruh terhadap campuran aspal. Berikut adalah hasil pengujian pengaruh penggunaan abu arang kayu jati sebagai substitusi *filler* dengan nilai KAO sebesar 6,4% sebagai berikut.

1. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai Stabilitas

   Grafik hasil nilai stabilitas akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.11 sebagai berikut.



Gambar 5.11 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Stabilitas

Pada Gambar 5.11 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati nilai stabilitas mengalami penurunan. Jika dibandingkan antara nilai-nilai tersebut, dapat dihitung persentase penurunan pada setiap

interval. Antara titik 0%-25% terjadi penurunan sekitar 2,58%, antara 25%-50% penurunan sebesar 2,36%, antara 50%-75% penurunan sebesar 2,88%, dan antara 75%-100% penurunan terkecil, yaitu sekitar 1,61%. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi substitusi *filler* abu arang kayu jati, maka nilai stabilitas campuran cenderung semakin menurun.

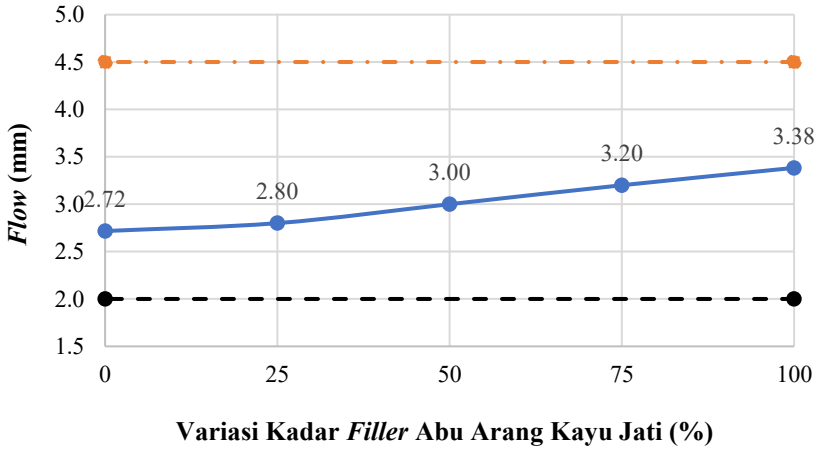
Hal ini mengindikasikan bahwa dengan berat jenis *filler* abu arang kayu yang rendah, abu arang kayu jati mempunyai volume lebih besar pada massa yang sama. Akibatnya, campuran yang terbentuk menjadi kurang padat dan ikatan antar partikel agregat tidak sekuat campuran dengan *filler* debu batu. Kondisi ini berpengaruh langsung pada nilai stabilitas, di mana semakin tinggi kadar abu arang kayu jati yang digunakan, semakin besar pula kecenderungan penurunan kekuatan campuran dalam menahan beban. Namun penurunan yang konsisten dapat berpengaruh terhadap umur layanan perkerasan jalan dalam jangka panjang.

Hal ini sejalan dengan penelitian Rohman, dkk (2020) yang menyatakan penurunan stabilitas ini terjadi karena arang kayu memiliki berat jenis yang lebih ringan dibandingkan *filler* konvensional seperti abu batu. Akibatnya, kepadatan campuran berkurang dan jumlah VIM dalam campuran meningkat. Kondisi tersebut juga menyebabkan turunnya nilai MQ serta naiknya nilai VMA dan VIM, yang mencerminkan bahwa campuran menjadi lebih mudah menyerap udara, bersifat lunak, dan memiliki daya tahan yang lebih rendah terhadap beban lalu lintas.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai minimum stabilitas untuk campuran SMA yaitu > 600 kg sehingga nilai stabilitas pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu telah memenuhi persyaratan.

2. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Flow*

Grafik hasil nilai *flow* akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.12 di halaman selanjutnya.



Gambar 5.12 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Flow*

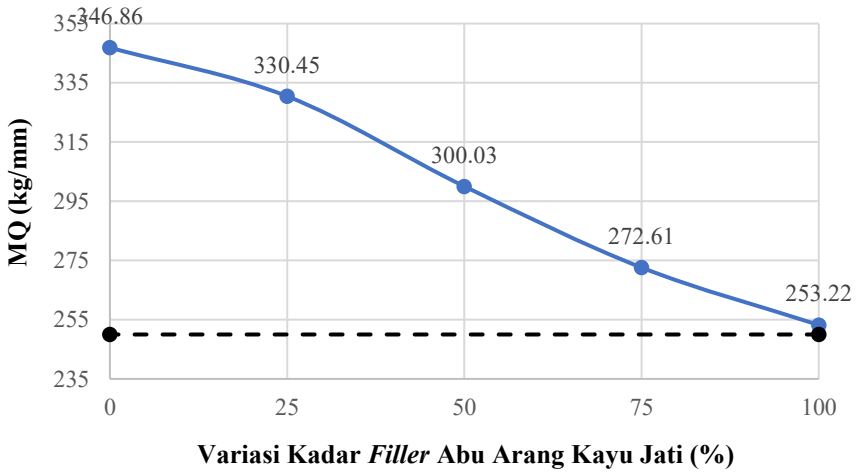
Berdasarkan Gambar 5.12 dapat dilihat bahwa seiring dengan penambahan kadar abu arang kayu jati menghasilkan nilai *flow* yang semakin menaik, Peningkatan nilai *flow* pada masing-masing interval dapat dihitung, yaitu sebesar 7,14% dari 0% ke 25%, kemudian 6,67% dari 25% ke 50%, selanjutnya meningkat sebesar 2,50% pada interval 50% ke 75%, dan terakhir 3,05% dari 75% ke 100%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan abu arang kayu jati menyebabkan campuran menjadi lebih plastis dan lebih mudah mengalami deformasi ketika menerima beban, sehingga nilai *flow* menjadi semakin besar. Peningkatan ini terjadi akibat penambahan *filler* dari abu arang kayu jati yang membuat campuran menjadi lebih plastis dan kurang tahan terhadap beban berat. Jumlah mastik yang terbentuk dalam campuran juga bertambah dengan viskositas yang lebih rendah. Bertambahnya mastik menyebabkan sifat plastis campuran meningkat, sehingga ketika menerima beban, campuran cenderung mengalami deformasi plastis yang lebih besar.

Penelitian ini sejalan dengan Ridwan dan Nadia (2017) dalam penelitiannya, campuran aspal dengan variasi kadar *filler* menunjukkan peningkatan nilai *flow* seiring bertambahnya kadar *filler* tersebut. Hal ini terjadi karena semakin banyak *filler* pengganti yang digunakan, campuran menjadi lebih plastis dan kurang mampu menahan deformasi.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* untuk campuran SMA memiliki nilai antara 2,0 mm sampai 4,5 mm sehingga nilai flow pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

3. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai MQ

Grafik hasil nilai MQ akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.13 sebagai berikut.



Gambar 5.13 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai MQ

Berdasarkan Gambar 5.13 dapat dilihat bahwa semakin besar persentase substitusi *filler* abu arang kayu jati ke dalam campuran aspal menghasilkan nilai MQ yang menurun. Penurunan nilai MQ sebesar 4,74% terjadi pada saat substitusi meningkat dari 0% ke 25%, kemudian mengalami penurunan lanjutan sebesar 9,21% dari 25% ke 50%. Selanjutnya, penurunan sebesar 9,13% tercatat antara 50% ke 75%, dan penurunan terakhir sebesar 7,11% terjadi dari 75% ke 100%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar persentase abu arang kayu jati yang digunakan sebagai *filler*, semakin berkurang kekakuan campuran, sehingga MQ cenderung menurun akibat fleksibilitas campuran yang meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar abu arang kayu jati, maka kefleksibilitas campuran berkurang.

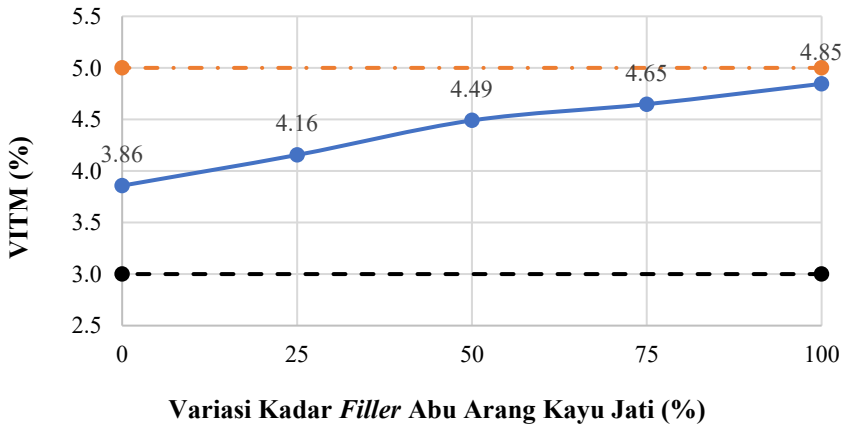
Sehingga pada titik optimum, nilai MQ menunjukkan fleksibilitas rendah, sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap deformasi. Meskipun penambahan aspal dapat meningkatkan nilai *flow*, tetapi pada saat yang sama nilai stabilitas justru mengalami penurunan setelah melewati titik optimum. Akibatnya, rasio stabilitas terhadap *flow* berkurang sehingga nilai MQ menurun.

Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Bethary, dkk (20) yang menyatakan bahwa penurunan nilai MQ terjadi karena melemahnya sifat kohesi dan adhesi antara aspal dan agregat. Penurunan MQ ini mencerminkan penurunan kekakuan struktural campuran, sehingga menunjukkan rentannya campuran terhadap distorsi atau deformasi permanen saat menerima beban lalu lintas. Hal ini memberikan perhatian penting dalam desain campuran, yakni perlu diperkuat stabilitas ikatan aspal–agregat melalui pemilihan *filler,* modifikasi aspal, atau penggunaan bahan anti *stripping*.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai MQ yaitu > 250 kg/mm sehingga nilai MQ pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

4. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai VITM

Grafik hasil nilai VITM akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu dapat dilihat pada Gambar 5.14 sebagai berikut.



Gambar 5.14 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VITM

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.14 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati nilai VITM semakin meningkat. Peningkatan VITM seiring bertambahnya kadar *filler* abu arang kayu jati. Peningkatan nilai VITM pada setiap interval dapat dihitung, yakni sebesar 7,77% dari 0% ke 25%, kemudian meningkat lagi 7,93% pada interval 25% ke 50%. Selanjutnya, peningkatan tercatat sebesar 3,56% antara 50% dan 75%, dan terakhir sebesar 4,30% dari 75% ke 100%. Pola ini mengindikasikan bahwa penambahan *filler* secara bertahap memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan nilai VTIM.

Hal ini disebabkan oleh berat jenis *filler* abu arang kayu jati yang lebih rendah, sehingga pada massa yang sama, volume *filler* menjadi lebih besar. Menyebabkan susunan partikel dalam campuran menjadi kurang rapat, sehingga rongga yang terbentuk meningkat. Selain itu, tekstur abu arang kayu jati yang lebih halus dan berpori membuat aspal kehilangan sebagian kemampuan plastisnya untuk mengisi celah antar agregat, sehingga udara lebih mudah terperangkap di dalam campuran. Selain itu, tekstur abu arang kayu jati yang cenderung halus membuat aspal kehilangan sifat plastisnya dan mengurangi kemampuannya dalam mengisi celah antar agregat. Akibatnya, campuran yang terbentuk memiliki rongga udara lebih banyak. Campuran dengan rongga udara besar cenderung lebih porous, sehingga air dan udara lebih mudah masuk dan berpotensi menurunkan daya tahan atau keawetan campuran.

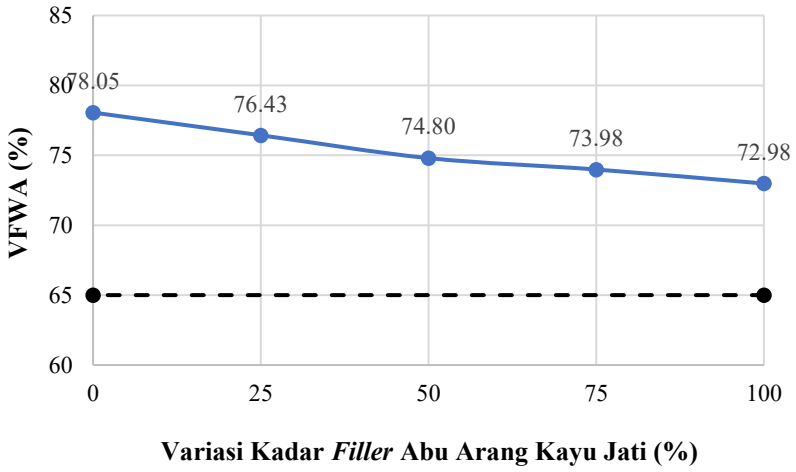
Hal ini sejalan dengan Hawari dan Lizar (2021) yang menyatakan bahwa peningkatan ini terjadi karena penambahan *filler* dalam campuran aspal menciptakan rongga yang lebih besar. Hal ini disebabkan oleh sifat *pozzolan* yang dimiliki kedua material tersebut, yang menyebabkan *filler* cenderung menggumpal sehingga proses pemadatan campuran menjadi lebih sulit untuk dilakukan.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai VITM untuk campuran SMA memiliki nilai antara 3% sampai 5% sehingga nilai VITM

pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

5. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai VFWA

Grafik hasil nilai VFWA akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.15 sebagai berikut.



Gambar 5.15 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VFWA

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.15 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* arang kayu jati nilai VFWA mengalami penurunan, Penurunan nilai VFWA seiring peningkatan kadar *filler* abu arang kayu jati. Penurunan ini terjadi secara bertahap, yakni sebesar 2,07% dari 0% ke 25%, kemudian menurun lagi 2,13% pada kadar 25% ke 50%. Selanjutnya, penurunan lebih kecil terjadi antara 50% hingga 75%, yaitu 1,10%, dan terakhir sebesar 1,35% dari 75% ke 100%. Berdasarkan hasil yang didapatkan nilai VFWA pada kadar substitusi *filler* abu arang kayu jati 100% memiliki nilai minimum yang disyaratkan, Abu arang kayu jati memiliki berat jenis yang jauh lebih rendah dibandingkan *filler* debu batu. Perbedaan ini menyebabkan volume *filler* abu arang kayu yang masuk ke dalam campuran menjadi lebih besar pada massa yang sama. Maka dapat diindikasikan bahwa abu arang kayu jati mampu menyerap aspal dan *film* aspal yang tebal,

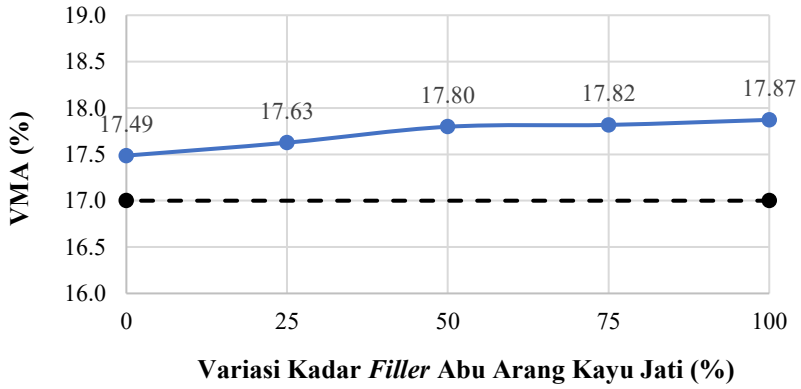
membuat campuran memiliki ketahanan terhadap pengaruh udara dan air sehingga campuran menjadi lebih awet. Akibatnya, rongga dalam campuran tidak dapat seluruhnya terisi oleh aspal, karena sebagian besar volume telah ditempati oleh *filler* dengan berat jenis rendah. Kondisi ini membuat porsi rongga yang benar-benar diisi oleh aspal berkurang, sehingga nilai VFWA menurun. Dampaknya, campuran dengan kadar abu arang kayu yang tinggi memiliki daya ikat dan kepadatan yang lebih rendah dibandingkan campuran dengan *filler* debu batu.

Penelitian ini sejalan dengan Chasanah dan Sukmo (2023) dalam penelitiannya bahwa penambahan *filler* menghasilkan nilai VFWA yang mengalami penurunan hal ini disebabkan fungsi aspal selain sebagai bahan ikat juga sekaligus sebagai pengisi rongga dalam campuran, semakin nilai VFWA menurun dapat membuat menurunkan kekedapan campuran terhadap air dan bisa membuat campuran mudah mengeras dan tidak awet.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai VFWA yaitu > 65% sehingga nilai VFWA pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

6. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai VMA

Grafik hasil nilai VMA akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.16 sebagai berikut.



Gambar 5.16 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VMA

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.16 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati nilai VMA mengalami peningkatan. Peningkatan tersebut sebesar 0,80% dari 0% ke 25%, lalu meningkat 0,96% antara 25% ke 50%. Selanjutnya, terjadi peningkatan yang lebih kecil, yaitu 0,11% pada interval 50% ke 75%, dan sebesar 0,28% dari 75% ke 100%. Pola peningkatan yang konsisten ini menunjukkan bahwa penambahan *filler* memberikan kontribusi terhadap peningkatan nilai VMA, meskipun laju peningkatannya cenderung melambat pada interval yang lebih tinggi.

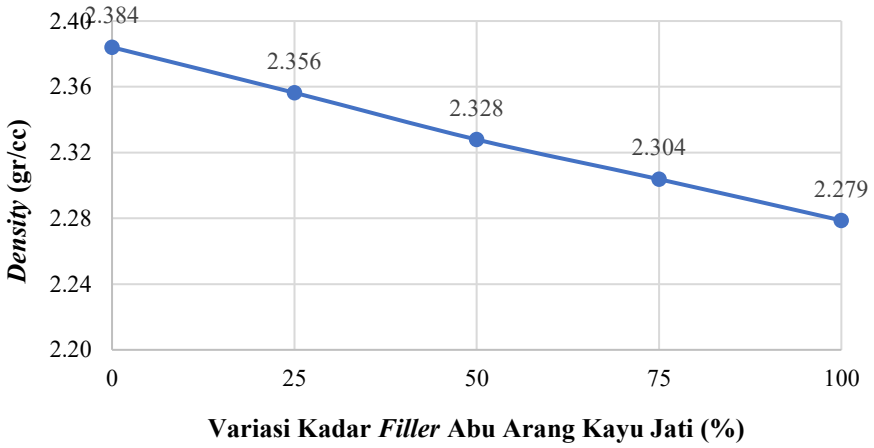
Nilai VMA yang mengalami peningkatan mengindikasikan bahwa jarak antar agregat semakin menjauh. Hal ini dapat disebabkan makin besarnya nilai pori campuran atau makin tebalnya *film* aspal pada agregat. Kondisi ini sebenarnya memberikan ruang lebih banyak bagi aspal untuk masuk dan melapisi agregat, sehingga dapat meningkatkan fleksibilitas campuran. Akibatnya, bila peningkatan VMA terlalu tinggi, lapisan aspal berpotensi menjadi terlalu tebal, yang akhirnya menurunkan kekakuan campuran dan membuatnya lebih rentan terhadap deformasi.

Hasil ini sejalan dengan Hawari dan Lizar (2021) Dalam penelitiannya, dijelaskan bahwa penggunaan *filler* pengganti pada campuran aspal menyebabkan peningkatan nilai VMA seiring dengan bertambahnya jumlah *filler* yang digunakan. Kenaikan nilai VMA ini disebabkan oleh karakteristik *pozzolan* yang dimiliki kedua jenis material tersebut, yang membuat *filler* cenderung menggumpal dan menyulitkan proses pemadatan campuran.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai VMA yaitu > 17% sehingga nilai VMA pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

7. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Density*

Grafik hasil nilai *density* akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.17 di halaman selanjutnya.



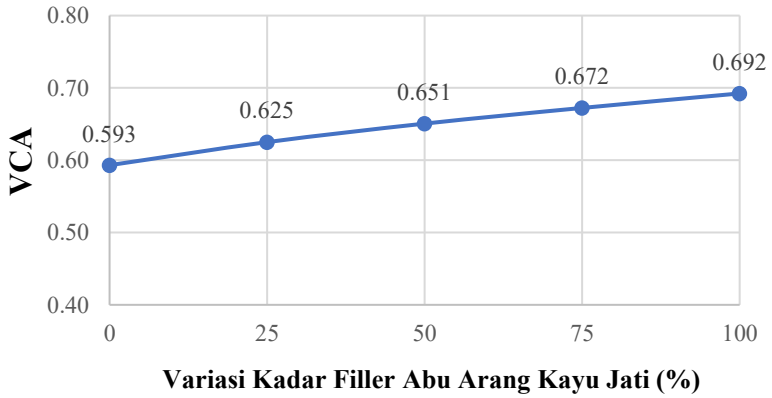
Gambar 5.17 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Density*

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.17 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati nilai *density* mengalami penurunan, Penurunan pertama sebesar 1,17% antara 0% ke 25%, kemudian menurun lagi sebesar 1,19% dari 25% ke 50%. Selanjutnya, penurunan lebih kecil terjadi pada interval 50% ke 75%, yakni 1,03%, dan terakhir penurunan 1,08% pada interval 75% ke 100%. Penurunan densitas disebabkan oleh perbedaan berat jenis antara kedua jenis *filler* yang digunakan. Karena densitas merupakan rasio antara massa dan volume, maka abu arang kayu jati yang memiliki berat jenis lebih rendah akan menghasilkan volume yang lebih besar pada massa yang sama, sehingga berdampak pada nilai densitas yang lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa kerapatan campuran dengan *filler* abu arang kayu jati lebih rendah dibandingkan campuran tanpa substitusi. Berat jenis abu arang kayu jati lebih ringan dibandingkan dengan *filler* debu batu Clereng, yang menyebabkan peningkatan volume pada massa yang setara. Selain itu, abu arang kayu jati memiliki sifat menyerap air, dan jika air tersebut tidak berikatan dalam campuran aspal, maka dapat mengurangi densitas. Seiring bertambahnya proporsi abu arang kayu jati dalam campuran, nilai densitas cenderung menurun karena air yang terserap tidak menambah massa campuran.

Penambahan *filler* ini juga dapat memengaruhi struktur dan kepadatan partikel dalam campuran. Apabila distribusi abu arang kayu jati tidak merata dan tidak mengisi rongga antar agregat secara optimal, maka dapat menimbulkan peningkatan volume rongga, yang akhirnya menurunkan densitas. Secara umum, nilai densitas sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti gradasi agregat, jenis dan kualitas material penyusun, tingkat pemadatan, proporsi aspal, serta penambahan bahan aditif dalam campuran.

5.2.7 Karakteristik Pengujian VCA pada KAO Campuran dengan Substitusi *filler* Abu Arang Kayu Jati

Grafik hasil nilai VCA akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.18 sebagai berikut.



Gambar 5.18 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap VCA

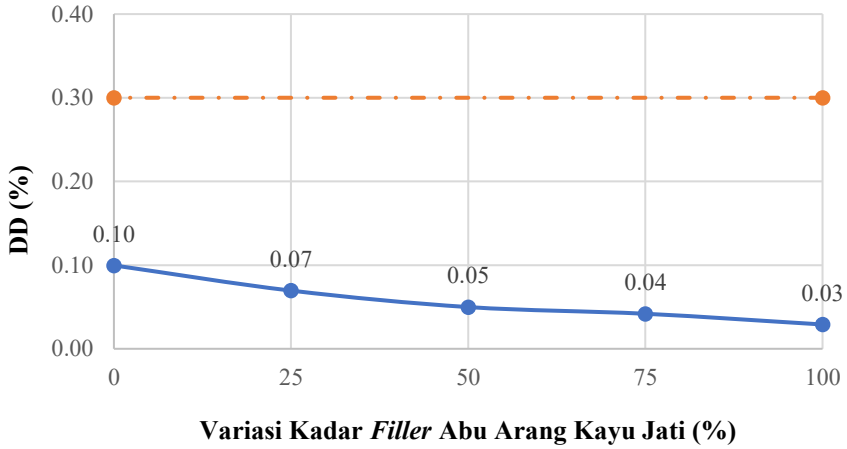
Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.18 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati nilai VCA pada saat penambahan substitusi *filler* abu arang kayu jati mengalami peningkatan. Peningkatan tertinggi terjadi pada interval 0% hingga 25% yaitu sebesar 5,39%. Selanjutnya, terjadi kenaikan sebesar 4,16% dari 25% ke 50%. Kenaikan berlanjut namun mulai melambat pada interval 50% ke 75% sebesar 3,23%, dan sedikit menurun kecepatannya menjadi 2,98% antara 75% hingga 100%. Hal ini mengindikasikan peningkatan nilai VCA pada campuran dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati tidak berpengaruh. Hal ini disebabkan meningkatnya nilai VITM dan nilai VMA serta penurunannya nilai

VFWA, sehingga jarak rongga antara agregat mengalami peningkatan. Sehingga akan mengurangi stone-on-stone contact pada campuran SMA.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai rasio $VCA_{mix}/VCA_{DRC} < 1,0$ sehingga nilai VCA pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* arang abu kayu jati telah memenuhi persyaratan.

5.2.8 Karakteristik Pengujian DD pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Grafik hasil nilai DD akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.



Gambar 5.19 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap DD

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.19 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* arang abu kayu jati, nilai DD pada saat penambahan substitusi *filler* abu arang kayu jati mengalami penurunan. Penurunan terbesar sebesar 30% pada interval antara 0% ke 25%. Selanjutnya, terjadi penurunan sebesar 28,57% dari 25% ke 50%. Penurunan melambat menjadi 20% pada interval 50% ke 75%, dan kembali menurun menjadi 25% antara 75% hingga 100%. Secara keseluruhan, pola ini menunjukkan bahwa penambahan *filler* secara konsisten menurunkan nilai DD, yang mengindikasikan peningkatan stabilitas campuran terhadap pengeluaran aspal bebas. Hal ini disebabkan *filler* arang abu kayu jati dapat meningkatkan kekentalan dan kohesi aspal dikarenakan abu arang kayu jati memiliki sifat *pozzolan*, maka

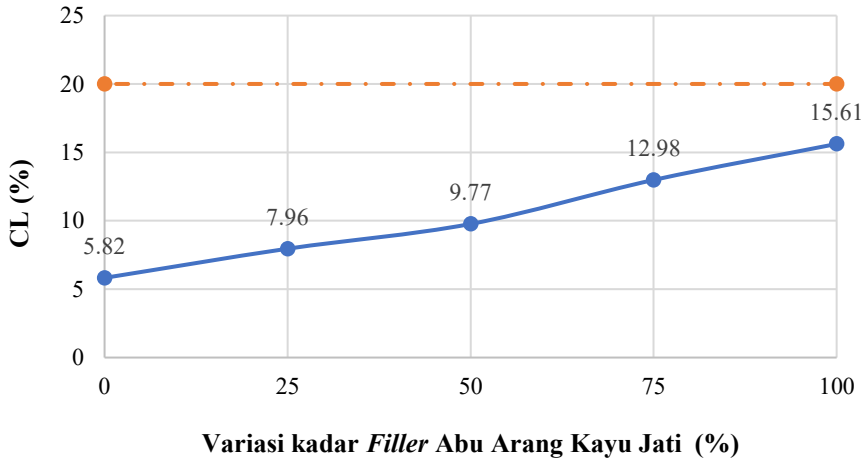
semakin besar kadar substitusi arang abu kayu jati kekentalan dan kohesi aspal semakin meningkat. Sehingga semakin besar kadar substitusi arang abu kayu jati membuat tingkat pemisahan aspal dalam campuran semakin kecil dan campuran bersifat homogen.

Hal ini sejalan dengan Syammaun, dkk (2020) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan *filler* menurunkan nilai DD, hal ini menyebabkan tingkat pemisahan aspal dalam campuran semakin kecil.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai DD yaitu <0,3% sehingga nilai DD pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* arang abu kayu jati telah memenuhi persyaratan.

5.2.9 Karakteristik Pengujian CL pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Nilai CL menggambarkan ketahanan benda uji terhadap keausan dengan menggunakan mesin *los angeles*. Pelaksanaan pengujian ini benda uji dimasukkan ke dalam mesin *los angeles* untuk mengetahui tingkat keausannya. CL memberikan gambaran sejauh mana ketahanan perkerasan aspal menahan gesekan antara roda kendaraan dengan permukaan jalan. Grafik hasil nilai CL akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.20 sebagai berikut.



Gambar 5.20 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap CL

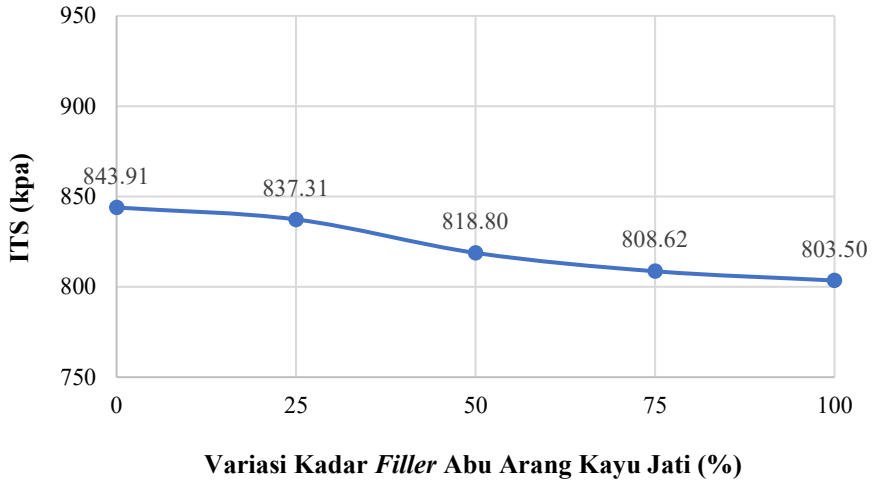
Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.20 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* arang kayu jati nilai CL mengalami peningkatan. peningkatan kadar *filler* abu arang kayu jati menyebabkan nilai CL mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Pada interval 0% ke 25%, terjadi kenaikan sebesar 36,60%, yang merupakan peningkatan tertinggi. Diikuti oleh kenaikan sebesar 22,74% dari 25% ke 50%. Selanjutnya, pada interval 50% ke 75%, terjadi kenaikan sebesar 32,84%. Kenaikan terakhir antara 75% ke 100% tercatat sebesar 20,25%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan *filler* secara bertahap meningkatkan potensi kehilangan cairan pada campuran, yang bisa mengindikasikan kecenderungan retensi air dalam material. Hal ini disebabkan arang kayu jati memiliki sifat *pozzolan* sehingga ikatan antar agregat dan aspal menjadi lebih baik. Nilai CL yang memenuhi sejalan dengan hasil dari nilai VCA, mengindikasikan bahwa campuran memiliki *stone-on-stone contact* yang baik. Hal ini membuat campuran menjadi lebih tahan terhadap beban lalu lintas yang berulang yang akan menyebabkan campuran menjadi aus dan mengalami penurunan kekuatan.

Penelitian ini sejalan dengan Fauziah, dkk (2014) dalam penelitiannya, bahwa penambahan *filler* memiliki daya serap yang lebih tinggi dibandingkan debu batu, sehingga lebih banyak aspal yang terserap dan mengakibatkan jumlah aspal yang tersisa untuk melapisi agregat menjadi lebih sedikit. Menurut Sihombing (2020), semakin rendah nilai CL mengindikasikan bahwa ketahanan benda uji semakin baik.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai CL yaitu <20 % sehingga nilai CL pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

5.2.10 Karakteristik Pengujian ITS pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu jati

ITS adalah pengujian yang berguna untuk mengetahui nilai gaya tarik tidak langsung pada campuran aspal akibat beban lalu lintas. Grafik hasil nilai ITS akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.21 di halaman selanjutnya.



Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap ITS

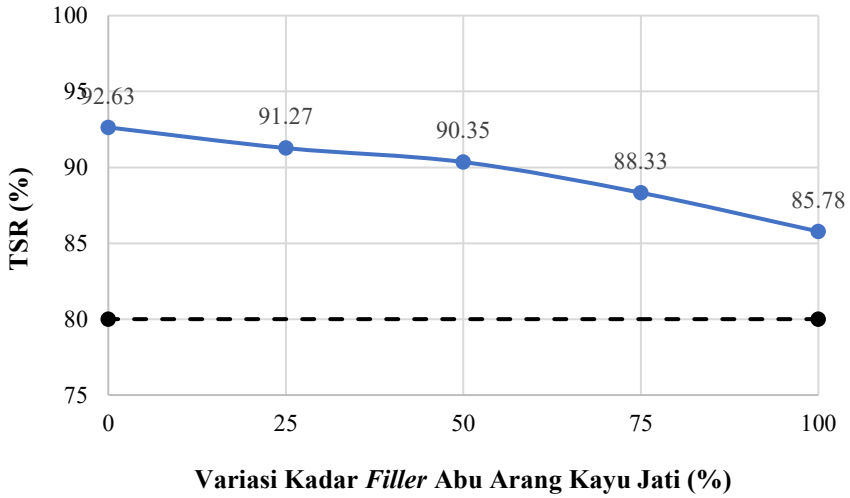
Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.21 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati nilai ITS menghasilkan nilai yang menurun. Penurunan pertama terjadi sebesar 0,78% pada interval 0% ke 25%. Kemudian, penurunan lebih besar terjadi pada interval 25% ke 50% sebesar 2,21%. Selanjutnya, pada interval 50% ke 75% terjadi penurunan sebesar 1,25%, dan pada interval 75% ke 100% penurunan tercatat sebesar 0,63%. Grafik ini menunjukkan bahwa meskipun penurunan terjadi secara bertahap, nilai ITS tetap berada dalam rentang yang cukup stabil, namun peningkatan kadar *filler* tetap berdampak pada penurunan kekuatan tarik tak langsung campuran.

Hal ini mengindikasikan penurunan nilai ITS pada campuran dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati berpengaruh. Hal ini abu arang kayu jati memiliki sifat pozzolan sehingga ikatan antar agregat dan aspal menjadi lebih baik. Nilai ITS mengalami peningkatan tidak sejalan dengan nilai CL yang mengalami penurunan mengindikasikan bahwa penambahan *filler* abu arang kayu jati memberi pengaruh terhadap ikatan antar agregat dan aspal yang lebih baik. Tingginya nilai ITS dapat memberikan kemampuan campuran untuk menahan kuat tarik yang disebabkan oleh beban kendaraan yang berefek kepada ketahanan yang lebih terhadap kerusakan berupa *fatigue crack*.

Hal ini sejalan dengan penelitian Pratama dan Hadi (2024) yang menyatakan Substitusi *filler* dengan abu arang kayu menyebabkan penurunan nilai ITS seiring meningkatnya kadar *filler* yang digunakan. Hal ini disebabkan oleh sifat *filler* yang memiliki daya serap tinggi terhadap aspal, sehingga sebagian besar aspal terserap oleh *filler* tersebut. Akibatnya, jumlah aspal yang tersedia untuk merekatkan agregat menjadi berkurang, yang melemahkan ikatan antar agregat. Kondisi ini berdampak pada penurunan kekuatan tarik tidak langsung. Meskipun penggunaan *filler* abu arang kayu jati dapat meningkatkan tingkat kepadatan campuran, terbatasnya aspal yang efektif menempel pada permukaan agregat menyebabkan kekuatan tarik campuran tetap menurun.

5.2.11 Karakteristik Pengujian TSR pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Nilai TSR diperoleh dari perbandingan kekuatan daya tahan tarik pada bahan uji dengan perendaman selama 24 jam pada waterbath dengan suhu 60ºC terhadap bahan uji tanpa rendaman. Nilai ini didapat dari perbandingan hasil daya tahan tarik yang kemudian diubah kedalam bentuk persen. Grafik hasil nilai TSR akibat pengaruh substitusi *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Gambar 5.22 sebagai berikut.



Gambar 5.22 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap TSR

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.22 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu jati nilai TSR mengalami penurunan. Penurunan pertama sebesar 1,47% terjadi antara 0% ke 25%, kemudian turun lagi sebesar 1,01% pada interval 25% ke 50%. Penurunan lebih besar tercatat pada interval 50% ke 75% sebesar 2,24%, dan penurunan tertinggi terjadi pada interval 75% ke 100% yaitu sebesar 2,89%. Secara keseluruhan, meskipun terjadi penurunan, nilai TSR masih berada di atas ambang batas minimum, yang menunjukkan bahwa ketahanan terhadap kerusakan akibat kelembapan masih tergolong baik.

Hal ini dapat dilihat bahwa *filler* abu arang kayu jati menjadikan nilai TSR menurun seiring bertambahnya kadar variasi substitusi *filler* abu arang kayu. Penurunan nilai TSR pada campuran SMA dengan *filler* abu arang kayu disebabkan oleh sifat *filler* tersebut yang memiliki daya serap tinggi terhadap aspal. Ketika *filler* menyerap lebih banyak aspal, jumlah aspal yang tersisa untuk membentuk ikatan kuat dengan agregat menjadi berkurang. Hal ini mengakibatkan campuran menjadi lebih rentan terhadap efek kelembapan dan air.

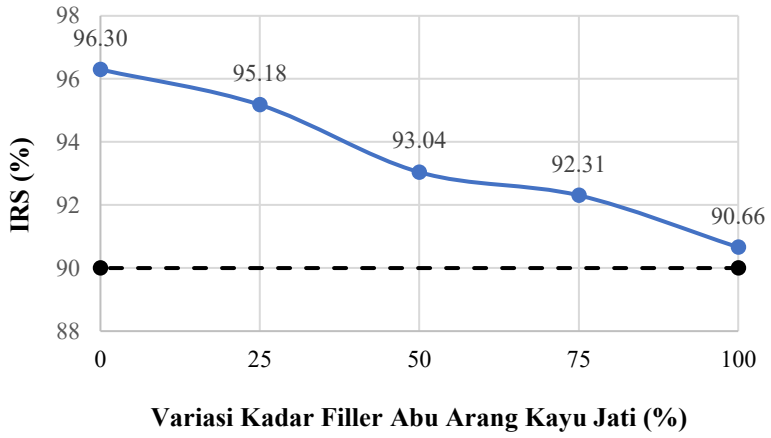
Dalam kondisi basah, air dapat dengan lebih mudah masuk ke dalam campuran, melemahkan ikatan antara aspal dan agregat, yang akhirnya menyebabkan penurunan nilai TSR. Artinya, ketahanan campuran SMA terhadap kerusakan akibat air menjadi lebih rendah. *Filler* abu arang kayu jati mungkin mengurangi efektivitas aspal dalam melapisi dan melindungi agregat, sehingga campuran lebih mudah mengalami pengelupasan (*stripping*) ketika terkena air. Akibatnya, nilai TSR menurun menandakan berkurangnya ketahanan terhadap kelembapan dalam campuran tersebut.

Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Tajudin dan Suparma (2017), yang menunjukkan bahwa penurunan nilai TSR disebabkan oleh adanya pengaruh air yang melemahkan ikatan antara agregat dan aspal, sehingga mengurangi kekuatan tarik campuran.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai TSR yaitu > 80% sehingga nilai TSR pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

5.2.12 Karakteristik Pengujian IRS pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati

IRS adalah angka untuk mengukur kekuatan sisa pada campuran SMA dan menganalisis kerusakan campuran aspal akibat suhu ekstrem. Pengujian ini dilakukan dengan perendaman selama 24 jam pada suhu 60°/C. Pengaruh subsitusi *filler* abu arang kayu jati terhadap nilai IRS dapat dilihat pada Gambar 5.23 sebagai berikut.



Gambar 5.23 Grafik Pengaruh Abu Arang Kayu Jati Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap IRS

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.23 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* abu arang kayu IRS mengalami penurunan. Penurunan awal terjadi sebesar 1,16% pada interval 0% ke 25%, kemudian diikuti penurunan lebih besar sebesar 2,25% antara 25% ke 50%. Penurunan melambat menjadi 0,78% pada interval 50% ke 75%, dan kembali naik menjadi 1,79% pada interval 75% ke 100%. Meskipun terjadi penurunan bertahap, seluruh nilai IRS tetap berada di atas batas minimum, yang menunjukkan bahwa nilai ketahanan terhadap *stripping* (pengelupasan) masih dapat diterima.

Hal ini mengindikasikan abu arang kayu memiliki berat jenis lebih rendah, yang membuat jumlah pasir semakin sedikit dari pada Clereng pada berat yang sama. Hal ini membuat abu arang kayu kurang efektif dalam mengurangi *void* yang membuat penurunan kerapatan dan kepadatan pada campuran menjadi kurang baik, sehingga membuat campuran aspal kurang tahan terhadap perendaman pada suhu tinggi. Penurunan nilai IRS pada tahap ini menunjukkan bahwa campuran aspal kurang mampu mempertahankan kekuatannya meskipun terkena air dan suhu titik keritis aspal, Hal ini disebabkan oleh semakin padatnya campuran aspal, yang berkontribusi terhadap ketahanan yang lebih baik terhadap kerusakan akibat air.

Hal ini sejalan dengan penelitian Weimintoro, dkk (2021) menyatakan Penurunan stabilitas diilustrasikan seperti kondisi perkerasan jalan yang tergenang air saat musim hujan, yang berpotensi memengaruhi kinerja lapisan aspal, terutama dalam hal ketahanan, durabilitas, dan kemampuan menahan beban. Walaupun terjadi penurunan, seluruh nilai stabilitas 24 jam yang diperoleh tetap berada di atas batas minimum 800 kg untuk jalan dengan lalu lintas berat, sesuai dengan ketentuan Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai IRS yaitu > 90% sehingga nilai IRS pada campuran SMA dengan variasi campuran *filler* abu arang kayu jati telah memenuhi persyaratan.

5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan Subtitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Rekapitulasi hasil pengujian pada campuran dengan menggunakan *filler* abu arang kayu jati dapat dilihat pada Tabel 5.14 di halaman selanjutnya.

Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Tinjauan	Parameter	Substitusi Limbah Abu Arang Kayu Jati (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	Stabilitas (kg)	942,25	917,92	896,21	870,44	856,46	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai stabilitas cenderung mengalami penurunan signifikan. Sehingga campuran lebih mudah menerima deformasi.
	Flow (mm)	2,72	2,80	3,00	3,20	3,38	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai *flow* cenderung mengalami peningkatan signifikan. Sehingga campuran menjadi lebih plastis.
	MQ (kg/mm)	346,86	330,45	300,03	272,61	253,22	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai MQ cenderung mengalami penurunan signifikan. Sehingga pada titik optimum, nilai MQ menunjukkan fleksibilitas rendah, sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap deformasi. Namun, setelah melewati titik optimum, fleksibilitas campuran meningkat, yang menyebabkan campuran lebih mudah mengalami deformasi.
	ITS (kPa)	843,91	837,31	818,80	808,62	803,50	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai ITS cenderung mengalami penurunan signifikan. Sehingga kurang mampu dalam menahan kuat tarik.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Tinjauan	Parameter	Substitusi Limbah Abu Arang Kayu Jati (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumentrik	VITM (%)	3,86	4,16	4,49	4,65	4,85	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai VITM cenderung mengalami peningkatan tidak signifikan. Sehingga menyebabkan campuran menjadi *porous*. .
	VFWA (%)	78,05	76,43	74,80	73,98	72,98	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai VFWA cenderung mengalami penurunan tidak signifikan. disebabkan *filler* secara efektif me.ngisi rongga-rongga dalam campuran. Dengan berkurangnya ukuran rongga,campuran menjadi kurang padat dan kedap.
	VMA (%)	17,49	17,63	17,80	17,82	17,87	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai VMA cenderung mengalami peningkatan. Menandakan campuran memiliki jarak antar agregat semakin menjauh.
	VCA	0,593	0,625	0,651	0,672	0,692	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai VCA cenderung mengalami peningkatan tidak signifikan. Sehingga campuran masih mampu menahan deformasi.
	Density (gr/cc)	2,384	2,356	2,328	2,304	2,279`	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai *Density* cenderung mengalami peningkatan signifikan. Sehingga campuran memiliki kerapatan lebih rendah .

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Abu Arang Kayu Jati

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Arang Kayu Jati (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas	IRS (%)	96,30	95,18	93,04	92,31	90,66	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai IRS cenderung mengalami penurunan tidak signifikan. Sehingga campuran kurang tahan terhadap air, suhu, dan udara.
	Draindown (%)	0,10	0,07	0,05	0,04	0,03	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai *DD* cenderung mengalami penurunan signifikan. Sehingga aspal pada campuran lebih terikat dikarenakan tercampur secara homogen
	CL (%)	5,82	7,96	9,77	12,98	15,61	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai CL cenderung mengalami peningkatan signifikan. Sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap beban lalu lintas yang berterhadap beban lalu lintas yang berulang yang akan menyebabkan campuran menjadi aus.
	TSR (%)	92,63	91,27	90,35	88,33	85,78	Semakin besar substitusi *filler* AAK, nilai TSR cenderung mengalami penurunan tidak signifikan. Sehingga mengakibatkan campuran menjadi lebih rentan terhadap efek kelembapan dan air.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis perhitungan dari karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm dengan variasi substitusi *filler* abu arang kayu jati sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Substitusi *filler* abu arang kayu jati sebesar 25% terbukti menghasilkan kinerja terbaik dengan nilai stabilitas tertinggi mencapai 1028,53 kg dan nilai ITS sebesar 454,14 kPa. menunjukkan bahwa kadar 25% mampu meningkatkan kekuatan struktural campuran SMA dibandingkan variasi lainnya. Namun, pada kadar 50%, 75%, dan 100% terjadi penurunan nilai stabilitas dan ITS, walaupun masih berada dalam batas spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.
2. Hasil pengujian volumetrik menunjukkan bahwa pada kadar 25% substitusi *filler* abu arang kayu jati, nilai VMA, VITM, VFWA, dan density masih sesuai dengan standar spesifikasi. Akan tetapi, peningkatan kadar *filler* di atas 25% mengakibatkan perubahan yang kurang baik, seperti meningkatnya nilai *flow* dan menurunnya nilai MQ. Kondisi tersebut menandakan bahwa campuran menjadi lebih plastis dan kurang kaku, sehingga mengurangi stabilitas volumetrik campuran.
3. Uji durabilitas memperlihatkan bahwa nilai IRS dan TSR meningkat pada kadar 0%, 25%, dan 50%, namun mengalami penurunan signifikan pada kadar 75% dan 100%. Nilai DD tertinggi hanya sebesar 0,03%, masih jauh di batas yang ditentukan, sedangkan nilai CL tertinggi yaitu 15,59% pada kadar 100%, masih memenuhi syarat <20%. Secara keseluruhan, substitusi *filler* abu arang kayu jati dengan kadar 25% merupakan kondisi paling optimum, karena memberikan hasil terbaik antara kekuatan, stabilitas volumetrik, dan ketahanan terhadap pengaruh air.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan penulis dapat memberikan saran sebagai berikut.

1. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk menganalisis sifat kimia AAK dan VIATOP^{66} dalam campuran SMA 25 mm. Analisis kimia akan membantu memahami komponen yang memengaruhi sifat fisik dan mekanis campuran serta mengevaluasi potensi kedua bahan sebagai *filler* dalam aspal. Pendekatan ini diharapkan memberikan wawasan lebih dalam untuk inovasi jalan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.
2. Untuk menjaga kualitas campuran SMA**,** disarankan menggunakan abu arang kayu jati maksimum sebesar 25% dari total *filler*. Lebih dari itu, kestabilan dan kekuatan campuran berpotensi menurun.
3. Penggabungan abu arang kayu jati dengan bahan *filler* aktif seperti hydrated lime atau semen dapat menjadi strategi untuk meningkatkan daya rekat dan stabilitas.
4. Pengujian lebih lanjut dalam kondisi nyata dan jangka panjang, seperti pada beban lalu lintas tinggi dan cuaca ekstrem, penting dilakukan untuk memastikan kelayakan penggunaan *filler* ini dalam skala proyek.
5. Penelitian ini sebaiknya mencakup uji ketahan dinamis agar performa campuran lebih representatif terhadap kondisi lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Akter, R., Hossain, M. K., Anwar, M. S., & Rahman, K. (2022). Performance evaluation of coal dust and wood powder ash as alternates of conventional filler in the asphalt concrete. *Sustainable Engineering and Innovation*, *4*(1), 82.

Alirusi, R., Maryam, dan Massara, A. 2023. Studi Experimental Campuran Stone Matrix Asphalt (*SMA*) dengan Penambahan Zat Aditif Polyrethane terhadap Ketahanan Deformasi dan Modulus Elastis. Innovative: Journal of Social Research, 3(3), 5001–5015.

Alpius, Soean K. S.W., dan Mangontan R. 2020. Karakteristik Stone Matrix Asphalt Menggunakan Batu Kali Tdebu Kabupaten Toraja Utara. *Annual Conference on Compurter Science and Engineering Techonolgy (AC2SET).* Orlando. 23 September 2020.

Anggraini, Y., Malik, A., & Sebayang, M. (n.d.). *Analisa Kinerja Campuran AC-WC dengan Pemanfaatan Kombinasi Limbah Abu Bata dan Abu Serbuk Kayu Sebagai Filler*. *Jurnal SAINSTEK STT Pekanbaru - VOL. 08 NO. 02 (2020).*

Ardian, M., & Rosyad, F. 2022. Analisis Pengaruh Pengganti *Filler* Dengan Abu Serbuk Kayu Terhadap Kinerja Perkerasan Aspal AC-WC. In *Bina Darma Conference on Engineering Science (BDCES)* (Vol. 4, No. 2, pp. 106-115).

Bangngalino, D., & Rachman, R. 2022. Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar dengan BahanTambah Kadar Ban Bekas. *Paulus Civil Engineering Journal*, *4*(3), 452-460.

Bethary, R. T., Intari, D. E., Fathonah, W., dan Miftaful, Z. 2020. Pengaruh Air Hujan di Kota Industri terhadap Kinerja Campuran Beraspal Modifikasi Polimer. Jurnal Transportasi, 20(3), 213–220.

Bowoputro, H., Djakfar, L., & Kusumaningrum, R. 2016. Pengaruh Penambahan Serbuk Kayu Jati Terhadap Karakteristik Marshall Pada Campuran Aspal Porus. *Rekayasa Sipil*, *10*(3), 250-255.

Cahya, C. Y., Saleh, S. M., & Anggraini, R. 2018. Karakteristik Penggunaan Abu Serbuk Kayu sebagai subtitusi *filler* pada campuran laston lapis aus. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, *1*(4), 61-68.

Chasanah, F., dan Sukmo, T. A., 2023. Pengaruh Bubuk Talk Sebagai Bahan *Filler* Pengganti pada Campuran *AC-WC*. *AJIE - Asian Journal of Innovation and Entrepreneurship*, *4*(1), 82-90.

Da Gomez, L. M., & Meutia, W. 2021. Penggunaan *Filler* Abu Serbuk Kayu Kelapa Pada Aspal Beton AC-WC. *Jurnal Artesis*, *1*(2), 161-166.

Direktorat Jenderal Bina Marga. 2018. Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2018 (Revisi 2) Untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan. *Edaran Dirjen Bina Marga Nomor 02/SE/Db/2018*, pp. 1–1036.

Fauziah, M., & Anggraini, N. 2017. Kajian Perbandingan Karakteristik Campuran AC-BC Menggunakan Agregat Batu Pecah Sukadana, Lampung dan Clereng, DIY. *Konferensi Nasional Teknik Sipil*, *2*.

Hawari, F., dan Lizar. 2021. Analisis Pengaruh Penggantian *Filler* Abu Sawit *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Terhadap Karakteristik Perkerasan Lentur (*AC-WC*). *Jurnal Inovtek Seri TEKLA*, *3*(1), 1 – 6.

Imananto, E. I. 2023. Pemanfaatan Limbah Serbuk Kayu Jati Sebagai Material Pengisi Pada Campuran Asphalt Treated Base (ATB) Ditinjau Dari Uji Marshall. *Jurnal Teknik Sipil*, *8*(1), 22-29.

Krisdianto, A., Wijianto, S. T., & Pramuko, I. P. 2016. *Karakteristik Komposit Serbuk Kayu Jati dengan Fraksi Volume 25%, 30%, 35% Terhadap Uji Bending, Uji Tarik dan Daya Serap Bunyi untuk Dinding Peredam Suara* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).

Laras, P, H., Murniati., dan Desriantomy. 2022. Karakteristik *Marshall* Pada Campuran *HRS-WC* Dengan Penambahan Arang Kayu Tumbuk Sebagai Bahan Pengisi (*Filler*). Jurnal Teoritis dan Terapan Bidangan Keteknikan Vol. 6, No.1, Oktober 2022. Universitas Palangka Raya.

M. Da Gomez, L., & Meutia, W. 2021. Penggunaan *Filler* Abu Serbuk Kayu Kelapa pada Aspal Beton AC-WC. *Jurnal ARTESIS*, *1*(2), 161–166.

Muslimin, Imananto, E. I., & Munasih. 2022. Pemanfaatan Limbah Serbuk Kayu Jati sebagai Material Pengisi pada Campuran Asphalt Treated Base (ATB) Ditinjau dari Uji *Marshall* . *Student Journal GELAGAR*, *4*(2), 182–188.

Pratama, F. Y., & Hadi, M. A. 2024. Pemanfaatan Limbah Abu Arang Kayu Mindi Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA). AGREGAT*, *9*(2), 1162-1170.

Prayogo, A., Suprayitno, H., & Budianto, H. 2018. Penentuan Kriteria dalam Pemilihan Jenis Perkerasan pada Dataran Tinggi di Kabupaten Trenggalek. *Journal of Civil Engineering*, *33*(1), 27–34.

Purbanto, I, G, R., Thanaya, I. N. A., dan Dewi, N. K. S. 2022. Analasis Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt (*SMA*) Dengan Serat Selulosa Serabut Kelapa. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 26(1), 1-10.

Putra, H, K., dan Fidausi, M. 2019. Studi Eksperimental Penambahan Serbuk Arang Kayu Dengan Kadar 10% Terhadap *Filler* Semen Pada Campuran Perkerasan *AC-WC*. Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Universitas Madura Vol. 4 No.2 Desember 2019 ISSN 2527-5542.

Ridwan, F. S., & Nadia, N. 2017. Analisis Pengaruh Pemanfaatan Abu Sekam Sebagai *Filler* Pada Campuran Aspal Beton. *Konstruksia*, *8*(2), 1-8.

Rohman, M. F., Hasanuddin, A., & Wicaksono, L. A. 2020. Penggunaan *Filler* Arang Kayu Pada Aspal Lataston Dan Aspal Laston. *Jurnal Simetrik*, *10*(2), 368-371.

Rosyad, F., & Ardian, M. 2019. Analisis Pengaruh Pengganti *Filler* dengan Abu Serbuk Kayu terhadap Kinerja Perkerasan Aspal AC-WC. *Jurnal TEKNO*, *16*(1), 106–115.

Sabaruddin. 2011. Pemanfaatan Limbah Abu Serbuk Kayu sebagai *Filler* Hot Rolled Sheet-Base (HRS-Base). *Dinamika Teknik Sipil*, *11*(2), 160–165.

Shohib, A., Silva, T. Da, Pramudono, B., Rokhati, N., & Kasmiyatun, M. 2023. Analisis Komposisi Selulosa, Hemiselulosa, dan Lignin dalam Berbagai Jenis Kayu : Metode Chesson-Datta. *Inovasi Teknik Kimia*, *8*(4), 309–314.

Sihombing, A. V. R. 2020. Pengaruh Penggunaan Agregat dari Sumber yang Berbeda terhadap Kinerja Campuran Beraspal Porus. Jurnal Transportasi, 20(3), 181–190.

Simanjuntak, A. J., & Silitonga, S. P. 2021. Pemanfaatan Abu Serbuk Kayu Sebagai Tambahan *Filler* Pada Campuran Perkerasan Jalan Jenis HRS-WC (Hot Rolled Sheet-Wearing Course). *Jurnal Teknika: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Keteknikan*, *5*(1), 1-10.

Sitanggang, R., & Saribanon, E. 2018. Faktor-Faktor Penyebab Kemacetan di DKI Jakarta. *Jurnal Manajemen Bisnis Transportasi Dan Logistik, 4*(3), 289–296.

Sukirman, S. 1992. *Perkerasan Lentur Jalan Raya.* Penerbit Nova. Bandung.

Sukirman, S. 2003. *Beton Aspal Campuran Panas.* Penerbit Grani. Jakarta.

Sukirman, S. 2010. *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Jalan.* Penerbit Nova. Bandung.

Sunaryo, E., Wati, D. A. R., Pramitasari, R. E., & Rosadi, M. M. 2024. Pengaruh Variasi Kadar Perekat Terhadap Laju Pembakaran Pada Briket Berbahan Dasar Serbuk Kayu. *Jurnal MOTION (Manufaktur, Otomasi, Otomotif, dan Energi Terbarukan)*, *2*(2), 52-56.

Syammaun, T., Rani, H. A., dan Amali, P. 2020. Pengaruh Substitusi *Styrofoam* pada Campuran Aspal Porus dan Serbuk Arang Tempurung Kelapa Sebagai *Filler*. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-14*.

Tae, S. A. A., Sebayang, N., & Erfan, M. 2024. Studi Penelitian Menggunakan Material Lokal Terhadap Karakteristik Agregat (Quarry Sungai Talau Kab. Belu - NTT). *Student Journal GELAGAR*, *10*(10), 1–9.

Tajudin, A. N., dan Suparma, L. B. 2017. Pengaruh Rendaman pada *Indirect Tensile Strength* Campuran *AC-BC* dengan Limbah Plastik sebagai Agregat Pengganti. Media Komunikasi Teknik Sipil, 23(2), 166–173.

Weimintoro, W., Sari, R. N. A., Hermawan, O. H., & Santoso, T. H. 2021. Pengaruh Lama Perendaman Benda Uji Ac-Wc Terhadap Nilai Stabilitas Dan Nilai Kelelehan *(Flow)* Dengan Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018. *SIGMA: Jurnal Teknik Sipil*, *1*(2), 17-28.

Widayanti, A., Aryani Soemitro, R. A., Ekaputri, J. J., & Suprayitno, H. 2020. Analisis Pemanfaatan Zat Aditif pada Reclaimed Asphalt Pavement untuk Lapisan Beton Aspal. *Jurnal Manajemen Aset Infrastruktur & Fasilitas*, *4*(1), 23–32.

LAMPIRAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

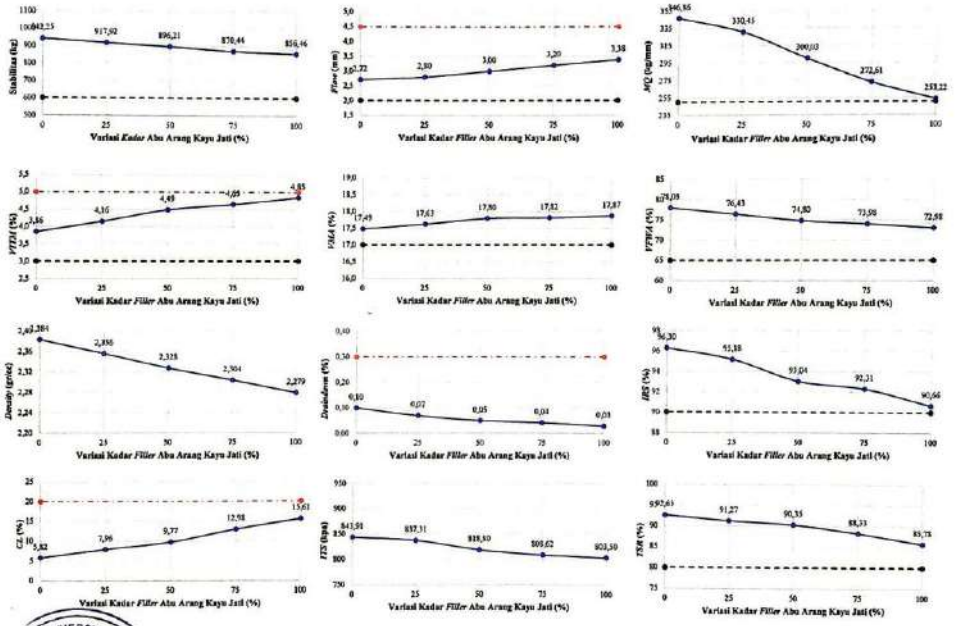
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 26 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Filler Abu Arang Kayu Jati*

REKAPITULASI PENGUJIAN *FILLER ABU ARANG KAYU JATI*

SPESIFIKASI *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	Kadar Filler (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	*Flow* (mm)	VITM (%)	VMA (%)	Dmindown (%)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)	*VCA*	MQ (kg/mm)	VFWA (%)	Density	ITS	TSR	CL
	0	942,25	2,72	3,86	17,49	0,10	907,37	96,30	0,593	346,86	78,05	2,384	843,91	92,63	5,82
	25	917,92	2,80	4,16	17,63	0,07	862,41	95,18	0,625	330,45	76,43	2,356	837,31	91,27	7,96
	50	896,21	3,00	4,49	17,80	0,05	833,85	93,04	0,651	300,03	74,80	2,328	818,80	90,35	9,77
	75	870,44	3,20	4,65	17,82	0,04	803,47	92,31	0,672	272,61	73,98	2,304	808,62	88,33	12,98
	100	856,46	3,38	4,85	17,87	0,03	776,47	90,66	0,692	253,22	72,98	2,279	803,50	85,78	15,61
BINA MARGA 2018		**> 600**	**2-4,5**	**3 - 5**	**> 17**	**<0,3**	**> 600**	**>90**	**<1**	**>250**	**>65**	**>2**		**>80**	**<20**



Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik Sipil
Universitas Islam Indonesia

Ir. Hanafi Ismail, MSc Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK. 01 511 0101

Mengetahui
Kabag. Tata Usaha

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 25 Hasil & Rekap Pengujian *DRAINDOWN Setelah KAO*

HASIL PENGUJIAN DRAINDOWN SETELAH KAO

Kadar Filler (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
0,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1515,80	1443,43	1457,28
	2	Berat Benda Uji	1178,01	1104,87	1214,16
	3	Berat Awal Piring Penampung	337,79	338,56	243,12
	4	Berat Akhir Piring Penampung	338,05	340,60	244,24
	5	Draindown	0,022%	0,18%	0,09%
	6	Rata-Rata Draindown		0,10	
25,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1376,52	1535,48	1412,22
	2	Berat Benda Uji	1189,95	1190,34	1053,91
	3	Berat Awal Piring Penampung	186,57	345,14	358,31
	4	Berat Akhir Piring Penampung	187,01	346,20	359,18
	5	Draindown	0,037%	0,09%	0,08%
	6	Rata-Rata Draindown		0,070	
50,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1368,03	1524,00	1534,54
	2	Berat Benda Uji	1207,17	1277,51	1176,23
	3	Berat Awal Piring Penampung	160,86	246,49	358,31
	4	Berat Akhir Piring Penampung	161,12	247,30	359,07
	5	Draindown	0,02%	0,06%	0,06%
	6	Rata-Rata Draindown		0,050	
75,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1357,19	1545,18	1544,95
	2	Berat Benda Uji	1196,33	1318,95	1186,83
	3	Berat Awal Piring Penampung	160,86	226,23	358,12
	4	Berat Akhir Piring Penampung	161,32	226,79	358,65
	5	Draindown	0,04%	0,04%	0,04%
	6	Rata-Rata Draindown		0,042	
100,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1510,33	1528,09	1535,10
	2	Berat Benda Uji	1174,70	1180,58	1195,98
	3	Berat Awal Piring Penampung	335,63	347,51	339,12
	4	Berat Akhir Piring Penampung	335,87	348,08	339,34
	5	Draindown	0,02%	0,05%	0,02%
	6	Rata-Rata Draindown		0,029	

REKAPITULASI DRAINDOWN

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	*DRAINDOWN*
0	6,4	0,10
25		0,07
50		0,05
75		0,04
100		0,03



Diperiksa Oleh
Koordinator Laboratorium, Jurusan Teknik Sipil

Ir. Ibnu Kresnan, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 24 Hasil & Rekap Pengujian *IRS*

HASIL PENGUJIAN IRS

Kadar Filler		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi			
													Tebal Sampel		Koreksi	
		1	2	3	Rata-Rata		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX
0,0%	1	71,61	71,66	72,12	71,80	0,83	55	19,20	1056,23	871,43	901,78	600	71,4	73	0,83	0,81
	2	70,45	69,31	69,43	69,73	0,89	53	19,20	1017,82	905,86			68,3	69,9	0,89	0,89
	3	70,31	70,86	70,56	70,58	0,86	56	19,20	1075,44	928,03			69,9	71,4	0,89	0,83
25,0%	1	70,45	70,31	70,71	70,49	0,87	58	19,20	1113,84	965,03	969,50	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	70,86	70,51	70,75	70,71	0,86	60	19,20	1152,25	988,32			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	69,94	69,86	70,04	69,95	0,89	56	19,20	1075,44	955,13			69,9	71,4	0,89	0,83
50,0%	1	71,01	70,31	69,91	70,41	0,87	60	19,20	1152,25	1002,00	990,01	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	68,52	69,25	69,58	69,12	0,89	59	19,20	1133,05	1008,41			68,3	69,9	0,89	0,89
	3	70,11	70,27	70,32	70,23	0,88	57	19,20	1094,64	959,63			69,9	71,4	0,89	0,83
75,0%	1	70,78	70,79	70,87	70,81	0,85	56	19,20	1075,44	917,85	941,15	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	70,60	70,21	70,48	70,43	0,87	54	19,20	1037,03	900,97			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	69,95	69,91	70,09	69,98	0,89	59	19,20	1133,05	1004,64			69,9	71,4	0,89	0,83
100,0%	1	70,21	70,54	70,31	70,35	0,87	55	19,20	1056,23	920,89	907,81	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	69,78	69,88	69,76	69,81	0,89	54	19,20	1037,03	922,95			68,3	69,9	0,89	0,89
	3	70,20	70,13	70,06	70,13	0,88	52	19,20	998,62	879,58			69,9	71,4	0,89	0,83

REKAP IRS

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	Stabilitas 0 Jam	Stabilitas 24 Jam	IRS
0	6,4	950,95	901,78	94,83
25		1003,80	969,50	96,58
50		1020,53	990,01	97,01
75		974,90	941,15	96,54
100		945,34	907,81	96,03





Diperiksa Oleh
Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Dr. Ir. Faris Ghufron, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Reski
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

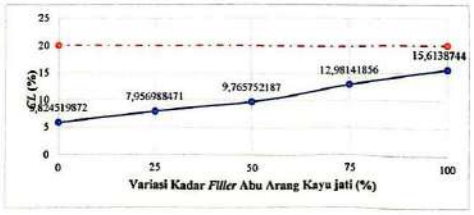
Lampiran 23 Hasil & Rekap Pengujian *Cantabro Loss*

HASIL PENGUJIAN *CANTABRO LOSS*

Substitusi	No.	Keterangan	1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi	1165,50	1177,21	1164,78
	2	Berat Sesudah Abrasi	1126,03	1062,89	1113,81
	3	Persentase Kehilangan Berat	3,39	9,71	4,38
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	5,82		
25%	1	Berat Sebelum Abrasi	1169,22	1164,70	1180,34
	2	Berat Sesudah Abrasi	1060,2	1062,55	1112,16
	3	Persentase Kehilangan Berat	9,32	8,77	5,78
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	7,96		
50%	1	Berat Sebelum Abrasi	1142,63	1114,11	1161,87
	2	Berat Sesudah Abrasi	1041,72	984,25	1059,51
	3	Persentase Kehilangan Berat	8,83	11,66	8,81
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	9,77		
75%	1	Berat Sebelum Abrasi	1131,71	1158,98	1158,29
	2	Berat Sesudah Abrasi	989,57	1006,19	1005,38
	3	Persentase Kehilangan Berat	12,56	13,18	13,20
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	12,98		
100%	1	Berat Sebelum Abrasi	1188,23	1173,45	1182,43
	2	Berat Sesudah Abrasi	996,63	993,82	1000,23
	3	Persentase Kehilangan Berat	16,12	15,31	15,41
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	15,61		

REKAP *CANTABRO LOSS*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL
0	6,4	5,82
25		7,96
50		9,77
75		12,98
100		15,61



Disahkan Oleh
Ketua Program Studi/Ketua Departemen Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kharisma, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

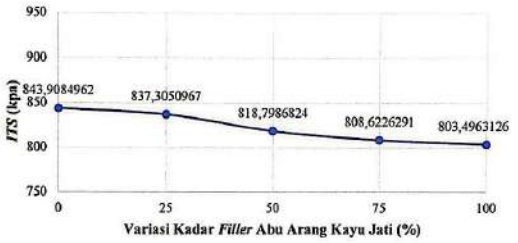
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 22 Rekap Hasil Pengujian *ITS & IRS*

REKAP HASIL PENELITIAN *ITS & IRS*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	ITS	ITS 24 Jam	TSR (%)
0	6,4	843,908	781,920	92,655
25		837,305	764,200	91,269
50		818,799	739,775	90,349
75		808,623	714,222	88,326
100		803,496	689,216	85,777





Yogyakarta, Juli 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 21 Hasil Pengujian *TSR*

HASIL PENGUJIAN TSR

Kadar Aspal	Substitusi		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (inchi)				A0	Ariolj Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi				Angka Koreksi				ITS 24 JAM Kpa		
																			Tebal Sampel		Koreksi		Tebal Sampel		Koreksi				
			1	2	3	rata2		1	2	3	rata2		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	awal	rata2	MIN
6,4%	0,0%	1	69,20	69,00	69,70	69,30	0,89	4,01	4,01	4,01	4,01	0,156	48	19,89	954,49	385,33	362,73	600	68,3	69,9	0,89	0,86	3,9	4	0,1600	0,156	849,55	781,92	600
		2	71,30	71,70	70,50	71,17	0,84	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	46	19,89	914,72	348,53			69,9	71,4	0,86	0,83	4	4,1	0,156	0,152	748,07		
		3	72,12	72,55	72,31	72,33	0,82	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	48	19,89	954,49	354,34			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	748,14		
	25,0%	1	72,20	72,61	72,16	72,32	0,82	4,05	4,05	4,05	4,05	0,154	50	19,89	994,26	369,12	368,87	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,160	0,156	770,18	764,20	600
		2	74,58	73,92	74,53	74,34	0,79	4,05	4,05	4,05	4,05	0,154	50	19,89	994,26	357,73			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	726,52		
		3	73,02	73,42	72,65	73,03	0,81	4,00	4,00	4,00	4,00	0,156	52	19,89	1034,03	379,74			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	795,90		
	50,0%	1	72,34	71,60	72,13	72,02	0,82	3,99	3,99	3,99	3,99	0,16	48	19,89	954,49	355,98	355,56	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	758,46	739,77	600
		2	72,65	72,17	72,33	72,38	0,82	4,04	4,04	4,04	4,04	0,15	46	19,89	914,72	339,28			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	709,91		
		3	72,32	72,35	71,87	72,18	0,82	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	48	19,89	954,49	355,13			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	750,96		
	75,0%	1	68,80	68,90	68,58	68,76	0,89	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	42	19,89	835,18	337,16	324,63	600	68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	751,12	714,22	600
		2	69,60	69,76	70,52	69,96	0,89	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	40	19,89	795,41	320,24			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	698,67		
		3	70,61	70,29	69,76	70,22	0,88	3,98	3,98	3,98	3,98	0,16	40	19,89	795,41	316,49			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	692,88		
	100,0%	1	69,48	69,55	70,05	69,69	0,89	4,05	4,05	4,05	4,05	0,15	42	19,89	835,18	337,16	320,87	600	68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	730,24	689,22	600
		2	71,34	72,19	71,69	71,74	0,83	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	40	19,89	795,41	297,93			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	635,81		
		3	70,76	70,19	70,66	70,54	0,86	4,05	4,05	4,05	4,05	0,15	42	19,89	835,18	327,52			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	701,59		

Diajukan Oleh
Manager Laboratorium Bahan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roki
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 20 Hasil Pengujian *IRS*

HASIL PENGUJIAN IRS

Kadar Aspal	Substitusi		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi Tebal				Angka Koreksi Diameter				ITS 0 JAM Kpa		
																			Tebal Sampel		Koreksi		Tebal Sampel		Koreksi				
			1	2	3	rata2		1	2	3	rata2		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	awal	rata2	MIN
6,4%	0,0%	1	70,6	70,30	71,1	70,67	0,86	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	50	19,89	994,26	387,56	378,76	600	69,9	71,4	0,86	0,83	4	4,1	0,164	0,16	879,67	843,91	600
		2	69,1	71,90	72,5	71,17	0,84	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	48	19,89	954,49	363,39			69,9	71,4	0,86	0,83	4	4,1	0,16	0,156	800,39		
		3	68,5	69,90	68,4	68,93	0,89	4,02	4,02	4,02	4,02	0,16	48	19,89	954,49	385,33			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	851,66		
	25,0%	1	70,7	70,80	70,4	70,63	0,86	3,99	3,99	3,99	3,99	0,16	48	19,89	954,49	372,63	380,85	600	69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	808,94	837,31	600
		2	70,1	70,30	70,2	70,20	0,88	4,07	4,07	4,07	4,07	0,15	46	19,89	914,72	364,30			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	779,24		
		3	66,9	66,30	65,8	66,33	0,94	4,05	4,05	4,05	4,05	0,15	48	19,89	954,49	405,63			65,1	66,7	0,96	0,93	4	4,1	0,156	0,152	923,74		
	50,0%	1	68,8	70,50	70,2	69,83	0,89	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	45	19,89	894,83	361,25	366,66	600	68,3	69,9	0,89	0,89	3,9	4	0,16	0,156	791,79	818,80	600
		2	69,1	68,80	67,5	68,47	0,89	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	45	19,89	894,83	361,25			68,3	69,9	0,89	0,89	3,9	4	0,16	0,156	807,39		
		3	66,3	66,10	66,5	66,30	0,94	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	44	19,89	874,95	372,07			65,1	66,7	0,96	0,93	3,9	4	0,16	0,156	857,22		
	75,0%	1	68,1	68,90	69,7	68,90	0,89	4,02	4,02	4,02	4,02	0,16	45	19,89	894,83	361,25	363,92	600	68,3	69,9	0,89	0,89	3,9	4	0,16	0,156	797,99	808,62	600
		2	68,9	68,20	68,09	68,40	0,89	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	46	19,89	914,72	369,28			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	824,95		
		3	68,3	68,10	69,4	68,60	0,89	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	45	19,89	894,83	361,25			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	802,93		
	100,0%	1	68,7	68,60	69,5	68,93	0,89	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	45	19,89	894,83	361,25	364,26	600	68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	799,05	803,50	600
		2	68,3	68,70	67,6	68,20	0,89	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	45	19,89	894,83	362,26			66,7	68,3	0,93	0,89	4	4,1	0,156	0,152	810,11		
		3	69,6	70,10	69,9	69,87	0,89	4,04	4,04	4,04	4,04	0,15	46	19,89	914,72	369,28			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	801,33		

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Saptoto Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kajur Jalan Rel

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 19 Hasil Pengujian Marshall

HASIL PENGUJIAN MARSHALL PADA *FILLER* ABU ARANG KAYU JATI

Tanggal Pengujian : Februari 2025
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt*

Sampel	Tinggi	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
	(cm)	(%)	(%)	(gram)	(gram)	(gram)	(gram)	Density					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas		Koreksi	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (Kg/mm)
0A	69,79	6,38	6	1186,42	1192,1	698,5	493,6	2,403	2,480	13,739	83,185	3,075	16,81	81,71	3,08	77	1119,83	0,86	965,29	2,70	357,52
0B	69,54	6,38	6	1185,37	1190,5	694,15	496,31	2,388	2,480	13,653	82,663	3,684	17,34	78,75	3,68	76	1105,29	0,87	957,94	2,80	342,12
0C	72,40	6,38	6	1182,54	1194,2	693,22	501	2,360	2,480	13,493	81,693	4,814	18,31	73,71	4,81	76	1105,29	0,82	903,53	2,65	340,95
								2,384					**17,49**	**78,05**	**3,86**				**942,25**	**2,72**	**346,86**
25A	69,24	6,38	6	1170,05	1186,01	688,15	497,86	2,350	2,459	13,435	82,156	4,410	17,84	75,29	4,41	70	1018,03	0,87	888,17	2,90	306,26
25B	69,03	6,38	6	1183,9	1192,27	691,24	501,03	2,363	2,459	13,508	82,602	3,890	17,40	77,64	3,89	72	1047,11	0,88	917,53	3,00	305,84
25C	69,28	6,38	6	1185,96	1195,52	692,17	503,35	2,356	2,459	13,469	82,365	4,167	17,64	76,37	4,17	72	1047,11	0,91	948,07	2,50	379,23
								2,356					**17,63**	**76,43**	**4,16**				**917,92**	**2,80**	**330,45**
50A	68,55	6,38	6	1177,35	1181,96	677,12	504,84	2,332	2,437	13,332	82,351	4,318	17,65	75,54	4,32	70	1018,03	0,89	901,27	2,80	321,88
50B	66,80	6,38	6	1173,02	1184,68	678,07	506,61	2,315	2,437	13,236	81,761	5,002	18,24	72,57	5,00	70	1018,03	0,93	944,14	3,00	314,71
50C	71,54	6,38	6	1162,19	1173,38	675,91	497,47	2,336	2,437	13,355	82,495	4,150	17,51	76,29	4,15	70	1018,03	0,83	843,22	3,20	263,51
								2,328					**17,80**	**74,80**	**4,49**				**896,21**	**3,00**	**300,03**
75A	67,84	6,38	6	1168,38	1173,77	670,65	503,12	2,322	2,416	13,275	82,842	3,883	17,16	77,37	3,88	70	1018,03	0,90	912,66	3,40	268,43
75B	68,44	6,38	6	1161,91	1174,05	666,39	507,66	2,289	2,416	13,084	81,646	5,270	18,35	71,29	5,27	68	988,94	0,90	890,54	3,00	296,85
75C	72,43	6,38	6	1167,82	1177,09	669,42	507,67	2,300	2,416	13,150	82,06	4,790	17,94	73,30	4,79	68	988,94	0,82	808,13	3,20	252,54
								2,304					**17,82**	**73,98**	**4,65**				**870,44**	**3,20**	**272,61**
100A	69,45	6,38	6	1161,79	1171,56	666,54	505,02	2,300	2,395	13,151	82,913	3,937	17,09	76,96	3,94	67	974,40	0,87	846,14	3,50	241,76
100B	67,16	6,38	6	1160,88	1176,87	663,76	513,11	2,262	2,395	12,933	81,542	5,525	18,46	70,07	5,53	68	988,94	0,92	908,26	3,40	267,14
100C	70,45	6,38	6	1168,78	1183,04	668,89	514,15	2,273	2,395	12,995	81,931	5,075	18,07	71,92	5,07	66	959,85	0,85	814,98	3,25	250,76
								2,279					**17,87**	**72,98**	**4,85**				**856,46**	**3,38**	**253,22**

Disahkan Oleh,
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Indah Kurnari, M.Eng, IPM., ASEAN Eng
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Koni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

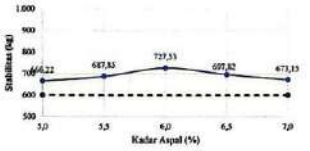
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

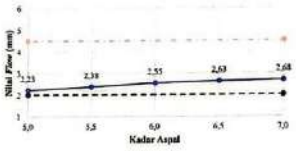
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

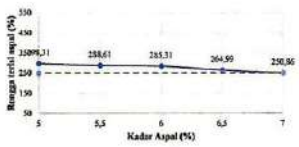
Lampiran 18 Rekapitulasi Perhitungan KAO

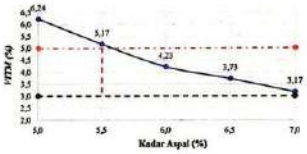
REKAPITULASI PERHITUNGAN KAO

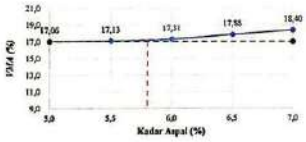
SPESIFIKASI *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	Kadar Aspal (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	*Flow* (mm)	VITM (%)	VMA (%)	Draindown (%)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)	*VCA*	MQ
	5	666,22	2,23	6,24	17,06	0,04	769,00	115,43	0,932	298,31
	5,5	687,85	2,38	5,17	17,13	0,07	807,21	117,35	0,944	288,61
	6	727,53	2,55	4,23	17,31	0,09	871,12	119,74	0,949	285,31
	6,5	697,82	2,63	3,73	17,88	0,14	852,84	122,22	0,956	264,99
	7	673,15	2,68	3,17	18,40	0,15	839,83	124,76	0,966	250,86
BINA MARGA 2018 REV 2		**> 600**	**2-4,5**	**3 - 5**	**> 17**	**<0,3**	**> 600**	**>90**	**<1**	**>250**

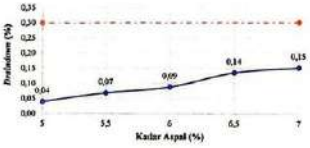


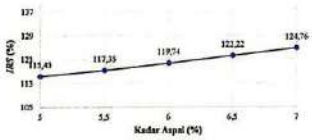


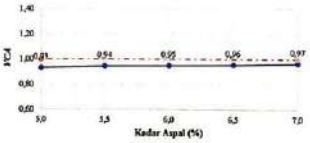


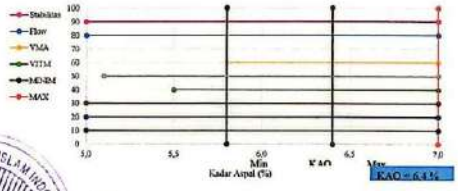












Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ir. Ruzardi, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kaprodi Teknik Sipil

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 17 Hasil Pengujian *DRAINDOWN KAO*

PENGUJIAN DRAINDOWN UNTUK KAO

Kadar Aspal (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
5,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1532,60	1469,41	1382,54
	2	Berat Benda Uji	1195,65	1189,98	1188,52
	3	Berat Awal Piring Penampung	336,95	279,43	194,02
	4	Berat Akhir Piring Penampung	337,51	279,70	194,52
	5	Draindown	0,047%	0,02%	0,04%
	6	Rata-Rata Draindown	0,04		
5,5%	1	Berat Piring + Benda Uji	1530,50	1208,50	1616,53
	2	Berat Benda Uji	1185,31	1014,25	1278,44
	3	Berat Awal Piring Penampung	345,19	194,25	338,09
	4	Berat Akhir Piring Penampung	346,90	194,59	338,45
	5	Draindown	0,144%	0,03%	0,03%
	6	Rata-Rata Draindown	0,069		
6,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1391,60	1382,25	1248,74
	2	Berat Benda Uji	1213,08	1187,74	971,14
	3	Berat Awal Piring Penampung	178,52	194,51	277,60
	4	Berat Akhir Piring Penampung	179,34	195,80	278,45
	5	Draindown	0,07%	0,11%	0,09%
	6	Rata-Rata Draindown	0,088		
6,5%	1	Berat Piring + Benda Uji	1349,91	1373,56	1509,31
	2	Berat Benda Uji	1155,96	1179,14	1160,05
	3	Berat Awal Piring Penampung	193,95	194,42	349,26
	4	Berat Akhir Piring Penampung	194,70	196,86	350,81
	5	Draindown	0,06%	0,21%	0,13%
	6	Rata-Rata Draindown	0,135		
7,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1372,29	1525,88	1354,23
	2	Berat Benda Uji	1178,26	1174,30	1159,55
	3	Berat Awal Piring Penampung	194,03	351,58	194,68
	4	Berat Akhir Piring Penampung	196,80	352,20	196,61
	5	Draindown	0,24%	0,05%	0,17%
	6	Rata-Rata Draindown	0,151		

Yogyakarta, Juli 2025

Disahkan Oleh
Ketua Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 16 Hasil Pengujian *IRS*

PENGUJIAN *IRS*

Persen Aspal		Tebal Sampel (mm)	koreksi	Arloji Stability			Flow (mm)		Stability (kg)			Angka Koreksi			
												Tebal Sampel		Koreksi	
				Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX
5,0%	1	69,36	0,89	40	19,20	768,17	240	2,47	683,67	769,00	600	68,3	69,9	0,89	0,89
	2	69,96	0,89	46	19,20	883,39	250		784,10			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	70,30	0,87	50	19,20	960,21	250		839,22			69,9	71,4	0,89	0,83
5,5%	1	70,53	0,86	50	19,20	960,21	380	3,87	830,39	807,21	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	70,03	0,88	48	19,20	921,80	390		815,61			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	70,20	0,88	46	19,20	883,39	390		775,62			69,9	71,4	0,89	0,83
6,0%	1	67,13	0,92	50	19,20	960,21	425	4,22	882,67	871,12	600	66,7	68,3	0,93	0,89
	2	69,16	0,89	52	19,20	998,62	410		888,77			68,3	69,9	0,89	0,89
	3	70,23	0,88	50	19,20	960,21	430		841,91			69,9	71,4	0,89	0,83
6,5%	1	71,93	0,82	50	19,20	960,21	250	2,50	790,61	852,84	600	71,4	73	0,83	0,81
	2	72,73	0,81	53	19,20	1017,82	240		827,87			71,4	73	0,83	0,81
	3	68,36	0,89	55	19,20	1056,23	260		940,05			68,3	69,9	0,89	0,89
7,0%	1	67,10	0,92	48	19,20	921,80	460	4,65	848,06	839,83	600	66,7	68,3	0,93	0,89
	2	70,46	0,87	48	19,20	921,80	465		799,76			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	68,33	0,89	51	19,20	979,41	470		871,68			68,3	69,9	0,89	0,89

Yogyakarta, Juli 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 15 Hasil Pengujian *VCA*

PENGUJIAN VCA

Kadar Aspal	Benda Uji	Berat (gram)			Volume Silinder (cm^3)	V (cm^3)	γ_s (gram/cm^3)	γ_w (gram/cm^3)	G_{CA} (gram/cm^3)	VCA_{DRC} (%)	Gmb	GCA	PCA (%)	VCAMIX (%)	VCAMIX/ VCADRC	Spesifikasi
		Wadah + Camp. Agg	Wadah	B. Wadah + Air												
5,00%	1	4982	3424	4383	1178,1	961,4	1,621	0,9975	2,58	36,990	2,25	2,58	76	33,81199	0,914	OK
	2	4958	3424	4354	1178,1	932,3	1,645	0,9975	2,58	36,026	2,25	2,58	76	33,60045	0,933	OK
	3	4963	3424	4347	1178,1	925,3	1,663	0,9975	2,58	35,330	2,26	2,58	76	33,52882	0,949	OK
	Rata-Rata									36,115	Rata-Rata			33,64709	0,932	OK
5,50%	1	4977	3424	4376	1178,1	954,3	1,627	0,9975	2,58	36,730	2,28	2,58	76	32,83611	0,894	OK
	2	4988	3424	4354	1178,1	932,3	1,678	0,9975	2,58	34,774	2,26	2,58	76	33,25399	0,956	OK
	3	4990	3424	4352	1178,1	930,3	1,683	0,9975	2,58	34,550	2,24	2,58	76	33,96794	0,983	OK
	Rata-Rata									35,352	Rata-Rata			33,35268	0,944	OK
6,00%	1	4968	3424	4350	1178,1	928,3	1,663	0,9975	2,58	35,330	2,27	2,58	76	33,03907	0,935	OK
	2	4982	3424	4343	1178,1	921,3	1,691	0,9975	2,58	34,247	2,28	2,58	76	32,7274	0,956	OK
	3	4954	3424	4340	1178,1	918,3	1,666	0,9975	2,58	35,217	2,25	2,58	76	33,67048	0,956	OK
	Rata-Rata									34,931	Rata-Rata			33,14565	0,949	OK
6,50%	1	4991	3424	4357	1178,1	935,3	1,675	0,9975	2,58	34,859	2,25	2,58	76	33,579	0,963	OK
	2	4962	3424	4342	1178,1	920,3	1,671	0,9975	2,58	35,020	2,27	2,58	76	33,119	0,946	OK
	3	4983	3424	4347	1178,1	925,3	1,685	0,9975	2,58	34,490	2,27	2,58	76	33,059	0,959	OK
	Rata-Rata									34,790	Rata-Rata			33,25203	0,956	OK
7,00%	1	4990	3424	4348	1178,1	926,3	1,691	0,9975	2,58	34,267	2,29	2,58	76	32,45619	0,947	OK
	2	4948	3424	4337	1178,1	915,3	1,665	0,9975	2,58	35,259	2,30	2,58	76	32,08675	0,910	OK
	3	4968	3424	4332	1178,1	910,2	1,696	0,9975	2,58	34,048	2,19	2,58	76	35,39735	1,040	TIDAK OK
	Rata-Rata									34,525	Rata-Rata			33,31343	0,966	OK

Diperiksa Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Hardjan Kuchari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK. 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 14 Hasil Pengujian Marshall

HASIL PENGUJIAN MARSHALL UNTUK MENENTUKAN KAO PADA PENGGUNAAN ASPAL PEN 60/70

Tanggal Pengujian : Nov-24
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt*

Sampel	t (cm)	a (%)	b (%)	c (gram)	d (gram)	e (gram)	f (gram)	g	h	i	j	k	l VMA (%)	n VITM (%)	o	p	Koreksi Tebal	q Stab. (kg)	r *Flow* (mm)
5,0%	72,20	5,26	5,00	1172,30	1185,08	663,00	522,08	2,245	2,401	10,795	82,735	6,470	17,26	6,47	58	831,16	0,8200	681,55	2,20
5,0%	70,00	5,26	5,00	1165,91	1186,04	668,46	517,58	2,253	2,401	10,830	82,999	6,171	17,00	6,17	55	788,17	0,8860	698,32	2,30
5,0%	69,90	5,26	5,00	1181,60	1193,48	669,50	523,98	2,255	2,401	10,842	83,089	6,069	16,91	6,07	52	745,18	0,8900	663,21	2,20
								2,251					**17,06**	**6,24**				**681,03**	**2,23**
5,5%	69,53	5,82	5,50	1177,85	1189,66	672,73	516,93	2,279	2,384	12,050	83,513	4,437	16,49	4,44	54	773,84	0,8900	688,72	2,40
5,5%	71,30	5,82	5,50	1187,21	1202,21	677,91	524,30	2,264	2,384	11,975	82,993	5,032	17,01	5,03	60	859,83	0,8340	717,09	2,40
5,5%	70,70	5,82	5,50	1188,96	1205,21	674,46	530,75	2,240	2,384	11,847	82,106	6,047	17,89	6,05	56	802,50	0,8580	688,55	2,35
								2,261					**17,13**	**5,17**				**698,12**	**2,38**
6,0%	69,33	6,38	6,00	1181,56	1192,49	672,36	520,13	2,272	2,368	13,106	82,820	4,074	17,18	4,07	63	902,82	0,8900	803,51	2,40
6,0%	70,00	6,38	6,00	1192,40	1205,21	682,74	522,47	2,282	2,368	13,167	83,206	3,628	16,79	3,63	54	773,84	0,8860	685,62	2,65
6,0%	70,30	6,38	6,00	1185,18	1197,16	670,47	526,69	2,250	2,368	12,982	82,039	4,979	17,96	4,98	60	859,83	0,8740	751,49	2,60
								2,268					**17,31**	**4,23**				**746,87**	**2,55**
6,5%	71,07	6,95	6,50	1189,68	1200,63	672,67	527,96	2,253	2,352	14,083	81,716	4,201	18,28	4,20	58	831,16	0,834	693,29	2,8
6,5%	70,43	6,95	6,50	1175,39	1177,50	659,47	518,03	2,269	2,352	14,181	82,282	3,537	17,72	3,54	56	802,50	0,869	697,22	2,6
6,5%	66,76	6,95	6,50	1180,08	1191,91	672,28	519,63	2,271	2,352	14,194	82,356	3,451	17,64	3,45	54	773,84	0,929	718,51	2,5
								2,264					**17,88**	**3,73**				**703,01**	**2,63**
7,0%	68,20	7,53	7,00	1193,22	1200,27	679,54	520,73	2,291	2,336	15,423	82,652	1,925	17,35	1,92	54	773,84	0,8925	690,65	2,50
7,0%	69,23	7,53	7,00	1191,89	1199,93	682,61	517,32	2,304	2,336	15,507	83,104	1,388	16,90	1,39	52	745,18	0,8900	663,21	2,80
7,0%	69,00	7,53	7,00	1169,60	1189,02	655,36	533,66	2,192	2,336	14,752	79,053	6,195	20,95	6,20	54	773,84	0,8900	688,72	2,75
								2,262					**18,40**	**3,17**				**680,86**	**2,68**

Diperiksa Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berhan Kurnia, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Juli 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Bottom Ash*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER* ABU ARANG KAYU

RUJUKAN : SNI 2441-2011

1 Jenis Material : *Filler Bottom Ash*
2 Sumber Material : Clereng
3 Diuji Pada : 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	23,77	24,22	24,00
2	Berat Vicnometer + Air gr	46,85	47,27	47,06
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	23,08	23,05	23,07
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	27,49	28,17	27,83
5	Berat *Filler* (4-1) gr	3,720	3,950	3,84
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	47,68	48,64	48,16
7	Berat Aquadest (6-4) gr	20,190	20,470	20,33
8	Volume *Filler* (3-7) gr	2,890	2,580	2,74
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	1,287	1,531	1,409

Yogyakarta, 2025

Diperiksa Oleh
Ketua Program Studi/Ketua Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kaleb/Tatan Teliya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Penelitii

Rafi Putra Rosi
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 12 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Debu*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER* DEBU

RUJUKAN : SNI 2441-2011

1 Jenis Material : *Filler* Abu Batu
2 Sumber Material : Clereng
3 Diuji Pada : 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	23,80	23,80	
2	Berat Vicnometer + Air gr	46,43	46,94	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,63	23,14	
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	33,80	33,80	
5	Berat *Filler* (4-1) gr	10,000	10,000	10,00
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	53,12	52,10	52,61
7	Berat Aquadest (6-4) gr	19,320	18,300	18,81
8	Volume *Filler* (3-7) gr	3,310	4,840	4,08
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	3,021	2,066	2,544

Diperiksa Oleh
Kepala Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bachrul Kusharjanto, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 11 Pemeriksaan Sand Equivalent

PEMERIKSAAN *SAND EQUIVALENT*

RUJUKAN : SNI 3423-2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Halus
3 Diuji Pada : 2025

No.	Keterangan		Benda uji 1	Benda uji 2	Rata-rata
1	Persiapan, dan perendaman benda uji dalam larutan $CaCl_2$ selama (± 10.1 menit).	Mulai	13.39	13.39	
		Selesai	13.39	13.39	
2	Waktu pengendapan (benda uji setelah digojok sebanyak 90x, dan di tambah larutan $CaCl_2$)	Mulai	13.44	13.44	
		Selesai	13.59	13.59	
4	Clay reading (Pembacaan Lumpur) Inchi		3,90	4,50	4,20
5	Sand reading (Pembacaan Pasir)		2,90	3,10	3,00
6	$Sand\ Eqiuvalent = \frac{Sand\ Reading}{Clay\ Reading} \times 100\ \%$		74,36	68,89	71,62
7	Kandungan Lumpur = 100 - SE		25,64	31,11	28,38

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 10 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT HALUS

RUJUKAN : SNI 1970 - 2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Kasar
3 Diuji Pada : 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	500,01	500,04	
2	Berat Vicnometer + Air (B) gr	647,04	681,31	
3	Berat Vicnometer + Air + benda uji (BT) gr	963,04	998,84	
4	Berat benda uji kering oven (BK)	482,82	487,01	
5	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(B+500)-BT}$	2,624	2,669	2,647
6	Berat jenis (SSD) = $\frac{500}{(B+500)-BT}$	2,717	2,740	2,729
7	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(B+BK)-BT}$	2,894	2,874	2,884
8	Penyerapan air = $\frac{(500-BK)}{BK} \times 100\%$	3,558	2,667	3,113
9	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,559	2,771	2,665

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernina Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kelab. Jalan Rel

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 9 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles

PEMERIKSAAN KEAUSAN AGREGAT KASAR

AASHTO T 96 - 77 ; SNI 2417 : 2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Kasar
3 Diuji Pada : 2025

No	Jenis Gradasi Saringan		B Benda Uji (gram)		Keterangan
	Lolos	Tertahan	1	2	
1	72.2 mm (3")	63.5 mm (2.5")			
2	63.5 mm (2.5")	50.8 mm (2")			
3	50.8 mm (2")	37.5 mm (1.5")			
4	37.5 mm (1.5")	25.4 mm (1")			
5	25.4 mm (1")	19.0 mm (3/4")			
6	19.0 mm (3/4")	12.5 mm (0.5")	2502,50		
7	12.5 mm (0.5")	09.5 mm (3/8")	2500,00		
8	09.5 mm (3/8")	06.3 mm (1/4")			
9	06.3 mm (1/4")	04.75 mm (4")			
10	04.75 mm (No.4)	02.36 mm (No.8)			
11	JUMLAH BENDA UJI (A)		5002,50	5002,50	
12	JUMLAH TERTAHAN DI SIEVE 12(B)		4788,50	3995,50	
13	KEAUSAN $100x = \frac{(A-B)}{A} \times 100\%$		4,278	20,130	
17	Rata-rata Keausan (%)		12,20		

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bertian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 8 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

PEMERIKSAAN KELEKATAN AGREGAT TERHADAP ASPAL

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Kasar
3 Diuji Pada : 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Suhu	Waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda Uji**			
	Mulai	25°C	08.00 WIB	
	Selesai	150°C	08.15 WIB	
2	**Didiamkan Pada Suhu Ruang**			
	Mulai	150°C	08.15 WIB	
	Selesai	25°C	09.45 WIB	
3	**Perendaman benda uji**			
	Mulai	25°C	09.45 WIB	
	Selesai	25°C	10.15 WIB	

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	98%	
2	Sampel 2	96%	
	Rata-rata	97%	

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 7 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT KASAR

RUJUKAN : SNI 03-1969-2008

1 Sumber Material : Clereng, Kulonprogo
2 Jenis Material : Agregat Kasar
3 Diuji Pada : 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	1611,62	1612,23	1611,93
2	Berat benda uji dalam Air (BA) gr	1000,41	1000,80	1000,61
3	Berat benda uji dkering oven (BK) gr	1574,21	1568,25	1571,23
4	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(BJ - BA}$	2,576	2,565	2,570
5	Berat jenis (SSD) = $\frac{BJ}{(BJ - BA}$	2,637	2,637	2,637
6	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(BK - BA)}$	2,743	2,764	2,754
7	Penyerapan air = $\frac{(BJ - BK)}{BK} \times 100\%$	2,376	2,804	2,590
8	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,660	2,664	2,662

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bachnas Kasbari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 6 Pemeriksaan Kelarutan Aspal dalam *TCE*

PEMERIKSAAN KELARUTAN ASPAL DALAM CCl4 / TCE

RUJUKAN : AASHTO T - 44 - 70 ; ASTM D - 165 - 42

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Pembacaan	
			Wakktu	Suhu
1	Persiapan	Mulai	13.20 WIB	28 °C
		Selesai	13.30 WIB	28 °C
2	Penimbangan	Mulai	13.30 WIB	28 °C
3	Pelarutan	Mulai	13.40 WIB	28 °C
4	Penyaringan	Mulai	13.45 WIB	28 °C
		Selesai	14.15 WIB	28 °C
5	Di Oven	Mulai	14.15 WIB	130 °C
6	Peminbangan	Mulai	14.30 WIB	28 °C

Hasil pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Benda Uji		Keterangan
		1	2	
1	Berat erlen meyer kosong	54,400 gr	65,970 gr	
2	Berat erlen meyer kosong + Aspal	56,420 gr	68,010 gr	
3	Berat Aspal (2 - 1)	2,020 gr	2,040 gr	
4	Berat kertas saring bersih	0,540 gr	0,550 gr	
5	Berat kertas saring bersih + mineral	0,550 gr	0,560 gr	
6	Berat mineral (5 - 4)	0,010 gr	0,010 gr	
7	Prosentase mineral (6/3x100%)	0,495 %	0,490 %	
8	Aspal yang larut (100% - 7)	99,505 %	99,510 %	
9	Rata-rata Aspal yang larut (%)	99,507 %		

Yogyakarta, 2025

Diarahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Gatot Sasbuan, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 5 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

RUJUKAN : AASHTO : T - 51 -74 ; ASTM D - 113 - 69

1 **Contoh dari** : Pertamina
2 **Jenis contoh** : Aspal Pertamina **Pen 60/70**
3 Diperiksa tg : 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1	**Persiapan** benda uji	Aspal dipanaskan	15 menit	suhu pemans ± 135^{o}C
2	Mendinginkan benda uji	Diamkan pada suhu ruang	60 menit	suhu ruang ± 28^{o}C
3	Perendaman benda uji	Direndam dalam water pada suhu 25^{o}C	60 menit	suhu water bath ± 25^{o}C
4	Pemeriksaan	Diuji daktilitas pada suhu 25^{o}C, kecepatan 5 cm per menit	20 menit	suhu alat ± 25^{o}C

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	137 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	132 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	134,5 cm	

Disahkan Oleh
Ketua Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Faris Ali, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 4 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 °C	08.20 WIB	
	Selesai pemanasan	140 °C	08.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 °C	08.35 WIB	
	Selesai	27 °C	09.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	5 °C	13.15 WIB	
	Selesai	48 °C	13.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)		Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I	Benda Uji II	I	II
1	5 °C	0 detik	0 detik		
2	10 °C	137 detik	137 detik		
3	15 °C	112 detik	112 detik		
4	20 °C	101 detik	101 detik		
5	25 °C	107 detik	107 detik		
6	30 °C	115 detik	115 detik		
7	35 °C	124 detik	124 detik		
8	40 °C	128 detik	128 detik		
9	45 °C	135 detik	137 detik	48°C	49°C
10	50 °C				
11	55 °C				
12	60 °C				

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 3 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN TITIK NYALA DAN BAKAR

RUJUKAN; AASHTO T 48-74, ASTM D 92-52

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 °C	08.20 WIB	
	Selesai pemanasan	140 °C	08.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 °C	08.35 WIB	
	Selesai	27 °C	09.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	27 °C	09.40 WIB	
	Selesai	310 °C	10.20 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	308 °C	313 °C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	308 °C	313 °C	

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernar Kustiani, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70

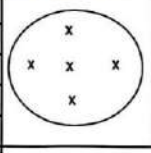
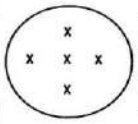
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

RUJUKAN; AASHTO T 49-68, ASTM D 5-71

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 ^{o}C	10.00 WIB	
	Selesai pemanasan	140 ^{o}C	10.30 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 ^{o}C	10.30 WIB	
	Selesai	27 ^{o}C	13.00 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	25 ^{o}C	13.00 WIB	
	Selesai	25 ^{o}C	13.30 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	65	71			
2	65	72			
3	60	70			
4	61	73			
5	60	68			
Rata2	62,2	70,8			
Rata2	66,5				

Mengetahui
Dosen Pembimbing Umum Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : 2025

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	23,89	23,45
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	46,32	46,56
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	22,43	23,11
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	25,85	25,4
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,96	1,95
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	46,42	46,61
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	20,57	21,21
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	1,86	1,9
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,05	1,026
10	Rata-rata BJ Aspal	1,040	

Disahkan Oleh
Ketua Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Sri Kusdiari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Yogyakarta, 2025
Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Rafi Putra Roni
NIM : 20 511 049