TUGAS AKHIR

PEMANFAATAN LIMBAH DEBU GRANIT SEBAGAI *FILLER* PENGGANTI TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT (SMA)*

(UTILIZATION OF GRANITE DUST WASTE AS SUBSTITUTE FILLER FOR THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) MIXTURE)

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



Muhammad Rajiv Sabrino
20511007

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2025

TUGAS AKHIR

PEMANFAATAN LIMBAH DEBU GRANIT SEBAGAI *FILLER* PENGGANTI TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT (SMA)*

(UTILIZATION OF GRANITE DUST WASTE AS SUBSTITUTE FILLER FOR THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) MIXTURE)

Disusun Oleh

Muhammad Rajiv Sabrino
20511007

Telah diterima sebagai salah satu persayatan
Untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 26 September 2025
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.	Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D
NIK : 145110101	NIK : 215111307	NIK : 955110103

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

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, 23 September 2025

Yang membuat pernyataan,



Muhammad Rajiv Sabrino

(20511007)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillahirabbil 'alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir yang berjudul "Pemanfaatan Limbah Debu Granit Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*)" dengan baik dan tepat waktu. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa keberhasilan ini tidak terlepas dari bimbingan, dukungan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Ibu Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir. Terima kasih atas segala kesabaran, waktu, bimbingan, arahan, serta ilmu yang sangat bermanfaat selama proses pengerjaan hingga selesainya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T. dan Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., P.hD. selaku Dosen Penguji Tugas Akhir, yang telah memberikan arahan serta masukan untuk menyempurnakan Tugas Akhir
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. Staff dan laboran Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan bantuan teknis dan fasilitas selama proses pengujian di laboratorium.

5. Kedua orang tua dan keluarga tercinta, yang senantiasa memberikan dukungan moral, materiel, serta doa yang tiada henti sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan lancar.
6. Sahabat-sahabat dan rekan-rekan seperjuangan di Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia angkatan 2020, serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, terima kasih atas segala dukungan, semangat, dan kebersamaan yang telah terjalin.

Saya menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi saya dan orang lain.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Yogyakarta, 23 September 2025

Penulis,

Muhammad Rajiv Sabrino

(20511007)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iiiv
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR LAMPIRAN xv
DAFTAR NOTASI xvii
DAFTAR SINGKATAN xix
ABSTRAK xx
ABSTRACT xxi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 3
1.5 Batasan Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Peran *Filler* dalam Campuran Aspal Agregat 5
2.2 Pemanfaatan Debu Granit sebagai *Filler* Pengganti dalam Campuran Aspal 6
2.3 Rekayasa Substitusi *Filler* pada Campuran *Stone Matrix Asphalt* 7
2.4 Perbandingan Penelitian Sebelumnya 8
BAB III LANDASAN TEORI 13
3.1 Perkerasan Lentur 13
3.2 Limbah Debu Granit 13
3.3 Karakteristik Beton Aspal 15

3.3.1 Kelenturan (*Flexibility*) 16
3.3.2 Stabilitas (*Stability*) 16
3.3.3 Keawetan (*Durability*) 16
3.3.4 Ketahanan Terhadap Kelelahan (*Fatigue Resistance*) 17
3.3.5 Kedap Air (*Impermeabilitas*) 17
3.3.6 Kekesatan (*Skid Resistance*) 17
3.3.7 Kemudahan Pelaksanaan (*workability*) 18
3.4 Material Penyusun Perkerasan Lentur Jalan 18
3.4.1 Aspal 18
3.4.2 Agregat 19
3.4.3 Gradasi Agregat 20
3.4.4 Bahan Pengisi (*Filler*) 21
3.4.5 Bahan Aditif 21
3.5 Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) 22
3.6 Karakteristik Pengujian *Marshall* 23
3.6.1 Stabilitas (*Stability*) 24
3.6.2 Kelelehan (*flow*) 24
3.6.3 *VMA* (*Void in Mineral Aggregate*) 25
3.6.4 Kepadatan (*density*) 26
3.6.5 *Marshall Quotient* (*MQ*) 26
3.6.6 *VITM* (*Void in the Total Mix*) 27
3.6.7 *VFWA* (*Void Filled with Asphalt*) 28
3.7 Pengujian *Cantabro Loss* (*CL*) 29
3.8 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*) 30
3.9 Pengujian Perendaman *Index of Retained Strength* (*IRS*) 30
3.10 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*) 30
3.11 Pengujian *Draindown (DD)* 31
3.12 Pengujian *Void Coarse Aggregate* (*VCA*) 31
BAB IV METODE PENELITIAN 33
4.1 Metode Penelitian 33
4.2 Metode Pengambilan Data 33

4.3 Tahapan Penelitian 34
4.3.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material 34
4.3.2 Persiapan Alat 36
4.3.3 Perencanaan Campuran 37
4.3.4 Pembuatan Campuran Benda Uji 42
4.3.5 Pengujian *Marshall* 43
4.3.6 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*) 44
4.3.7 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*) 44
4.3.8 Pengujian *Indeks of Retained Strength* (*IRS*) 45
4.3.9 Pengujian *Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition* (VCA_{DRC}) 46
4.3.10 Pengujian *Draindown (DD)* 47
4.3.11 Pengujian *Cantabro Loss* (*CL*) 47
4.4 Analisis Data 48
4.4.1 Analisis Karakteristik *Marshall* 48
4.4.2 Analisis Pengujian *CL* 49
4.4.3 Analisis Pengujian *ITS* 49
4.4.4 Analisis Pengujian *IRS* 49
4.4.5 Analisis Pengujian *TSR* 49
4.4.6 Analisis Pengujian *DD* 50
4.5 Analisis Statistik 50
4.6 Bagan Alir Penelitian 51
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 54
5.1 Hasil Pengujian Bahan dan Campuran 54
5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 54
5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat 54
5.1.3 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt* pada Kadar Aspal Optimum 58
5.2 Pembahasan 62
5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 62
5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus 64

5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar 65
5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*) 66
5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum 67
5.2.6 Karakteristik *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum Campuran dengan Subsititusi *Filler* Debu Granit 74
5.2.7 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *DD* 85
5.2.8 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *CL* 86
5.2.9 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *ITS* 88
5.2.10 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *TSR* 89
5.2.11 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *IRS* 91
5.2.12 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *VC* 93
5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Campuran *Filler* Debu Granit 93
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 98
DAFTAR PUSTAKA 100

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal 9

Tabel 3.1 Kandungan yang Terdapat dalam Debu Granit 15

Tabel 3.2 Persyaratan Aspal Keras Penetrasi 60/70 19

Tabel 3.3 Persyaratan Agregat Kasar pada Campuran *SMA* 19

Tabel 3.4 Persyaratan Agregat Halus pada Campuran *SMA* 20

Tabel 3.5 Gradasi Agregat Gabungan Campuran *SMA* 20

Tabel 3.6 Persyaratan Serat Selulosa 22

Tabel 3.7 Persyaratan *Stone Matrix Asphalt* 23

Tabel 4.1 Gradasi Campuran Stone Matrix Asphalt 25 mm 38

Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5% 39

Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5,5% 40

Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6% 40

Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6,5% 40

Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7% 41

Tabel 4.7 Jumlah Benda Uji untuk Memperoleh Nilai KAO 41

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70 54

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Agregat Kasar 55

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng 55

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler* 55

Tabel 5.5 Hasil Pengujian untuk Menentukan KAO 56

Tabel 5.6 Berat Debu Batu dan Debu Granit 57

Tabel 5.7 Hasil Rekapitulasi Pengujian *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit 58

Tabel 5.8 Hasil Rekapitulasi Pengujian *DD* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit 58

Tabel 5.9 Hasil Rekapitulasi Pengujian *IRS* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit 59

Tabel 5.10 Hasil Rekapitulasi Pengujian *ITS* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit 59
Tabel 5.11 Hasil Rekapitulasi Pengujian *TSR* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit 59
Tabel 5.12 Hasil Rekapitulasi Pengujian *CL* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit 60
Tabel 5.13 Hasil Rekapitulasi Pengujian *VCA* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit 60
Tabel 5.14 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* Satu Arah Untuk Pengaruh *Filler* Debu Granit Terhadap Karakteristik *Marshall* 61
Tabel 5.15 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* Satu Arah Untuk Pengaruh *Filler* Debu Granit Terhadap *IRS, ITS, TSR, CL*, dan *DD* 61
Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Debu Granit 94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Limbah Debu Granit 14
Gambar 3.2 Serat Selulosa VIATOP[66] 21
Gambar 3.3 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas 24
Gambar 3.4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow* 25
Gambar 3.5 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VMA* 25
Gambar 3.6 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Density* 26
Gambar 3.7 Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *MQ* 27
Gambar 3.8 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VITM* 28
Gambar 3.9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VFWA* 29
Gambar 4.1 Grafik Gradasi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm 38
Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian 52
Gambar 5.1 Kadar Aspal Optimum dengan Substitusi *Filler* Debu Granit 56
Gambar 5.2 Limbah Debu Granit 57
Gambar 5.3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas 67
Gambar 5.4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow* 68
Gambar 5.5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *MQ* 69
Gambar 5.6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VITM* 70
Gambar 5.7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VMA* 71
Gambar 5.8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VCA* 72
Gambar 5.9 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *DD* 73
Gambar 5.10 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *IRS* 74
Gambar 5.11 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Stabilitas 75
Gambar 5.12 Grafik Pengaruh debu granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Flow* 76
Gambar 5.13 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *MQ* 78

Gambar 5.14 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VITM* 80
Gambar 5.15 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VFWA* 81
Gambar 5.16 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VMA* 83
Gambar 5.17 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Density* 84
Gambar 5.18 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *DD* 85
Gambar 5.19 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *CL* 87
Gambar 5.20 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *ITS* 88
Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *TSR* 90
Gambar 5.22 Grafik Hubungan antara Rendaman dan Stabilitas 91
Gambar 5.23 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *IRS* 92

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70 104
Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70 105
Lampiran 3 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal pen 60/70 106
Lampiran 4 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70 107
Lampiran 5 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70 108
Lampiran 6 Pemeriksaan Kelarutan Aspal dalam *TCE* 109
Lampiran 7 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar 110
Lampiran 8 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal 111
Lampiran 9 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles 112
Lampiran 10 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus 113
Lampiran 11 Pemeriksaan *Sand Equivalent* 114
Lampiran 12 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler* Debu 115
Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler* Debu Granit 116
Lampiran 14 Hasil Pengujian *Marshall* untuk Penentuan KAO 117
Lampiran 15 Hasil Pengujian *IRS* 118
Lampiran 16 Hasil Pengujian *Draindown* 119
Lampiran 17 Hasil Pengujian *VCA* 120
Lampiran 18 Rekapitulasi *Marshall*, *IRS*, *Draindown* untuk Penentuan KAO 121
Lampiran 19 Hasil Pengujian *Marshall* 122
Lampiran 20 Hasil Pengujian *IRS* 123
Lampiran 21 Rekapitulasi Pengujian *IRS* 124
Lampiran 22 Hasil Pengujian *ITS* 125
Lampiran 23 Hasil Pengujian *TSR* 126
Lampiran 24 Rekapitulasi Pengujian *ITS* & *TSR* 127
Lampiran 25 Hasil Pengujian *CL* 128
Lampiran 26 Rekap Hasil Pengujian *CL* 129
Lampiran 27 Hasil Pengujian *Draindown* 130
Lampiran 28 Rekap Pengujian *Draindown* 131

Lampiran 29 Rekapitulasi Pengujian *Marshall* setelah Substitusi *Filler* Debu Granit 132
Lampiran 30 Hasil Uji Normalitas *ANOVA* 133
Lampiran 31 Hasil Uji Homogenitas *ANOVA* 134
Lampiran 32 Hasil Uji *ANOVA* 135

DAFTAR NOTASI

A_0 = 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 = *Marshall Quotient* (kg/mm)

Mo = Berat sebelum diabrasi (gr)

Mi = Berat setelah diabrasi (gr)

n = Nilai rongga dalam campuran *(VITM)* (%)

P_{CA} = 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 (m^3)

Ws = Berat silinder takaran (kg)

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

Yw = Kepadatan atau berat satuan air pada suhu tertentu (kg/ m^3)

Yw = Berat satuan agregat kasar dalam kondisi *dry-rodded* (kg/ m^3)

DAFTAR SINGKATAN

ANOVA = *Analysis of Variance*

CL = *Cantabro Loss*

DD = *Draindown*

ITS = *Indirect Tensile Strength*

IRS = *Index of Retained Strength*

KAO = Kadar Aspal Optimum

MQ = *Marshall Quotient*

SMA = *Stone Matrix Asphalt*

SNI = Standar Nasional Indonesia

TSR = *Tensile Strength Ratio*

VITM = *Void in the Total Mix*

VFWA = *Void Filled With Asphalt*

VMA = *Void in Mineral Aggregate*

VCA = *Void in Coarse Aggregate*

VCA_{DRC} = *Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition*

VCA_{MIX} = *Void Coarse Aggregate Mix*

ABSTRAK

Perkerasan *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) merupakan jenis campuran perkerasan yang dirancang untuk jalan bervolume lalu lintas tinggi, salah satu faktor yang mempengaruhi kinerjanya adalah kualitas *filler*. Di sisi lain, limbah debu granit yang melimpah dari industri konstruksi menjadi isu lingkungan dan pemborosan sumber daya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara komprehensif pengaruh pemanfaatan limbah debu granit sebagai *filler* substitusi. Tiga aspek utama yang dikaji adalah pengaruhnya terhadap kekuatan struktur, karakteristik volumetrik, dan durabilitas dari campuran *SMA*.

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Benda uji yang dibuat adalah campuran *SMA* gradasi 25 mm pada KAO 6,55%. Variabel penelitian yang digunakan adalah kadar substitusi *filler* debu granit sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Serangkaian pengujian lengkap dilakukan untuk menganalisis setiap aspek, meliputi uji *Marshall*, analisis volumetrik, *ITS*, *VCA*, serta pengujian durabilitas yang mencakup *CL*, *DD*, dan ketahanan terhadap air (*IRS* & *TSR*).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi *filler* debu granit memberikan pengaruh yang jelas pada parameter kekuatan dan durabilitas. Nilai Stabilitas memperlihatkan kenaikan dari 903,86 kg hingga mencapai puncaknya sebesar 984,19 kg pada kadar 50%. Hal ini juga meningkatkan nilai *MQ*, dari 301,80 kg/mm menjadi 343,36 kg/mm. *ITS* juga menunjukkan peningkatan yang konsisten, naik dari 796,73 kPa hingga 907,87 kPa. Selain itu, durabilitas terhadap abrasi membaik secara substansial, yang dibuktikan dengan penurunan nilai *CL* dari 8,69% menjadi 6,71%. Parameter lainnya seperti karakteristik volumetrik dan ketahanan terhadap air juga menunjukkan tren perbaikan, di mana campuran menjadi lebih padat dan lebih tahan terhadap kerusakan. Berdasarkan analisis hasil, disimpulkan bahwa *filler* debu granit secara efektif meningkatkan kekuatan dan durabilitas campuran *SMA*, dengan kadar substitusi 50% merupakan kadar optimum yang memberikan keseimbangan kinerja terbaik.

Kata Kunci: Granit, *Filler*, *Stone Matrix Asphalt*

ABSTRACT

Stone Matrix Asphalt (SMA) pavement is a mix designed for high-volume traffic roads, and its performance is influenced by factors such as filler quality. On the other hand, the abundance of granite dust waste from the construction industry presents both an environmental issue and a waste of resources. This research aims to comprehensively evaluate the effect of utilizing granite dust waste as a substitute filler. Three main aspects studied are its influence on the structural strength, volumetric characteristics, and durability of the SMA mixture.

This study adopted a laboratory experimental method with reference to the Bina Marga 2018 Revision 2 General Specifications. The test specimens were prepared using a 25 mm gradation SMA mixture at an Optimum Asphalt Content of 6.55%. The research variable was the substitution level of granite dust filler at 0%, 25%, 50%, 75%, and 100%. A complete series of tests was conducted to analyze each aspect, including the Marshall test, volumetric analysis, ITS, VCA, as well as durability tests covering CL, DD, and moisture susceptibility (IRS & TSR).

The research results indicate that the substitution with granite dust filler had a clear influence on the strength and durability parameters. The Stability value showed an increase from 903.86 kg, peaking at 984.19 kg at the 50% substitution level. This also increased the MQ value from 301.80 kg/mm to 343.36 kg/mm. ITS also demonstrated a consistent increase, rising from 796.73 kPa to 907.87 kPa. Furthermore, durability against abrasion substantially improved, as evidenced by the decrease in the CL value from 8.69% to 6.71%. Other parameters, such as volumetric characteristics and moisture resistance, also showed improving trends, where the mixture became denser and more resistant to damage. Based on the analysis of the results, it is concluded that granite dust filler effectively enhances the strength and durability of the SMA mixture, with a 50% substitution level being the optimum content that provides the best performance balance.

Keywords: *Granite, filler, Stone Matrix Asphalt*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Infrastruktur jalan memegang peran penting dalam mempercepat pembangunan ekonomi di Indonesia, karena meningkatkan efisiensi distribusi barang dan akses layanan. Dengan kualitas jalan yang memadai dan jaringan yang saling terhubung, arus barang dan jasa menjadi lebih lancar, yang pada akhirnya mempermudah masyarakat dalam memperoleh berbagai produk dan layanan yang dibutuhkan. Investasi pada infrastruktur jalan yang memadai dapat meningkatkan pendapatan negara dan menurunkan tingkat kemiskinan, mempercepat distribusi barang, dan memberikan dampak positif terhadap indikator ekonomi lainnya (Hadi, dkk. 2021).

Pembangunan infrastruktur jalan yang terus berkembang memerlukan bahan material yang memiliki kualitas tinggi dan daya tahan yang lama, agar dapat mendukung kebutuhan transportasi yang semakin meningkat, terutama pada jalan dengan lalu lintas yang padat. Salah satu jenis campuran aspal yang banyak digunakan untuk pembangunan jalan dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi adalah *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. *SMA* terkenal memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap deformasi plastis, kelembaban, dan keausan, yang menjadikannya pilihan utama dalam pembangunan jalan tol dan jalan perkotaan (Bato'tanete, dkk. 2021). Penggunaan *SMA* seringkali membutuhkan bahan tambahan seperti *filler* yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan mekanis dari campuran aspal tersebut (Supit dan Mangontan 2021). Penggunaan *SMA* memerlukan bahan tambahan atau *filler* yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan mekanis campuran aspal tersebut. *Filler* adalah bahan yang ditambahkan dalam campuran aspal untuk mengisi ruang kosong dan meningkatkan sifat kimia dan fisik campuran aspal. Bahan *filler* tradisional yang sering digunakan adalah semen atau bahan mineral halus lainnya. Namun, dengan semakin meningkatnya kebutuhan

akan material konstruksi yang ramah lingkungan dan ekonomis, pencarian bahan pengganti yang lebih berkelanjutan menjadi penting.

Salah satu alternatif yang memiliki potensi untuk digunakan sebagai *filler* dalam campuran *SMA* adalah limbah debu granit. ketersediaannya terus melimpah seiring masifnya industri konstruksi dan pertambangan batuan. Secara global, industri pengolahan batu alam menghasilkan limbah dalam jumlah masif, diperkirakan mencapai jutaan ton setiap tahunnya. Di Indonesia sendiri, potensi limbah ini sangat signifikan mengingat cadangan batuan granit yang tersebar luas di berbagai wilayah. Limbah debu granit ini berasal dari proses pemotongan dan penghalusan batu granit yang seringkali berakhir sebagai limbah padat yang tidak dimanfaatkan secara optimal.

Penumpukan limbah debu granit ini menimbulkan urgensi dari dua sisi. Dari sisi lingkungan, timbunan limbah ini berpotensi mencemari tanah dan sumber air di sekitarnya. Dari sisi ekonomi, ini merupakan pemborosan sumber daya material yang sebenarnya memiliki karakteristik fisik dan kimia yang unggul. Partikel debu granit yang keras dan bersudut memiliki potensi rekayasa yang sangat baik untuk meningkatkan kepadatan dan kekuatan ikatan dalam campuran aspal. Oleh karena itu, pemanfaatannya sebagai *filler* tidak hanya menawarkan solusi pengelolaan limbah yang berkelanjutan, tetapi juga membuka peluang untuk menciptakan material perkerasan jalan yang lebih kuat dan durabel dengan biaya yang lebih efisien.

Debu granit mengandung komponen mineral seperti silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), yang juga terdapat dalam debu batu biasa, yang berfungsi meningkatkan kekuatan ikatan antara aspal dan agregat. batuan granit mengandung kadar silika yang tinggi antara 63,71% hingga 69,55% dan alumina dengan nilai yang signifikan, yang membuktikan kesamaan kandungan komposisi dalam debu granit. Silika dan alumina dalam granit berperan penting dalam ketahanan material, yang dapat mendukung potensi penggunaan debu granit sebagai *filler* dalam campuran aspal (Aini dan Hastuti 2022). Penggunaan limbah debu granit sebagai *filler* pengganti dalam campuran *SMA* tidak hanya dapat mengurangi dampak lingkungan dari pembuangan limbah batuan, tetapi juga berpotensi meningkatkan

kualitas campuran aspal itu sendiri. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih komprehensif untuk mengetahui bagaimana limbah debu granit dapat mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanis dari campuran *SMA*, seperti kekuatan struktur campuran, karakteristik volumetrik, dan durabilitas campuran.

Berdasarkan hal itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan limbah debu granit sebagai *filler* pengganti terhadap karakteristik campuran *SMA*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material konstruksi jalan yang lebih berkelanjutan dan ekonomis, serta membuka peluang untuk penggunaan bahan daur ulang yang lebih efisien pada sektor konstruksi.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut rumusan masalah yang dipakai dalam penelitian ini:

1. Bagaimanakah pengaruh pemanfaatan limbah debu granit sebagai pengganti *filler* terhadap kekuatan struktur pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*?
2. Bagaimanakah pengaruh penggunaan limbah debu granit sebagai pengganti *filler* terhadap volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*?
3. Bagaimanakah dampak penggantian *filler* dengan limbah debu granit terhadap ketahanan (durabilitas) campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh pemanfaatan limbah debu granit sebagai pengganti *filler* terhadap kekuatan struktur pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*.
2. Menganalisis pengaruh penggunaan limbah debu granit sebagai pengganti *filler* terhadap volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*.
3. Menganalisis dampak penggantian *filler* dengan limbah debu granit terhadap ketahanan (durabilitas) campuran *Stone Matrix Asphalt (`SMA)*.

1.4 Manfaat Penelitian

Harapanya hasil dari penelitian Tugas Akhir ini akan memberikan kontribusi informasi dalam literatur tentang pemanfaatan debu granit sebagai bahan untuk

pembuatan jalan, khususnya sebagai *filler* dalam campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA).*

1.5 Batasan Penelitian

Beberapa batasan penelitian yang akan diterapkan pada penelitian sebagai berikut:

1. Penelitian ini mengacu pada ketentuan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018 Revisi ke-2 dan *AASSTHO* 2020.
2. Jenis aspal yang digunakan adalah Aspal Pertamina penetrasi 60/70.
3. Material pengisi (*filler*) terdiri dari debu batu dan debu granit, di mana debu granit digunakan sebagai bahan substitusi dengan proporsi 0%, 25%, 50%, 75%, 100% terhadap berat agregat lolos ayakan No. 200.
4. Proses pencampuran dan evaluasi karakteristik campuran dilakukan dengan metode *Marshall* standar.
5. Kadar aspal dalam campuran digunakan sebesar 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7% dari total berat campuran.
6. Pengujian meliputi karakteristik *Marshall, VCA, ITS,* serta ketahanan (durabilitas) yang dinilai dari parameter *IRS, TSR, DD,* dan *CL*.
7. Agregat kasar yang digunakan diperoleh dari Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
8. Serat selulosa yang ditambahkan dalam campuran berasal dari produk pabrikan VIATOP^{66}.
9. Penelitian ini tidak mencakup analisis unsur kimia dalam material debu granit maupun senyawa kimia dalam produk VIATOP^{66}.
10. Uji stabilitas dinamis tidak dilakukan dalam penelitian ini.
11. Penelitian ini hanya menggunakan analisis statistik *ANOVA* satu arah.
12. Seluruh rangkaian pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Peran *Filler* dalam Campuran Aspal Agregat

Filler atau bahan pengisi adalah material mineral yang umumnya berukuran halus dan melewati saringan No. 200, berfungsi untuk mengisi celah di antara butiran agregat kasar dalam campuran aspal. Penambahan *filler* bertujuan untuk mengurangi rongga antar partikel, meningkatkan kepadatan, serta memperkuat stabilitas campuran tersebut. *Filler* sering terbuat dari material seperti semen *portland*, batu pecah, atau serbuk batu yang ditambahkan dalam campuran aspal untuk memperbaiki kekuatan, kepadatan, dan stabilitas campuran aspal tersebut.

Filler memiliki fungsi utama untuk meningkatkan stabilitas campuran aspal dengan memperkecil celah antara agregat. Selain itu, *filler* juga berperan dalam meningkatkan daya rekat antara partikel-partikel aspal, yang berkontribusi terhadap kinerja lapisan perkerasan jalan (Sukirman 2016). Penambahan *filler* abu sekam padi dapat meningkatkan nilai stabilitas dan *Marshall Quotient (MQ)*, meskipun ada penurunan pada kadar *filler* 75% dan 100%. Dalam percobaan perendaman, nilai stabilitas dan *flow* campuran cenderung menurun, terutama pada kadar *filler* 100% (Hidayati dan Fauziah 2018).

Penelitian Hidayati dan Fauziah (2018) juga membuktikan bahwa penambahan *filler* semen pada campuran *SMA* dapat memperbaiki stabilitas dan meningkatkan nilai *flow*, tetapi dengan kadar *filler* tertentu, nilai *CL* mengalami kenaikan yang melampaui batas spesifikasi yang disarankan. Dengan demikian, meskipun *filler* berperan penting dalam memperbaiki kualitas campuran aspal, pemilihan kadar dan jenis *filler* yang tepat sangat diperlukan untuk menghindari efek negatif terhadap plastisitas dan daya tahan campuran terhadap retak.

2.2 Pemanfaatan Debu Granit sebagai *Filler* Pengganti dalam Campuran Aspal

Penggunaan *filler* dalam campuran aspal sangat penting untuk meningkatkan stabilitas, kepadatan, dan ketahanan campuran terhadap beban lalu lintas. Salah satu bahan alam yang berpotensi sebagai alternatif *filler* adalah debu granit, hasil sampingan dari pemrosesan batu granit. Debu granit memiliki potensi untuk menggantikan *filler* konvensional seperti semen atau serbuk batu dalam campuran aspal, mengingat kandungan silika dan struktur fisiknya yang cocok untuk mengisi rongga antar butiran agregat.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Fasdarsyah, dkk. (2014), penambahan debu granit pada campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)* dapat memberikan efek yang signifikan terhadap karakteristik campuran aspal, terutama pada nilai *Marshall* yang mencakup stabilitas, *flow*, dan *MQ.* Pada penelitian ini, debu granit digunakan sebagai *filler* pada campuran aspal dengan variasi kadar *filler* sebesar 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%, dan dibandingkan dengan *filler* abu keramik (Fardarsyah, dkk. 2014).

Penambahan debu granit sebagai *filler* dalam campuran aspal memberikan hasil signifikan pada berbagai sifat campuran. Pada kadar *filler* 5%, kepadatan campuran adalah 2,322 gr/cm³ dan menurun menjadi 2,279 gr/cm³ pada kadar 25%, menunjukkan peningkatan kepadatan meskipun rongga belum sepenuhnya terisi. Stabilitas campuran meningkat, dengan nilai stabilitas tertinggi 3775 kg pada kadar *filler* 25%, lebih tinggi dibandingkan *filler* abu keramik (2627 kg). Nilai *flow* pada debu granit lebih rendah (4,87 mm pada kadar 25%) dibandingkan dengan abu keramik (6,63 mm), yang menunjukkan plastisitas lebih rendah.

MQ tertinggi pada *filler* debu granit tercatat 838 kg/mm pada kadar 10%, lebih tinggi dari abu keramik. Meskipun demikian, nilai *VITM* tidak memenuhi spesifikasi Bina Marga 2010 pada kadar 15%, 20%, dan 25%. Nilai *VMA* untuk debu granit mencapai 18,70% pada kadar 25%, lebih rendah dibandingkan dengan abu keramik 19,75%, menunjukkan bahwa debu granit memperbaiki beberapa sifat mekanik, tetapi kadar optimal perlu dipertimbangkan lebih lanjut.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa debu granit sebagai *filler* pengganti dalam campuran aspal memberikan peningkatan pada beberapa sifat mekanik campuran, khususnya stabilitas dan ketahanan terhadap beban. Namun, penting untuk memperhatikan bahwa kadar *filler* yang tinggi dapat mengurangi plastisitas campuran, sehingga perlu ditentukan kadar optimal debu granit yang memberikan keseimbangan antara peningkatan kekuatan dan ketahanan terhadap retak.

2.3 Rekayasa Substitusi *Filler* pada Campuran *Stone Matrix Asphalt*

SMA merupakan campuran aspal yang dirancang untuk memberikan ketahanan tinggi terhadap deformasi, ketahanan terhadap retakan, dan ketahanan terhadap pengaruh cuaca pada permukaan jalan. *SMA* terdiri dari dua komponen utama: agregat kasar yang membentuk kerangka utama dan bahan pengikat berupa aspal, dengan tambahan *filler* untuk mengisi rongga antar agregat dan meningkatkan kepadatan serta stabilitas campuran.

Kelebihan utama dari *SMA* adalah penggunaan agregat kasar dalam jumlah yang besar, sekitar 70% hingga 80%, yang memberikan ketahanan yang baik terhadap deformasi dan memberikan kestabilan permukaan jalan. Penambahan *filler* dalam campuran *SMA* berfungsi untuk mengisi celah di antara agregat, meningkatkan stabilitas campuran, dan memberikan ketahanan terhadap kerusakan akibat beban lalu lintas yang berat (Pratama dan Hadi 2024).

Penelitian terkait substitusi *filler* dalam campuran *SMA* menunjukkan bahwa penggunaan abu arang kayu sebagai *filler* pengganti dalam campuran *SMA* memiliki dampak positif terhadap beberapa karakteristik campuran, seperti stabilitas dan ketahanan terhadap kelelahan. Penelitian oleh Pratama dan Hadi (2024), yang mengkaji pemanfaatan abu arang kayu mindi sebagai *filler* pengganti, menemukan bahwa pada kadar *filler* 25%, nilai stabilitas meningkat signifikan hingga 1028,53 kg. Namun, penambahan *filler* abu arang kayu lebih dari 25%, yaitu pada kadar 50% dan 100%, menyebabkan penurunan stabilitas menjadi 934,99 kg.

Hasil penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar *filler* abu arang kayu, nilai *flow* campuran meningkat, yang mengindikasikan peningkatan plastisitas campuran. Meskipun peningkatan plastisitas ini membantu

dalam menurunkan risiko retak, nilai *MQ* pada kadar *filler* yang lebih tinggi cenderung menurun, yang menunjukkan penurunan ketahanan terhadap beban. Secara keseluruhan, penelitian ini menyarankan bahwa kadar optimal abu arang kayu dalam campuran *SMA* adalah sekitar 25%, yang memberikan keseimbangan terbaik antara stabilitas, *flow*, dan ketahanan terhadap kerusakan, tanpa mengorbankan plastisitas dan ketahanan terhadap retakan.

2.4 Perbandingan Penelitian Sebelumnya

Adapun perbandingan perbedaan penelitian ini dengan penelitian yang telah terdahulu yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Peneliti	Aspek				
	Judul	Jenis campuran	*Filler* Pengganti	Pengujian	Hasil
Fardarsyah, dkk. (2014)	Pengaruh Penambahan *Filler* Granit Dan Keramik Pada Campuran aspal AC-WC Terhadap Karakteristik Uji *Marshall*	*AC-WC*	Debu granit dan debu keramik	Karakteristik *Marshall*	KAO yang diperoleh berkisar antara 5% - 25%. *VMA* dan *VFMA* meningkat, *filler* keramik (19,75% pada kadar 25%) dan *filler* granit (18,70% pada kadar 25%). Namun, *VITM* tidak memenuhi spesifikasi. Stabilitas meningkat, *filler* granit nilai tertinggi (3775 kg pada kadar 25%) dibandingkan *filler* keramik (2627 kg pada kadar 25%). *Flow* meningkat, *filler* keramik (6,63 mm pada kadar 25%) dibandingkan *filler* granit (4,87 mm pada kadar 25%). *MQ* lebih tinggi pada *filler* granit (776 kg/mm pada kadar 10%) dibandingkan dengan *filler* keramik (635 kg/mm pada kadar 15%). Secara keseluruhan, keduanya memenuhi spesifikasi Bina Marga.
Oesman dkk. (2021)	*Deformation And Dynamic Stability Of Asphalt Concrete By Using Granite Dust As Filler*	*AC-WC*	Debu granit	Karakteristik *Marshall*	Hasil pengujian menunjukkan bahwa stabilitas dinamis tertinggi untuk debu granit adalah pada 3% *filler* (1465,1 *passing*/mm), sedangkan untuk semen tercatat pada 7,5% *filler* (2520 *passing*/mm). Deformasi terkecil pada debu granit terjadi pada 3% *filler* (2,42 mm), sementara semen pada 7,5% *filler* (2,01 mm). Kecepatan deformasi terendah tercatat pada debu granit dengan 3% *filler* (0,0287 *min*/mm) dan semen pada 7,5% *filler* (0,0167 *min*/mm). Penambahan *filler* lebih dari tingkat optimal mengurangi stabilitas dinamis dan meningkatkan deformasi.

Sumber: Fardarsyah, dkk. (2014), Oesman dkk. (2021)

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Peneliti	Aspek				
	Judul	Jenis campuran	*Filler* Pengganti	Pengujian	Hasil
Purbanto, dkk. (2022)	Analisis Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Dengan Serat Selulosa Serabut Kelapa	*Stone Matrix Asphalt*	Serabut kelapa	Karakteristik *Marshall*, *CL, ITS, DD*	Karakteristik KAO ditemukan sebesar 7,25%. Pada variasi serabut kelapa 0,2%, 0,3%, dan 0,4%, stabilitas *Marshall* mencapai 1061,93 kg, 1154,85 kg, dan 1161,48 kg, melebihi batas spesifikasi 600 kg. Pengujian *CL* menunjukkan penurunan kehilangan berat menjadi 2,04% dengan penambahan serabut kelapa, sedangkan *DD* turun drastis menjadi 0,021%. Pengujian *ITS* juga meningkat menjadi 110,22 kPa pada kadar serabut 0,3%.
de Medeiros dkk. (2024)	*Utilizing marble and granite industry waste in asphalt mixtures for enhanced road performance and sustainability*	*Superpave*	Debu granit dan debu marmer	*ITS* dan Modulus Resilien	Hasil pengujian menunjukkan bahwa. Deformasi terkecil terjadi pada campuran dengan debu granit 3% *filler* (2,42 mm) dibandingkan dengan 2,01 mm pada campuran semen pada 7,5% *filler*. deformasi juga menunjukkan hasil terbaik pada campuran debu granit 3% *filler* (0,0287 min/mm), lebih kecil dibandingkan dengan semen (0,0167 min/mm). Penambahan *filler* berlebih mengurangi stabilitas dinamis, di mana stabilitas menurun menjadi 1194,8 *passing*/mm pada 9% *filler* debu granit, dan 1260 *passing*/mm pada 9% *filler* semen. Selain itu, suhu lebih tinggi (45°C dan 30°C) menyebabkan penurunan signifikan dalam stabilitas dinamis pada semua sampel.
Murana dan Ejike (2024)	*Effect Of Blended Granite Dust And Pulverized Burnt*	*Hot Mix Asphalt*	Abu bata merah dan debu granit	Karakteristik *Marshall*	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggantian hingga 40% abu bata merah meningkatkan *Marshall Stability* dari 10,44 kN (kontrol) menjadi 12 kN (modifikasi), dengan penurunan *flow* dari 4,15 mm menjadi 3 mm. Kinerja

Sumber: Purbanto, dkk. (2022), de Medeiros dkk. (2024), Murana dan Ejike (2024)

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Peneliti	Aspek				
	Judul	Jenis campuran	*Filler* Pengganti	Pengujian	Hasil
	Brick As Mineral Filler In Hot Mix Asphalt				terbaik tercatat pada penggantian 40% Abu bata merah dengan kandungan bitumen optimal 5,23%. Analisis SEM menunjukkan peningkatan *interlocking* partikel dan pengurangan ruang pori, yang meningkatkan kekuatan campuran Secara keseluruhan, Debu bata merah terbukti dapat meningkatkan kualitas *Hot Mix Asphalt* dan memberikan solusi ramah lingkungan serta berbiaya rendah untuk konstruksi jalan.
Tolab dan Fauziah (2024)	Pengaruh Kadar Limbah Geotermal Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Karakteristik *Campuran Stone Matrix Asphalt* (*SMA*)	*Stone Matrix Asphalt*	Limbah Geotermal	*Marshall*, *ITS*, *IRS*, *CL*, *VCA*, *TSR*, *DD*	Penggantian *filler* dengan limbah geotermal hingga 40% pada campuran *SMA* memberikan hasil optimal. Pada level 40%, nilai *VITM* menurun menjadi 3,415%, *VMA* menjadi 19,089%, dan *flow* turun menjadi 2,92 mm, yang menunjukkan peningkatan kepadatan. Nilai *VFWA* meningkat menjadi 78,071%, sementara stabilitas naik menjadi 936,526 kg. *ITS* juga meningkat menjadi 120,47 kPa, dan *TSR* mencapai 96,7%. *CL* turun menjadi 2,8%, menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap keausan.
Pratama dan Hadi (2024)	Pemanfaatan Limbah Abu Arang Kayu Mindi Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap	*Stone Matrix Asphalt*	Abu Arang Kayu Mindi	*Marshall*, *ITS*, *IRS*, *CL*, *VCA*, *TSR*, *DD*	Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan abu arang kayu sebagai *filler* pada campuran *SMA* meningkatkan beberapa karakteristik campuran. Stabilitas maksimal tercatat pada kadar 25% AAK dengan 1028,53 kg, menurun pada 50%-100% menjadi 934,99 kg. Nilai *flow* meningkat dari 50% hingga 100%, membuat campuran lebih plastis. *MQ* mencapai nilai terbaik pada 25%, menurun

Sumber: Murana dan Ejike (2024), Tolab dan Fauziah (2024), Pratama dan Hadi (2024)

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Peneliti	Aspek				
	Judul	Jenis campuran	*Filler* Pengganti	Pengujian	Hasil
	Karakteristik *Campuran Stone Matrix Asphalt* (*SMA*)				pada kadar lebih tinggi. *VITM* dan *VMA* menurun, sementara *VFWA* dan density meningkat. *ITS* menurun menjadi 454,14 kPa pada 100% Abu Arang Kayu. *IRS* meningkat hingga 50%, lalu menurun pada kadar lebih tinggi. *CL* meningkat menjadi 15,59% pada 100%, tetap sesuai standar. Secara keseluruhan, kadar 25% AAK memberikan kinerja terbaik, sementara kadar lebih tinggi mengurangi stabilitas dan ketahanan terhadap kelembaban.
Sabrino (2025)	Pemanfaatan Limbah Debu Granit Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	*Stone Matrix Asphalt*	Debu Granit	*Marshall*, *ITS*, *IRS*, *CL*, *VCA*, *TSR*, *DD*	Hasil menunjukkan dari segi kekuatan struktur, nilai *Stabilitas* dan *MQ* mencapai puncaknya pada kadar substitusi 50%, dengan nilai masing-masing sebesar 984,19 kg dan 343,36 kg/mm. *ITS* terus meningkat hingga 907,87 kPa pada kadar 100%. Secara volumetrik, campuran menjadi lebih padat, ditandai dengan penurunan *VITM* hingga 3,22% dan peningkatan *Density* hingga 2,255 gr/cc. Parameter durabilitas juga menunjukkan perbaikan signifikan; ketahanan abrasi (*CL*) menurun hingga 6,71% dan *DD* menurun hingga 0,07%. Ketahanan terhadap kerusakan akibat air juga meningkat, dengan nilai *TSR* mencapai 96,01% dan *IRS* mencapai puncaknya sebesar 95,05% pada kadar 50%.

Sumber: Pratama dan Hadi (2024)

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur jalan adalah jenis perkerasan yang dirancang untuk menahan beban kendaraan dan lalu lintas dengan menggunakan bahan fleksibel seperti aspal. Keunggulan utama dari perkerasan lentur terletak pada kemampuannya untuk menanggulangi deformasi yang disebabkan oleh beban kendaraan dan perubahan suhu, serta kemampuannya meredam getaran dan kebisingan dari lalu lintas (Setiobudi, dkk. 2020). Perkerasan jenis ini umumnya lebih ekonomis dan mudah dalam hal pemeliharaan dibandingkan dengan perkerasan kaku seperti beton.

Lapisan aspal yang dicampur dengan agregat kasar dan halus pada perkerasan lentur berfungsi untuk mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar. Ketebalan perkerasan lentur ditentukan berdasarkan beban yang akan ditahan dan kondisi tanah di bawahnya. Pada lapisan aspal, peranan campuran yang tepat sangat penting dalam menentukan daya dukung dan ketahanan terhadap keausan, deformasi, dan kerusakan akibat fluktuasi suhu (Hermansyah, dkk. 2022). Menurut Sukirman (2010), perkerasan lentur umumnya lebih direkomendasikan untuk jalan yang digunakan oleh lalu lintas dengan beban ringan hingga sedang. Contoh penerapan perkerasan lentur ini termasuk jalan-jalan di kawasan perkotaan, jalan yang memiliki sistem utilitas di bawah permukaan jalan, serta perkerasan pada bahu jalan atau jalan yang dibangun secara bertahap.

3.2 Limbah Debu Granit

Limbah debu granit merupakan hasil sampingan dari proses pemotongan dan penghalusan batu granit dalam industri pertambangan atau konstruksi. Debu granit ini umumnya terbentuk sebagai partikel halus yang dihasilkan selama proses pemecahan batu granit menjadi ukuran yang lebih kecil untuk digunakan dalam

berbagai aplikasi konstruksi. Meskipun debu granit sering dianggap sebagai limbah, bahan ini memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam berbagai sektor, termasuk dalam perkerasan jalan sebagai *filler* dalam campuran aspal.

Debu granit memiliki sifat fisik yang khas, yakni kekerasan yang tinggi, kekuatan tekan yang baik, serta kestabilan terhadap perubahan suhu dan kelembaban. Hal ini menjadikannya kandidat yang ideal sebagai bahan *filler* pengganti dalam campuran aspal, khususnya dalam jenis campuran *SMA*. Salah satu keuntungan utama pemanfaatan limbah debu granit adalah kemampuannya untuk mengisi ruang kosong antara butiran agregat dalam campuran aspal, yang meningkatkan kerapatan dan stabilitas campuran tersebut. Berikut adalah tampak dari limbah granit yang bisa dilihat pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1 Limbah Granit

Filler berperan penting dalam meningkatkan stabilitas, ketahanan terhadap keausan, dan daya tahan terhadap beban lalu lintas yang tinggi pada perkerasan jalan. Debu granit, dengan kandungan silika yang tinggi, memiliki kemampuan untuk memperbaiki karakteristik fisik campuran aspal, meningkatkan daya rekat antara aspal dan agregat, serta mengurangi kemungkinan terjadinya keretakan pada perkerasan. Selain itu, sifat abrasif dari debu granit juga dapat meningkatkan kekuatan kompresi campuran aspal, menjadikannya lebih tahan terhadap deformasi akibat beban lalu lintas yang terus-menerus.

Menurut Penelitian yang dilakukan oleh Sudarman (2022), granit mengandung komponen mineral seperti silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), yang juga terdapat dalam debu batu biasa, yang berfungsi meningkatkan kekuatan ikatan

antara aspal dan agregat. Batuan granit mengandung kadar SiO2 yang tinggi antara 72,04% dan Al2O3 dengan nilai 14,42%, yang membuktikan kesamaan kandungan komposisi dalam debu granit. Silika dan alumina dalam granit berperan penting dalam ketahanan material, yang dapat mendukung potensi penggunaan debu granit sebagai *filler* dalam campuran aspal. Berikut ini adalah kandungan yang terdapat pada granit dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Kandungan yang Terdapat dalam Debu Granit

Nama Senyawa	Nilai Kadar (%)
Silika (SiO2)	72,04
Alumina (Al2O3)	14,42
Kalium (K2O)	4,12
Natrium (Na2O)	3,69
Kalsium (CaO)	1,82
Oksida fero (FeO)	1,68
Ferric oksida (Fe2O3)	1,22
Magnesium (MgO)	0,71
Titanium (TiO2)	0,30
Fosfor (P2O5)	0,12
Mangan (MnO)	0,05

Sumber : (Sudarman 2020)

3.3 Karakteristik Beton Aspal

Beton aspal adalah jenis lapisan jalan yang terdiri dari campuran agregat dan aspal yang diolah secara merata, dengan atau tanpa penambahan bahan lainnya. Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat beton aspal dicampur dalam sebuah mesin pencampur pada suhu tertentu. Setelah proses pencampuran selesai, campuran tersebut diangkut ke lokasi yang diinginkan dan kemudian ditaburkan di atas permukaan jalan. Kemudian, campuran tersebut dipadatkan dengan menggunakan alat khusus seperti *roller* atau mesin pemadat lainnya untuk menghasilkan lapisan jalan yang kuat dan tahan lama (Sukirman 2016). Berikut adalah beberapa karakteristik yang harus dimiliki oleh campuran beton aspal:

3.3.1 Kelenturan (*Flexibility*)

Kelenturan (*flexibility*) beton aspal merujuk pada kemampuan material ini untuk menyesuaikan diri dengan perubahan bentuk atau tekanan yang disebabkan oleh beban, seperti beban kendaraan dan perubahan suhu. Karakteristik ini sangat penting dalam perkerasan jalan, karena beton aspal harus mampu menahan deformasi tanpa mengalami kerusakan yang signifikan. Hal ini berkontribusi pada pengurangan biaya pemeliharaan jalan serta meningkatkan daya tahan jalan tersebut. Faktor-faktor yang mempengaruhi kelenturan beton aspal antara lain jenis aspal yang digunakan, komposisi dan kepadatan campuran, serta kondisi suhu di sekitar lokasi. Selain itu, penggunaan bahan tambahan seperti aditif pengembang dan serat juga dapat mempengaruhi tingkat kelenturan campuran aspal tersebut.

3.3.2 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas (*stability*) perkerasan jalan merujuk pada kemampuan jalan untuk mempertahankan bentuknya di bawah beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen, seperti gelombang, alur, atau penurunan permukaan. Tingkat stabilitas yang diperlukan untuk jalan tergantung pada volume lalu lintas yang dilaluinya; jalan dengan volume lalu lintas yang tinggi memerlukan perkerasan yang lebih stabil, sementara jalan dengan volume lalu lintas rendah mungkin hanya memerlukan stabilitas yang lebih rendah. Beberapa faktor yang mempengaruhi stabilitas jalan termasuk gesekan antar partikel agregat yang memungkinkan mereka saling mengunci, serta kohesi atau daya ikat dari aspal yang memastikan butir agregat tetap terikat satu sama lain. Hal ini membantu mempertahankan tekanan antar butir agregat, sehingga menjaga kestabilan struktur perkerasan jalan secara keseluruhan.

3.3.3 Keawetan (*Durability*)

Keawetan (*durability*) beton aspal merujuk pada kemampuannya untuk bertahan terhadap beban lalu lintas yang berulang, seperti berat kendaraan dan gesekan antara roda kendaraan dengan permukaan jalan, serta menahan keausan yang disebabkan oleh faktor-faktor cuaca dan iklim, termasuk suhu udara, air, dan perubahan temperatur. Durabilitas beton aspal dipengaruhi oleh beberapa faktor,

seperti ketebalan lapisan aspal yang membungkus agregat, jumlah rongga dalam campuran, serta kepadatan dan tingkat kedap air campuran beton aspal tersebut. Faktor-faktor ini memastikan bahwa beton aspal dapat bertahan lama meskipun terpapar beban dan kondisi lingkungan yang ekstrem.

3.3.4 Ketahanan Terhadap Kelelahan (*Fatigue Resistance*)

Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) adalah kemampuan beton aspal untuk menahan deformasi berulang yang disebabkan oleh beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan, seperti pembentukan alur atau retakan. Untuk mencapai ketahanan yang optimal terhadap kelelahan, disarankan untuk meningkatkan kandungan aspal dalam campuran beton aspal (Sukirman 2016). Dengan demikian, beton aspal dengan kandungan aspal yang lebih tinggi cenderung memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kelelahan, yang pada gilirannya dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan struktural seperti alur atau retakan akibat beban lalu lintas yang berulang.

3.3.5 Kedap Air (*Impermeabilitas*)

Kedap air beton aspal merujuk pada kemampuannya untuk mencegah masuknya air atau udara ke dalam struktur perkerasan. Masuknya air dan udara dapat mempercepat proses degradasi aspal, yang dapat menyebabkan pengelupasan lapisan aspal dari permukaan agregat. Tingkat kedap air beton aspal dapat dinilai berdasarkan jumlah rongga yang tersisa setelah proses pemadatan, di mana semakin sedikit rongga, semakin baik kemampuan beton aspal dalam menahan penetrasi air dan udara.

3.3.6 Kekesatan (*Skid Resistance*)

Kekesatan adalah kemampuan suatu perkerasan jalan dalam memberikan gaya gesek terhadap ban kendaraan, sehingga kendaraan dapat bergerak dengan aman dan terkendali. Tahanan gesek ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis aspal, agregat, dan pola permukaan jalan. Permukaan jalan yang kasar dan berpori cenderung memiliki tahanan gesek yang lebih tinggi, sementara permukaan yang halus dan licin dapat mengurangi tahanan gesek.

3.3.7 Kemudahan Pelaksanaan (*workability*)

Kemudahan pelaksanaan beton aspal mengacu pada sejauh mana campuran beton aspal dapat didistribusikan dan dipadatkan dengan efisien selama proses pengerjaan. Faktor-faktor yang mempengaruhi kemudahan pelaksanaan termasuk kekentalan aspal, bagaimana aspal bereaksi terhadap perubahan suhu, serta karakteristik gradasi dan kondisi agregat. Apabila terdapat kesulitan dalam proses pelaksanaan, maka desain campuran dapat direvisi atau disesuaikan untuk mencapai hasil yang lebih baik (Sukirman 2016).

3.4 Material Penyusun Perkerasan Lentur Jalan

Perkerasan lentur jalan terdiri dari berbagai jenis material yang dirancang untuk menahan beban lalu lintas dan memperpanjang umur jalan. Bahan-bahan yang biasanya digunakan dalam perkerasan lentur meliputi agregat, aspal, dan bahan pengisi (*filler*). Pemilihan material untuk perkerasan lentur dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti intensitas beban lalu lintas, kondisi lingkungan sekitar, serta pertimbangan biaya. Oleh karena itu, pemilihan bahan yang tepat dapat memperpanjang umur jalan sekaligus mengurangi pengeluaran untuk pemeliharaan.

3.4.1 Aspal

Aspal adalah bahan material yang berbentuk padat atau semi-padat yang berfungsi sebagai pengikat dalam pembuatan jalan. Ketika dipanaskan, aspal akan menjadi lebih lunak dan mencair. Bahan ini diperoleh melalui proses penyulingan minyak bumi, sehingga memiliki warna yang mirip dengan minyak bumi, yakni hitam hingga coklat gelap. Dalam penelitian ini, digunakan aspal jenis pen 60/70. Persyaratan teknis untuk aspal keras pen 60/70 dapat dilihat pada Tabel 3.2 di bawah ini

Tabel 3.2 Persyaratan Aspal Keras Penetrasi 60/70

No	Jenis Pengujian	Standar	Nilai Persyaratan
1	Berat Jenis	SNI 2441 : 2011	≥1,0
2	Penetrasi pada 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60 - 70
3	Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥100
4	Titik nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥232
5	Kelarutan dalam TCE (%)	*AASHTO* T44-14	≥99
6	Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥48

Sumber : Bina Marga (2018)

3.4.2 Agregat

Agregat merupakan komponen utama dalam struktur perkerasan jalan, dengan kontribusi sekitar 90%-95% berdasarkan berat, atau 75%-85% berdasarkan volume. Oleh karena itu, kualitas perkerasan jalan sangat bergantung pada sifat agregat serta hasil campuran agregat dengan bahan lainnya (Sukirman 2016).

Agregat berfungsi sebagai bahan pengisi yang memberikan kekuatan, stabilitas, dan volume pada campuran beton dan aspal, yang memiliki peran penting dalam menahan beban lalu lintas (Agustian dan Agusmaniza 2021). Berdasarkan ukuran butirnya, agregat dibagi menjadi dua jenis, yaitu agregat kasar dan agregat halus.

1. Agregat kasar

Adapun persyaratan dari agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3.3 Persyaratan Agregat Kasar pada Campuran *SMA*

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 2439:2011	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)

Catatan :

1) 100/90 menunjukan bahwa 100% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau

lebih dan 90% agregat kasar mempunyai bidang pecah dua atau lebih.

2. Agregat halus

Adapun persyaratan dari agregat halus dapat dilihat pada Tabel 3.4 dibawah ini.

Tabel 3.4 Persyaratan Agregat Halus pada Campuran *SMA*

Pengujian	Standar	Nilai
Nilai setara pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 50%
Material lolos ayakan No. 200	SNI ASTM C117 : 2012	Maks. 10 %
Gumpalan lempung dan butir – butir mudah pecah dalam agregat	SNI 03-4141-1996	Maks. 1 %
Uji kadar rongga tanpa pemadatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45%

Sumber : Bina Marga (2018)

3.4.3 Gradasi Agregat

Gradasi agregat merujuk pada pengaturan ukuran butir agregat yang disesuaikan untuk mencapai komposisi yang optimal. Proses ini melibatkan pengujian dan analisis menggunakan serangkaian ayakan, di mana ayakan dengan ukuran terbesar diletakkan di bagian atas dan ukuran ayakan akan semakin kecil ke bawah. Hal ini bertujuan untuk memastikan distribusi ukuran butir yang tepat dalam campuran. Persyaratan gradasi agregat yang digunakan untuk campuran *SMA* dapat dilihat pada Tabel 3.5 di bawah ini.

Tabel 3.5 Gradasi Agregat Gabungan Campuran *SMA*

Ukuran Ayakan		% Berat yang lolos	
ASTM	(mm)	*SMA* Kasar (Tebal rancangan min. 5,0 cm)	*SMA* Halus (Tebal rancangan min. 4,0 cm)
1"	25	100	-
3/4 "	19	90-100	100
1/2 "	12,5	50-88	90-100
3/8 "	9,5	25-60	50-80
No. 4	4,75	20-28	20-35
No. 8	2,36	16-24	16-24
No. 200	0,075	8-11	8-11

Sumber : Bina Marga (2018)

3.4.4 Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi (*filler*) terdiri dari partikel-partikel mineral agregat yang umumnya dapat melewati saringan no. 200. *Filler* digunakan untuk mengisi celah-celah antara butir agregat kasar dengan tujuan mengurangi volume rongga, meningkatkan kepadatan, serta memperbaiki stabilitas campuran (Kurniasari, dkk. 2018). Partikel yang melewati saringan no. 200 mengisi ruang kosong pada agregat kasar, sehingga memperkecil ukuran rongga udara dan meningkatkan kepadatan campuran secara keseluruhan (Sukirman, 2003).

3.4.5 Bahan Aditif

Bahan aditif adalah material yang dicampurkan ke dalam campuran aspal dengan tujuan meningkatkan performa dan stabilitas aspal. Dalam pembuatan campuran *SMA*, serat selulosa digunakan sebagai opsi bahan aditif yang dapat memberikan efek positif. Penggunaan serat selulosa bertujuan untuk meningkatkan titik lembek aspal, viskositas, dan mengurangi penetrasi (Metekohy, dkk. 2022). VIATOP^{66} merupakan serat selulosa yang telah dilapisi dengan bitumen melalui proses produksi khusus. Bitumen ini berfungsi untuk mendukung proses granulasi, memungkinkan pengendalian perilaku serat selama proses tersebut. Selain itu, bitumen ini juga menggantikan peran pengisi yang diperlukan untuk mengisi ruang di antara serat, yang penting untuk kelancaran proses dispersi selama pencampuran aspal. Berikut adalah tampak VIATOP^{66} yang bisa dilihat pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Serat Selulosa VIATOP^{66}
(Sumber : Abdillah AF dkk., 2018)

VIATOP[66] terbuat dari *arbocel* dan bahan tambahan lainnya, dikemas dalam bentuk butiran silinder yang berwarna abu-abu kehitaman. *Arbocel* adalah serat selulosa yang juga dimanfaatkan sebagai bahan aditif dalam campuran aspal panas (Erikasari, dkk. 2020). Tegalaksana (1994) menyatakan spesifikasi dari *Arbocel* adalah sebagai berikut :

1. Kadar selulosa : 75 – 80%
2. pH : 7,5 ± 1 (basah)
3. Panjang serat maksimum : 5000 mikron
4. Panjang serat rata-rata : 1100 mikron
5. Tebal serat rata – rata : 45 mikron
6. Ketahanan terhadap pemanasan: baik sampai 250℃

Berikut ini adalah persyaratan dari serat selulosa dapat dilihat pada Tabel 3.6 dibawah ini.

Tabel 3.6 Persyaratan Serat Selulosa

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

Sumber : Bina Marga (2018)

3.5 Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*)

Stone Matrix Asphalt (*SMA*) adalah jenis campuran aspal beton panas yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan aspal. Campuran ini membentuk mortar atau pasta dengan aspal sebagai bahan pengikat, yang diproses dalam keadaan panas. *SMA* digunakan sebagai lapisan permukaan jalan (*wearing course*) yang dirancang untuk memberikan ketahanan optimal terhadap alur (*rutting*) dan

abrasi akibat beban lalu lintas yang berat. Salah satu karakteristik utama *SMA* adalah tingginya kandungan agregat kasar yang saling mengunci (*interlocks*), membentuk struktur batu yang kuat dan tahan terhadap deformasi permanen. Selain itu, *SMA* juga memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap retak termal, yang sering terjadi pada daerah dengan perubahan suhu yang ekstrim. Secara keseluruhan, *SMA* merupakan pilihan yang sangat tepat untuk perkerasan jalan yang memerlukan ketahanan jangka panjang, terutama di bawah beban lalu lintas berat dan kondisi lingkungan yang menantang. Persyaratan teknis untuk *SMA* dapat dilihat pada Tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3.7 Persyaratan *Stone Matrix Asphalt*

Sifat – sifat campuran		Persyaratan	
		SMA	*SMA* Mod
Jumlah tumbukan per bidang		50	
Rongga dalam campuran (%)	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 *Marshall* sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min.	80	
Stabilitas dinamis, lintasan/mm	Min.	2500	3000

Sumber : Bina Marga (2018)

3.6 Karakteristik Pengujian *Marshall*

Pengujian *Marshall* adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi sifat-sifat campuran aspal panas. Beberapa karakteristik yang diuji dalam pengujian *Marshall* meliputi stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *VMA*, kepadatan (*density*), *MQ*, *VITM*, serta *VFWA*. Pengujian ini penting untuk menentukan kualitas dan performa campuran aspal dalam kondisi penggunaan nyata.

3.6.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas (*stability*) dalam campuran aspal merujuk pada kemampuannya untuk menahan beban vertikal tanpa mengalami perubahan bentuk yang signifikan. Dalam pengujian *Marshall*, stabilitas diukur berdasarkan gaya maksimum yang diperlukan untuk merusak sampel aspal saat diberi tekanan vertikal. Semakin tinggi nilai stabilitas yang tercatat dalam pengujian *Marshall*, semakin baik kualitas campuran aspal tersebut. Rumus untuk menghitung nilai stabilitas dapat dilihat pada Persamaan 3.1, dan grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar aspal dengan nilai stabilitas dapat ditemukan pada Gambar 3.3 di bawah ini.

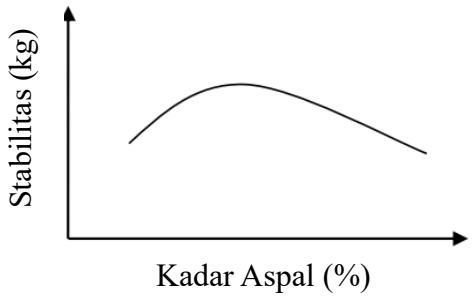
$$q = p \; x \; s \tag{3.1}$$

keterangan :

q = angka stabilitas,

p = pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat, dan

s = angka koreksi tebal benda uji

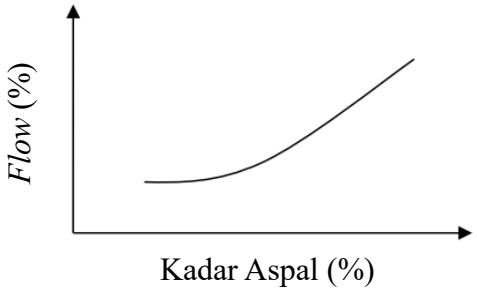


Gambar 3.3 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.2 Kelelehan (*flow*)

Flow mengacu pada kondisi di mana campuran aspal mengalami perubahan bentuk akibat beban yang diberikan, hingga mencapai titik kerusakan, yang diukur dalam satuan panjang (mm). Kehancuran campuran ini mencerminkan tingkat elastisitas lapisan perkerasan, yang sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat aspal, terutama daya lenturnya. Penggunaan aspal dengan daya lentur yang rendah dalam campuran dapat menghasilkan lapisan perkerasan yang lebih kaku dan kurang

fleksibel (Chasanah dan Sukmo 2023). Grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan nilai kelelahan dapat dilihat pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.3 *VMA* (*Void in Mineral Aggregate*)

VMA merujuk pada jumlah rongga yang terdapat di antara butir-butir agregat dalam campuran aspal padat. Nilai *VMA* dihitung dan dinyatakan dalam persentase. Rumus untuk menghitung nilai *VMA* dapat ditemukan pada Persamaan 3.2 dan Persamaan 3.3. Sementara itu, grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar aspal dan nilai *VMA* dapat dilihat pada Gambar 3.5 di bawah ini.

$$l = 100 - j \tag{3.2}$$

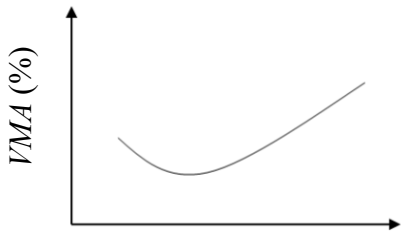
$$j = \frac{(100-b)\,x\,g}{B\ J\ Agregat} \tag{3.3}$$

keterangan :

l = nilai *VMA* (%),

b = persentase aspal terhadap campuran (%), dan

g = berat isi sampel (gr/cc).



Gambar 3.5 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VMA*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.4 Kepadatan (*density*)

Kepadatan (*density*) mengukur tingkat kerapatan suatu campuran setelah melalui proses pemadatan. Semakin tinggi nilai kepadatan, semakin padat dan rapat campuran tersebut. Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai kepadatan antara lain komposisi bahan, kadar aspal, gradasi campuran, suhu saat pemadatan, serta jumlah pemadatan yang dilakukan. Nilai kepadatan dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.4 dan 3.5, dan grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar aspal dan nilai kepadatan dapat dilihat pada Gambar 3.6.

$$g = \frac{c}{f} \tag{3.4}$$

$$f = d - e \tag{3.5}$$

keterangan :

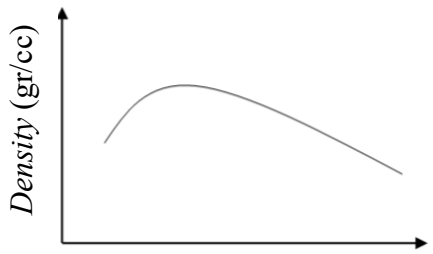
g = nilai *density* (gr/cc),

c = berat benda uji sebelum direndam (gr),

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

e = berat dalam air (gr), dan

f = volume / isi (cm^3).



Gambar 3.6 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Density*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.5 *Marshall Quotient* (*MQ*)

MQ adalah rasio antara nilai stabilitas dengan nilai kelelahan (*flow*). Campuran yang memiliki nilai stabilitas tinggi dan nilai kelelahan rendah akan menghasilkan nilai *MQ* yang tinggi, sedangkan campuran dengan stabilitas rendah dan kelelahan tinggi akan menghasilkan nilai *MQ* yang rendah. Persamaan untuk

menghitung nilai *MQ* dapat dilihat pada Persamaan 3.6, dan grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar aspal dengan nilai *MQ* dapat ditemukan pada Gambar 3.7 di bawah ini.

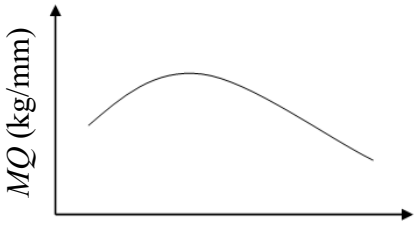
$$MQ = \frac{q}{r} \tag{3.6}$$

keterangan :

MQ = nilai *marshall quotient* (kg/mm),

q = nilai stabilitas (kg), dan

r = nilai *flow* (mm).



Gambar 3.7 Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *MQ*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.6 *VITM* (*Void in the Total Mix*)

VITM adalah persentase perbandingan antara volume rongga dengan volume total campuran padat. Nilai *VITM* dihitung menggunakan Persamaan 3.7 dan Persamaan 3.8. Grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar aspal dan nilai *VITM* dapat dilihat pada Gambar 3.8 di bawah ini.

$$n = 100 - (100 - \frac{g}{h}) \tag{3.7}$$

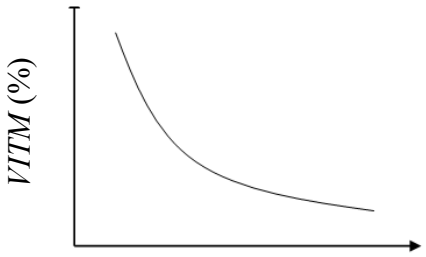
$$h = 100 - \left(\frac{100}{\left(\frac{\%Agregat}{BJ\ Agregat} + \frac{\%Aspal}{BJ\ Aspal}\right)} \right) \tag{3.8}$$

keterangan :

n = nilai *VITM* (%),

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

h = *berat jenis maksimum teoritis campuran*.



Gambar 3.8 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VITM*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.7 *VFWA* (*Void Filled with Asphalt*)

VFWA merujuk pada volume udara dalam beton aspal padat yang terisi oleh aspal. Aspal ini berfungsi untuk melapisi butiran agregat di dalam campuran beton aspal padat. Semakin besar nilai *VFWA*, semakin banyak aspal yang mengisi rongga, sehingga campuran menjadi lebih kedap terhadap penetrasi air dan udara. Sebaliknya, jika nilai *VFWA* kecil, kemampuan campuran untuk menahan air dan udara akan lebih rendah. Rumus untuk menghitung nilai *VFWA* dapat ditemukan dalam Persamaan 3.9 hingga Persamaan 3.13, sementara grafik yang menggambarkan hubungan antara kadar aspal dan nilai *VFWA* dapat dilihat pada Gambar 3.9 di bawah ini.

1. Persentase aspal terhadap campuran

$$b = \frac{a}{100+a} \text{ x } 100 \tag{3.9}$$

keterangan :

a = persentase aspal terhadap batuan (%), dan

b = persentase aspal terhadap campuran (%) .

2. Persentase aspal terhadap agregat

$$m = 100\ x\ \frac{i}{l} \tag{3.10}$$

$$i = \frac{b\ x\ g}{BJ\ Agregat} \tag{3.11}$$

$$l = 100 - j \tag{3.12}$$

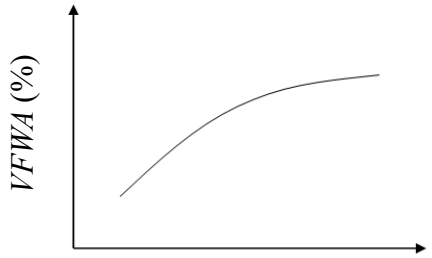
$$j = \left(\frac{(100-b)x\ g}{BJ\ Agregat}\right) \quad (3.13)$$

keterangan :

m = VFWA (%),

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

b = persentase aspal terhadap campuran (%).



Gambar 3.9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VFWA*
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.7 Pengujian *Cantabro Loss* (*CL*)

Pengujian *CL* merupakan metode yang digunakan untuk mengukur kehilangan berat pada benda uji setelah mengalami tes abrasi dengan menggunakan mesin *Los Angeles*. Sebelum dimasukkan ke dalam mesin, benda uji ditimbang untuk mendapatkan berat awalnya (*MO*). Kemudian, benda uji dimasukkan ke dalam drum mesin *Los Angeles* tanpa bola baja. Mesin *Los Angeles* dijalankan dengan kecepatan antara 30-33 rpm selama 300 putaran. Setelah selesai, benda uji dikeluarkan dan ditimbang kembali untuk memperoleh beratnya setelah mengalami abrasi (*Mi*). Kehilangan berat dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.14 berikut.

$$L = \frac{Mo-Mi}{Mo} \text{ x } 100\% \quad (3.14)$$

keterangan :

Mo = berat sebelum diabrasi (gr),

Mi = berat setelah diabrasi (gr), dan

L = persentase kehilangan berat(%).

3.8 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*)

Pengujian *ITS* adalah metode yang digunakan untuk mengukur kekuatan tarik pada beton aspal. Tes ini menilai bagaimana material bereaksi terhadap gaya tarik, yang penting untuk memprediksi potensi terjadinya retakan pada permukaan jalan. Ketika perkerasan jalan menerima beban lalu lintas, bagian atas lapisan permukaan mengalami tekanan, sementara bagian bawah lapisan mengalami gaya tarik. Nilai *ITS* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.15.

$$ITS = \frac{P\ runtuh}{h} \text{ x } A_0 \tag{3.15}$$

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 Perendaman *Index of Retained Strength* (*IRS*)

Pengujian *IRS* adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi dampak air terhadap campuran aspal. Hasil pengujian *IRS* menunjukkan persentase perubahan stabilitas campuran setelah direndam selama 0,5 jam dan 24 jam. Nilai *IRS* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.16.

$$\textit{Index of retained strength} = \frac{S_2}{S_1} \text{ x } 100\% \tag{3.16}$$

keterangan :

S_1 = stabilitas setelah direndam selama 0,5 jam (kg), dan

S_2 = stabilitas setelah direndam selama 24 jam (kg).

3.10 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*)

TSR (*Tensile Strength Ratio*) atau indeks kekuatan tarik tidak langsung yang dihasilkan dari variasi perendaman mengukur sejauh mana campuran aspal dapat mempertahankan kekuatannya setelah terpapar air. Nilai minimum *TSR* yang

disyaratkan adalah lebih besar dari 80%. Perhitungan nilai *TSR* dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.17.

$$TSR = (T_2/T_1) \times 100 \quad (3.17)$$

keterangan :

T_1 = rata-rata nilai *ITS* tanpa rendaman (kg), dan

T_2 = rata-rata nilai *ITS* setelah perendaman 24 jam (kg).

3.11 Pengujian *Draindown (DD)*

DD merujuk pada kondisi di mana aspal dan agregat terpisah dari campuran dan mengalir ke bawah, yang dikenal sebagai pengaliran aspal. Pengujian *DD* dilakukan pada campuran dengan kadar aspal optimal untuk memastikan bahwa tingkat pengaliran aspal dari campuran *SMA* memenuhi standar yang telah ditetapkan. Spesifikasi *DD* untuk campuran *SMA* adalah kurang dari 0,3% dari total berat campuran (SNI 8129:2015). Nilai *DD* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.18.

$$Draindown = \frac{A-B}{C} \times 100 \quad (3.18)$$

keterangan :

Draindown = 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).

3.12 Pengujian *Void Coarse Aggregate* (*VCA*)

VCA adalah pengujian yang digunakan untuk mengukur volume rongga atau ruang kosong dalam agregat kasar pada campuran aspal. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menentukan tingkat kepadatan campuran aspal serta menilai kualitas agregat kasar yang digunakan. Berdasarkan spesifikasi *AASHTO*, nilai *VCA* untuk campuran (VCA_{mix}) harus lebih rendah dibandingkan dengan nilai *VCA* untuk agregat kering (VCA_{drc}). Pengujian ini sangat penting untuk memastikan bahwa campuran aspal memiliki performa yang optimal dan memenuhi persyaratan

standar yang berlaku. Nilai VCA_{drc} dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.19, sedangkan nilai VCA_{mix} dapat dihitung melalui Persamaan 3.20.

$$VCA_{DRC} = \frac{GCAYw - Ys}{GCAYw} x\ 100 \quad (3.19)$$

keterangan :

VCA_{drc} = volume pori antar agregat kasar pada kondisi *dry-rodded,*

G_{CA} = berat jenis *bulk* dari fraksi campuran agregat kasar,

Ys = berat satuan fraksi agregat kasar dalam kondisi *dry-rodded* (kg/m³), dan

Yw = berat satuan air (kg/m³), tergantung temperatur pengukuran.

$$VCA_{mix} = 100 - (G_{mb}/G_{CA}).P_{CA} \quad (3.20)$$

keterangan :

VCA_{mix} = volume pori antar agregat kasar pada campuran *SMA* yang dipadatkan,

Gmb = berat jenis *bulk* campuran aspal yang telah dipadatkan,

G_{CA} = berat jenis *bulk* dari fraksi campuran agregat kasar, dan

P_{CA} = presentase fraksi campuran agregat kasar dalam total campuran aspal.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Dalam studi ini, diterapkan pendekatan eksperimental yang melibatkan serangkaian eksperimen atau observasi untuk mengumpulkan data. Data yang diperoleh selanjutnya akan dianalisis untuk memperoleh temuan penelitian, yang kemudian dibandingkan dengan standar atau kriteria yang berlaku. Prosedur dan standar yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada Pedoman Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

4.2 Metode Pengambilan Data

Pada penelitian ini, digunakan teknik pengambilan sampel *non-probabilitas*, di mana sampel tidak dipilih secara acak. Teknik yang diterapkan *adalah purposive sampling*, yang mana sampel dipilih berdasarkan tujuan dan pertimbangan tertentu. Sampel yang digunakan dalam penelitian ini telah disesuaikan dengan kriteria yang telah ditentukan sebelumnya, sesuai dengan tujuan dari penelitian yang hendak dicapai. Metode ini memungkinkan peneliti untuk fokus pada kelompok atau individu yang relevan dengan topik penelitian, sehingga hasil yang diperoleh lebih tepat sasaran dan sesuai dengan tujuan penelitian.

Proses pengumpulan data dalam penelitian ini akan dilakukan selama tahap pengujian. Untuk mempermudah pengambilan data, benda uji akan dikelompokkan terlebih dahulu. Pengelompokan ini bertujuan untuk memperoleh sejumlah parameter, yang meliputi nilai *stability, flow, MQ, density, VITM, VMA, VFWA, VCA*, *ITS, IRS, TSR*, *DD*, dan *CL*. Pengelompokan ini memudahkan dalam analisis lebih lanjut, serta memastikan bahwa data yang diperoleh lebih terstruktur dan dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas bahan uji secara lebih mendalam.

4.3 Tahapan Penelitian

Seluruh proses penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Adapun langkah-langkah yang akan dijalankan dalam penelitian ini mencakup tahap persiapan dan pemeriksaan, persiapan alat, pembuatan benda uji, perencanaan campuran, pembuatan campuran benda uji, serta serangkaian pengujian yang meliputi uji *Marshall*, *ITS*, *TSR*, *IRS*, *DD*, dan *CL*. Tahapan-tahapan tersebut dirancang untuk memperoleh data yang komprehensif dan mendalam mengenai kualitas bahan uji yang digunakan.

4.3.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material

Dalam penelitian ini, material yang digunakan untuk pembuatan benda uji campuran *SMA* terdiri dari agregat, *filler*, dan aspal. Sedangkan material serat selulosa yang digunakan tidak diuji karena diperoleh dari pabrikan. Spesifikasi yang dijadikan acuan dalam penelitian ini merujuk pada *AASHTO* dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

1. Pengujian Agregat
   a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar merujuk pada SNI 1969:2016. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis semu, berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (*SSD*), serta angka penyerapan air agregat kasar.
   b. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus mengacu pada SNI 1970:2016. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui berat jenis semu, berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (*SSD*), dan angka penyerapan air agregat halus.
   c. Pengujian kelekatan agregat terhadap aspal mengacu pada SNI 2439:2011. Pengujian ini digunakan untuk mengukur tingkat kelekatan antara agregat dan aspal.
   d. Pengujian *sand equivalent* mengikuti SNI 03-4428-1997. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kandungan lumpur, debu, dan bahan lempung pada agregat halus.

e. Pengujian abrasi menggunakan mesin *Los Angeles* mengikuti SNI 2417:2008. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur ketahanan agregat kasar terhadap keausan yang dihasilkan oleh mesin *Los Angeles*.
f. Pengujian analisis saringan mengacu pada SNI ASTM C136-2012. Pengujian ini menggunakan satu set saringan untuk menentukan gradasi agregat kasar, halus, dan *filler*.

2. Pengujian Aspal

Aspal berfungsi sebagai bahan pengikat antar agregat pada campuran perkerasan, dan dalam penelitian ini digunakan aspal jenis AC 60/70. Beberapa pengujian dilakukan untuk mengetahui kualitas aspal, antara lain:

a. Pengujian berat jenis aspal merujuk pada SNI 2441:2011. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat jenis aspal yang akan digunakan dalam campuran.
b. Pengujian daktilitas mengacu pada SNI 2432:2011. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kohesi dan kelenturan aspal. Pengujian dilakukan pada suhu 25°C dengan menarik aspal pada dua cetakan berbeda dan mengukur jarak terpanjang sebelum aspal putus.
c. Pengujian penetrasi mengacu pada SNI 2456:2011. Pengujian ini dilakukan untuk mengukur tingkat kekerasan aspal menggunakan jarum berukuran 0,1 mm dengan beban dan waktu tertentu pada suhu yang ditentukan.
d. Pengujian kelarutan dalam *trichlor ethylen* (*TCE*) merujuk pada *AASHTO* T44-14. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana aspal dapat larut dalam larutan *TCE*, yang mengindikasikan kemurnian aspal.
e. Pengujian titik nyala dan bakar mengacu pada SNI 2433:2011. Pengujian ini digunakan untuk mengetahui suhu aspal ketika terjadi nyala singkat di permukaannya (titik nyala) dan saat aspal terbakar pada titik tertentu (titik bakar).
f. Pengujian titik lembek merujuk pada SNI 2434:2011. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui titik lembek aspal, dengan rentang suhu antara 30°C hingga 200°C.

3. Pengujian *Filler*

   Filler adalah bahan berbutir halus yang digunakan sebagai pengisi dalam pembuatan campuran aspal. *Filler* didefinisikan sebagai fraksi debu mineral yang lolos dari saringan No. 200 (0,074 mm). Pengujian *filler* harus memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam SNI 03-6723-2002 untuk memastikan kualitasnya sesuai standar yang berlaku.

4.3.2 Persiapan Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini disediakan oleh Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Berikut adalah daftar peralatan yang digunakan dalam proses penelitian:

1. Alat pengujian agregat meliputi satu set alat analisis saringan, mesin *los angeles*, tabung *sand equivalent*, dan *vibrator*.
2. Peralatan pengujian aspal yang terdiri dari alat uji daktilitas, penetrasi, kelarutan aspal, titik nyala, titik bakar, dan titik lembek.
3. Cetakan benda uji (*mold*) dengan diameter 10 cm dan tinggi 7,5 cm.
4. Alat uji *marshall* yang terdiri dari:
   a. Cincin penguji dengan kapasitas 2500 kg dan ketelitian 12,5 kg.
   b. Kepala penekan berbentuk lengkung (*breaking head*).
   c. Arloji tekan dengan ketelitian 0,0025 cm.
   d. Arloji penunjuk *flow* dengan ketelitian 0,25 mm beserta perlengkapannya.
5. Alat penumbuk benda uji (*compactor*) dengan berat 4,536 kg dan tinggi jatuhan beban 45,7 cm.
6. Alat untuk mengeluarkan benda uji dari cetakan.
7. Timbangan dengan kapasitas 2 kg dan ketelitian 0,1 gram, serta timbangan dengan kapasitas 5 kg dan ketelitian 1 gram dilengkapi dengan penggantung.
8. Bak perendam (*waterbath*) yang digunakan untuk merendam benda uji sebelum pengujian, dilengkapi dengan pengatur suhu minimal 20°C.
9. Oven untuk memanaskan benda uji dengan pengaturan suhu hingga (200±3)°C.

10. Alat uji *ITS* dan *TSR* yang meliputi:
    a. Alat ukur tekan dengan lebar 0,5 inci.
    b. Arloji stabilitas dan *flow* dengan ketelitian 0,25 mm.
    c. Peralatan pendukung lainnya seperti kompor, *thermometer*, spatula, wajan, gelas ukur, nampan, bak plastik, kain lap, dan jangka sorong.
11. Alat pengujian VCA_{DRC}, yang meliputi:
    a. Timbangan dengan kapasitas lebih dari 5 kg dan ketelitian 1 gram.
    b. Silinder takaran dengan diameter 150 mm dan tinggi 159 mm.
    c. *Tamping rod* dengan diameter 16 mm dan panjang 600 mm.
    d. Oven untuk memanaskan agregat serta *thermometer*.
    e. Peralatan pendukung lainnya seperti sendok pengaduk, spatula, nampan, sarung tangan anti panas, dan sebagainya.
12. Peralatan untuk pengujian *DD*, yang terdiri dari:
    a. Timbangan benda uji.
    b. Oven untuk memanaskan benda uji.
    c. Keranjang kawat berbentuk silinder dengan diameter 108 mm dan tinggi 165 mm, dengan lubang jaring kawat sebesar 3,65 mm (1/4 inci).
    d. Piring aluminium kecil sebagai alas penampung lelehan mastic atau aspal.

4.3.3 Perencanaan Campuran

Perencanaan campuran benda uji bergradasi *SMA* 25 mm dilakukan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menentukan proporsi komposisi agregat dalam campuran.
2. Menghitung variasi kadar aspal dalam campuran menggunakan perhitungan Pb.
3. Membuat benda uji dengan metode pemadatan menggunakan alat pemadat *marshall* sebanyak 2 x 50 tumbukan.
4. Menetapkan nilai KAO berdasarkan parameter-parameter berikut:
    a. *VITM* dengan nilai minimum 3% dan maksimum 5%,
    b. *VMA* dengan nilai minimum 17%,
    c. Stabilitas *Marshall* untuk campuran dengan nilai minimum 600 kg,

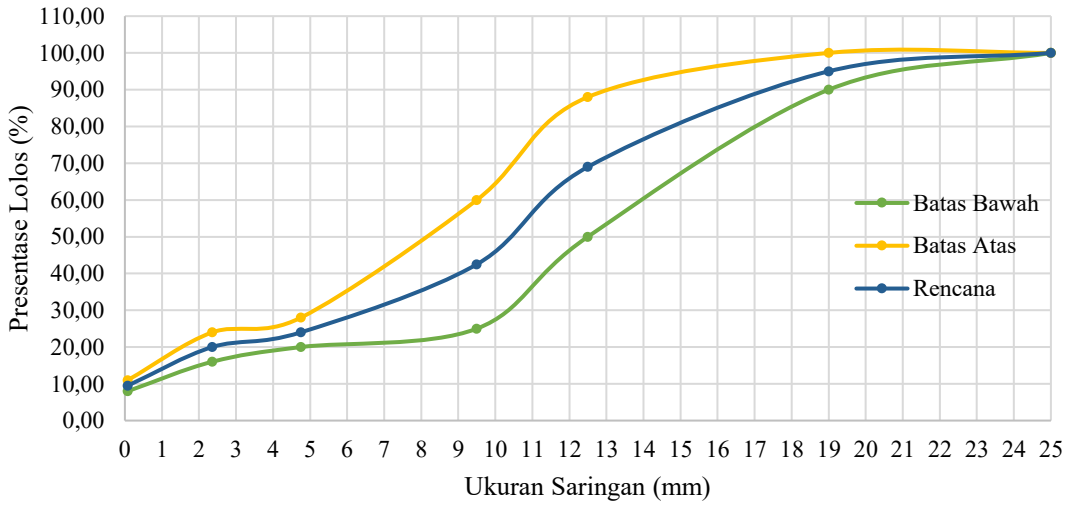
d. *Flow* campuran dengan kisaran minimum 2 mm dan maksimum 4,5 mm,
e. *DD* dengan nilai maksimum 0,3%,
f. *IRS* dengan nilai minimum 90%,
g. *VCA* dengan nilai maksimum 1.

Gradasi agregat yang digunakan dalam campuran *SMA* 25 mm tercantum pada Tabel 4.1 yang dapat dilihat 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
No. 4	4,75	20	28	24	76
No. 8	2,36	16	24	20	80
No. 200	0,075	8	11	9,5	90,5
Pan		0	0	0	100

Mengacu pada Tabel 4.1, diperoleh grafik gradasi dari campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



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

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

Pb = 0,035 (%CA)+0,045 (%FA)+0,18 (%$Filler$)+K (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, pada penelitian ini digunakan angka konstanta 1.

Berdasarkan hasil perhitungan awal (Pb) dengan nilai CA 76%, FA 14,5%, *Filler* 9,5% maka Pb = 0,035 (76)+0,045 (14,5)+0,18 (9,5)+1 = 6,02 % dibulatkan menjadi 6%. Sehingga pada pengujian untuk mencari KAO kadar aspal yang digunakan adalah 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7% terhadap berat total campuran seberat 1200 gr. Kadar serat selulosa pada masing-masing benda uji adalah sebesar 0.3% terhadap berat total campuran, yaitu sebanyak 3.6 gram. Untuk kadar substitusi yang dipakai pada *filler* yaitu menggunakan variasi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari berat total *filler.* Pada variasi kadar aspal untuk menentukan KAO memiliki kebutuhan agregat yang berbeda-beda pada setiap kadarnya, dapat dilihat pada Tabel 4.2 sampai Tabel 4.6.

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	100	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	95,00	5,00	57,00	57,00
1/2	12,5	50	88	69,00	26,00	296,40	353,40
3/8	9,5	25	60	42,50	26,50	302,10	655,50
# 4	4,75	20	28	24,00	18,50	210,90	866,40
# 8	2,36	16	24	20,00	4,00	45,60	912,00
# 200	0,075	8	11	9,50	10,50	119,70	1031,70
Pan		0	0	0	9,50	108,30	1140,00

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	100	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	95,00	5,00	56,70	56,70
1/2	12,5	50	88	69,00	26,00	294,84	351,54
3/8	9,5	25	60	42,50	26,50	300,51	652,05
# 4	4,75	20	28	24,00	18,50	209,79	861,84
# 8	2,36	16	24	20,00	4,00	45,36	907,20
# 200	0,075	8	11	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	100	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	95,00	5,00	56,40	56,40
1/2	12,5	50	88	69,00	26,00	293,28	349,68
3/8	9,5	25	60	42,50	26,50	298,92	648,60
# 4	4,75	20	28	24,00	18,50	208,68	857,28
# 8	2,36	16	24	20,00	4,00	45,12	902,40
# 200	0,075	8	11	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	100	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	95,00	5,00	56,10	56,10
1/2	12,5	50	88	69,00	26,00	291,72	347,82
3/8	9,5	25	60	42,50	26,50	297,33	645,15
# 4	4,75	20	28	24,00	18,50	207,57	852,72
# 8	2,36	16	24	20,00	4,00	44,88	897,60
# 200	0,075	8	11	9,50	10,50	117,81	1015,41
Pan		0.00	0.00	0.00	9,50	106,59	1122,00

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	100	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	95,00	5,00	55,80	55,80
1/2	12,5	50	88	69,00	26,00	290,16	345,96
3/8	9,5	25	60	42,50	26,50	295,74	641,70
# 4	4,75	20	28	24,00	18,50	206,46	848,16
# 8	2,36	16	24	20,00	4,00	44,64	892,80
# 200	0,075	8	11	9,50	10,50	117,18	1009,98
Pan		0.00	0,00	0,00	9,50	106,02	1116,00

Jumlah benda uji yang diperlukan untuk menentukan nilai KAO tercantum pada Tabel 4.7 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
Total Keseluruhan	45		

Setelah nilai KAO diperoleh, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian untuk setiap nilai KAO yang telah ditentukan. Jumlah benda uji yang digunakan untuk masing-masing pengujian KAO dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Jumlah Benda Uji untuk Setiap Pengujian KAO

Pengujian	Kadar *Filler* Debu Granit (%)				
	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
CL	3	3	3	3	3
DD	3	3	3	3	3
Jumlah Benda Uji	18	18	18	18	18
Total Keseluruhan	90				

Berdasarkan Tabel 4.7 dan Tabel 4.8, maka dalam penelitian ini benda uji yang digunakan yaitu 135 buah.

4.3.4 Pembuatan Campuran Benda Uji

Proses pembuatan campuran untuk benda uji dimulai setelah tahap perencanaan campuran, yang mencakup penyaringan agregat untuk memisahkan distribusi butir agregat berdasarkan ukuran saringan yang digunakan. Setiap agregat yang tertahan pada nomor saringan yang berbeda akan ditimbang secara terpisah. Berikut adalah langkah-langkah dalam pembuatan campuran benda uji:

1. Menyiapkan seluruh alat dan bahan yang diperlukan untuk pembuatan campuran.
2. Memanaskan aspal AC 60/70 pada suhu 160°C.
3. Memanaskan agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan serat selulosa hingga mencapai suhu 170°C. Setelah itu, campurkan aspal sesuai dengan persentase yang telah ditetapkan dan aduk hingga homogen.
4. Membersihkan cetakan benda uji, lalu mengolesi bagian dalam cetakan dengan oli agar tidak lengket.
5. Meletakkan kertas dengan ukuran sesuai cetakan pada bagian bawah cetakan. Campuran benda uji yang telah tercampur merata dimasukan hingga mencapai 1/3 volume cetakan, kemudian campuran ditusuk menggunakan spatula

sebanyak 25 kali. langkah ini diulangi hingga cetakan penuh, lalu letakkan kertas di bagian atas.

6. Menempatkan cetakan yang berisi campuran benda uji pada mesin pemadat dan dipadatan sebanyak 50 kali tumbukan pada setiap sisi.
7. Setelah pemadatan selesai, benda uji dikeluarkan dari mesin pemadat dan biarkan beberapa saat untuk mendinginkannya.
8. Benda uji dikeluarkan dari cetakan menggunakan alat *ejector hydraulic pump*, kemudian diamkan benda uji dan lepaskan kertas dari benda uji tersebut.

4.3.5 Pengujian *Marshall*

Pengujian *marshall* bertujuan untuk menentukan berbagai parameter yang mencerminkan stabilitas dan karakteristik fisik campuran perkerasan, seperti stabilitas, *flow*, *MQ*, *density*, *VITM*, *VMA*, dan *VFWA*. Langkah-langkah untuk melakukan pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan benda uji yang akan digunakan dalam pengujian.
2. Membersihkan benda uji dari debu atau kotoran yang menempel akibat proses pembuatan sampel.
3. Mengukur tinggi benda uji pada tiga sisi dengan menggunakan kaliper dan benda uji ditimbang dalam kondisi kering udara untuk mendapatkan berat awal.
4. Merendam benda uji dalam air pada suhu ruang selama 20 hingga 24 jam untuk mencapai kondisi kejenuhan, kemudian benda uji dalam air ditimbang ulang dan catat beratnya.
5. Mengeringkan benda uji yang telah ditimbang dalam air menggunakan kain lap hingga mencapai kondisi *SSD* (*Saturated Surface Dry*), lalu benda uji ditimbang untuk mendapatkan berat dalam kondisi *SSD*.
6. Menempatkan benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 30 menit.
7. Memeriksa mesin *marshall* serta dial pelengkapnya, dan menyiapkan *breaking head* yang sudah diolesi dengan oli.
8. Setelah 30 menit, benda uji diangkat dari *waterbath* dan diletakkan *dalam breaking head*, kemudian pasang dial *flow* dan naikkan *breaking head* hingga benda uji menyentuh cincin penguji.
9. Mengatur jarum pada dial stabilitas dan *flow* ke posisi nol.

10. Menyalakan mesin *marshall* dan amati pembebanan hingga dial stabilitas mencapai angka maksimum.
11. Mencatat hasil pengukuran dari dial stabilitas dan dial *flow* untuk mendapatkan data stabilitas dan aliran campuran perkerasan.

4.3.6 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*)

Pengujian *ITS* ini bertujuan untuk mengukur ketahanan campuran perkerasan terhadap tekanan atau gaya yang diberikan, yang menjadi indikator penting dalam menilai kekuatan dan stabilitas bahan aspal yang digunakan pada lapisan jalan. Prosedur pengujian *ITS* dapat dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan yang diperlukan untuk pengujian, termasuk mesin *ITS* dan perangkat pendukung lainnya.
2. Menyiapkan benda uji sesuai dengan spesifikasi yang telah direncanakan, menggunakan nilai KAO yang diperoleh dari hasil pengujian *marshall* untuk memastikan komposisi campuran yang tepat.
3. Merendam benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 30 menit untuk memastikan bahan uji mencapai kondisi yang diinginkan.
4. Meletakan benda uji pada mesin *ITS* dengan hati-hati, pastikan posisi benda uji sudah sesuai dengan petunjuk pengoperasian mesin.
5. Menyalakan mesin *ITS* dan mengamati pembacaan pada dial pengukuran. Hasil pengujian secara teliti dicatat untuk dianalisis lebih lanjut.

4.3.7 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*)

Prosedur pengujian *TSR* yang mengikuti pedoman SNI 8129:2015 dapat dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Mempersiapkan semua alat dan bahan yang diperlukan untuk pengujian *TSR*, termasuk mesin pengujian dan peralatan pendukung lainnya.
2. Menyiapkan benda uji sesuai dengan perencanaan, menggunakan nilai KAO yang diperoleh dari hasil pengujian *marshall*.
3. Merendam benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam untuk memastikan bahan uji mencapai kondisi yang diinginkan. Setelah itu, benda uji dibiarkan berada pada suhu ruang selama 24 jam.

4. Menempatkan benda uji dengan hati-hati ke dalam mesin pengujian *TSR*, pastikan posisinya sesuai dengan petunjuk pengoperasian.
5. Menyalakan mesin uji dan amati pembacaan pada dial pengukuran. Hasil yang diperoleh dicatat untuk dianalisis lebih lanjut.

4.3.8 Pengujian *Indeks of Retained Strength* (*IRS*)

Prosedur pengujian *IRS* dapat dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Membersihkan benda uji dari kotoran atau debu yang mungkin masih menempel akibat proses pembuatan sampel.
2. Mengukur tinggi benda uji pada tiga sisi menggunakan kaliper, lalu benda uji ditimbang dalam kondisi kering udara untuk mendapatkan berat awal.
3. Benda uji direndam dalam air pada suhu ruang selama 20 hingga 24 jam untuk mencapai kejenuhan, kemudian ditimbang kembali benda uji yang berada dalam air dan catat hasilnya.
4. Benda uji yang telah ditimbang dalam air dikeringkan menggunakan kain lap hingga mencapai kondisi *SSD*, lalu ditimbang lagi untuk memperoleh berat dalam kondisi *SSD*.
5. Benda uji ditempatkan ke dalam *waterbath* yang telah dipanaskan pada suhu 60°C selama 24 jam.
6. Memeriksa kondisi mesin *marshall test* serta dial pelengkapnya, dan menyiapkan *breaking head* yang telah dilapisi oli untuk mengurangi gesekan.
7. Benda uji diangkat dari *waterbath* dan letakkan pada *breaking head*, pasang dial *flow*, dan naikkan *breaking head* sampai benda uji menyentuh cincin penguji.
8. Mengatur jarum pada dial stabilitas dan *flow* sehingga berada di posisi angka nol sebelum pengujian dimulai.
9. Mesin pengujian dinyalakan dan amati pembebanan yang diberikan hingga dial stabilitas menunjukkan angka maksimum.
10. Mencatat hasil pembacaan dari dial stabilitas dan dial *flow* untuk dianalisis lebih lanjut.

4.3.9 Pengujian *Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition* (VCA_{DRC})

Pengujian VCA_{DRC} dilakukan sesuai dengan prosedur yang tercantum dalam *AASHTO* 19M/T 19-14 sebagai berikut:

1. Benda uji yang berupa campuran agregat kasar yang telah dipanaskan (kering) dimasukkan ke dalam silinder takaran hingga mencapai sepertiga tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusukkan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata di seluruh permukaan lapisan pertama, tanpa menyentuh dasar silinder takaran agar hasil pemadatan merata dan tidak mengganggu kedalaman pengisian awal.
2. Lapisan kedua dibentuk dengan menuangkan campuran agregat kasar yang telah dipanaskan (kering) ke dalam silinder takaran hingga mencapai dua pertiga tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusukkan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata di seluruh permukaan lapisan kedua, tanpa menyentuh permukaan lapisan pertama untuk menghindari gangguan pada pemadatan lapisan pertama.
3. Lapisan ketiga dibuat dengan menuangkan campuran agregat kasar yang telah dipanaskan (kering) ke dalam silinder takaran hingga sedikit melebihi tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusukkan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata di seluruh permukaan lapisan ketiga, tanpa menyentuh lapisan kedua untuk menjaga pemadatan lapisan ketiga tetap optimal.
4. Setelah pemadatan selesai, perataan dilakukan pada permukaan campuran yang sedikit melebihi tinggi wadah menggunakan *tamping-rod* atau mistar perata, hingga permukaan campuran sejajar dengan tepian silinder takaran.
5. Benda uji beserta wadahnya kemudian ditimbang untuk mengetahui beratnya, dan selanjutnya dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai VCA_{DRC}.

Prosedur pembuatan benda uji pada pengujian VCA_{DRC} serupa dengan pengujian VCA_{MIX}, di mana komposisi dan jumlah benda uji harus konsisten agar hasil perhitungan dapat dibandingkan dengan standar yang ditetapkan.

4.3.10 Pengujian *Draindown (DD)*

Pengujian *DD* dilakukan sesuai dengan prosedur yang tercantum dalam *AASHTO* T 305-14 sebagai berikut:

1. Menyiapkan dua unit oven, dimana oven pertama diatur pada suhu yang sesuai dengan kisaran suhu pada temperatur produksi, dan oven kedua diatur pada suhu yang lebih tinggi sekitar 15°C dari temperatur produksi.
2. Menimbang masing-masing keranjang kawat dan alas aluminium untuk mendapatkan berat awal.
3. Menuangkan campuran aspal dalam kondisi *loose* ke dalam keranjang kawat yang telah diberi alas aluminium, kemudian ditimbang untuk mendapatkan berat benda uji.
4. Meletakan benda uji tersebut ke dalam oven. Sebelum memasukkan benda uji ke dalam oven, diukur terlebih dahulu suhu benda uji menggunakan termometer untuk memastikan suhu yang sesuai dengan standar pengujian.
5. Menyimpan bahan uji dalam oven pada suhu yang telah ditentukan selama 60±5 menit. Jika suhu benda uji telah turun lebih dari 25°C di bawah suhu pengujian sebelum dimasukkan ke dalam oven, waktu penyimpanan dalam oven diperpanjang menjadi 70±5 menit untuk memastikan kestabilan suhu.
6. Setelah waktu pemanasan tercapai, alas aluminium yang telah menampung lelehan aspal atau mastic ditimbang dengan ketelitian hingga 0,1 gram untuk menghitung jumlah cairan yang terpisah selama proses pemanasan.

4.3.11 Pengujian *Cantabro Loss* (*CL*)

Pengujian *CL* dapat dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. Menyiapkan semua bahan dan peralatan yang diperlukan untuk pengujian, termasuk mesin *los angeles* dan benda uji yang sesuai.
2. Menimbang benda uji terlebih dahulu untuk memperoleh berat awal sebelum dilakukan pengujian abrasi (*Mo*).
3. Meletakan benda uji ke dalam mesin *los angeles* tanpa menambahkan bola baja di dalamnya.
4. Menyalakan mesin dan putar dengan kecepatan antara 30-33 rpm selama 300 putaran untuk memastikan abrasi berlangsung dengan baik.

5. Setelah selesai melakukan pemutaran, benda uji dikeluarkan dari mesin dan ditimbang untuk mendapatkan berat benda uji setelah pengujian abrasi (*Mi*).

4.4 Analisis Data

Setelah serangkaian pengujian dilakukan, langkah selanjutnya adalah melakukan analisis terhadap data yang terkumpul untuk memperoleh parameter hasil pengujian secara menyeluruh. Proses ini bertujuan untuk mengolah data yang telah diperoleh, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih jelas dan detail mengenai karakteristik sampel atau bahan yang diuji.

4.4.1 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* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

1. Berat jenis aspal

   Berat jenis aspal dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.2 berikut.

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

   keterangan :

   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.

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

keterangan :

A = persentase agregat kasar (%),

B = persentase agregat halus (%),

F_1 = berat jenis agregat kasar, dan

F_2 = berat jenis agregat halus.

3. Nilai stabilitas dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.1.
4. Nilai *flow* diperoleh berdasarkan pembacaan pada dial *flow* yang ada pada alat uji.
5. Untuk mendapatkan nilai *VMA*, dapat digunakan Persamaan 3.2 dan 3.3.
6. Nilai *density* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.4 dan 3.5.
7. Nilai *MQ* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.6.
8. Nilai *VITM* dapat diperoleh melalui penghitungan menggunakan Persamaan 3.7 dan 3.8.
9. Untuk menghitung nilai *VFWA*, dapat diterapkan Persamaan 3.9 dan 3.13.

4.4.2 Analisis Pengujian *CL*

Nilai pengujian *CL* diperoleh dengan melalui perhitungan menggunakan Persamaan 3.14.

4.4.3 Analisis Pengujian *ITS*

Nilai pengujian *ITS* diperoleh dengan melalui perhitungan menggunakan Persamaan 3.15.

4.4.4 Analisis Pengujian *IRS*

Nilai pengujian *IRS* diperoleh dengan melalui perhitungan menggunakan Persamaan 3.16.

4.4.5 Analisis Pengujian *TSR*

Nilai pengujian *TSR* diperoleh dengan melalui perhitungan menggunakan Persamaan 3.17.

4.4.6 Analisis Pengujian

Nilai pengujian *DD* diperoleh dengan melalui perhitungan menggunakan Persamaan 3.18.

4.5 Analisis Statistik

Menurut Sugiyono (2010), *ANOVA* atau Analisis Variansi adalah teknik statistik yang digunakan untuk menguji hipotesis perbandingan rata-rata dari beberapa sampel, khususnya pada data yang bersifat interval atau rasio. Metode ini sangat bermanfaat dalam penelitian untuk mengetahui apakah ada perbedaan signifikan antara rata-rata kelompok yang berbeda.

Penelitian ini menggunakan analisis statistik *ANOVA* untuk menguji pengaruh substitusi *filler* terhadap campuran *SMA*. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk membandingkan perbedaan yang ditimbulkan oleh penggantian *filler* terhadap campuran tersebut. Data yang diperoleh, seperti karakteristik *Marshall*, *IRS*, *ITS*, *CL*, *DD*, dan *TSR*, akan dianalisis menggunakan statistik *ANOVA* untuk menarik kesimpulan mengenai hasil penelitian. Secara umum, prosedur *ANOVA* melibatkan beberapa langkah.

1. Merumuskan hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing variabel. Rumusan hipotesis dapat dilihat pada persamaan 4.4 dan 4.5 sebagai berikut:

   $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \ldots\ldots\ldots\ldots \mu k$ (4.4)

   $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \ldots\ldots\ldots\ldots \neq \mu k$ (4.5)

2. Pengumpulan data dengan membuat *variable view* sesuai dengan data yang akan diuji dan unggah data yang telah didapat ke *data view*.
3. Uji normalitas

   Uji normalitas data harus memastikan bahwa data terdistribusi secara normal, karena uji ini merupakan persyaratan yang wajib dipenuhi. Langkah-langkah untuk melakukan uji normalitas adalah sebagai berikut:

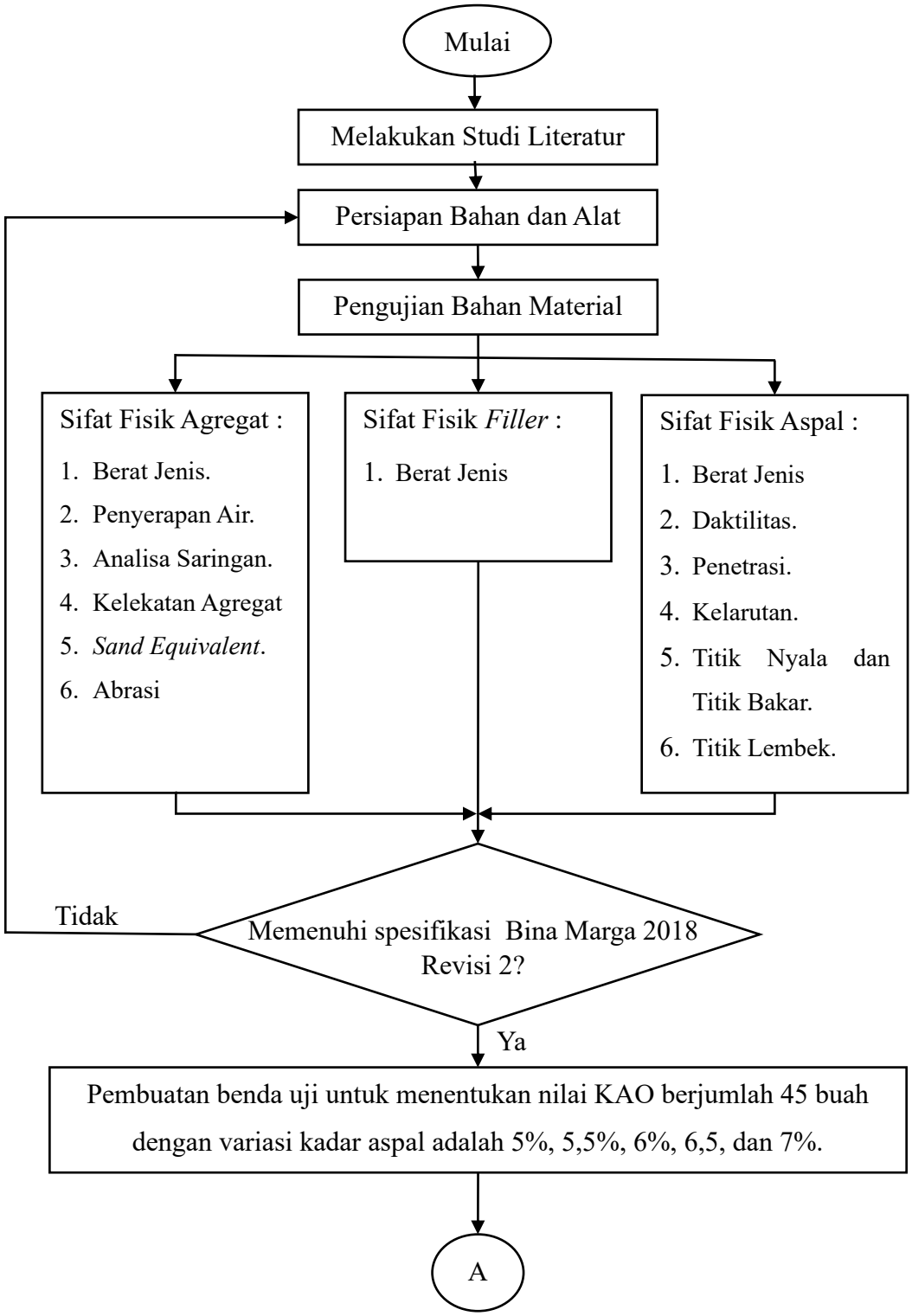
   a. Pilih menu *analyze*, kemudian pilih *descriptive statistics* dan *explore.*
   b. Masukkan *factor list* dan *dependent list.*
   c. Pilih normality *plot with test* pada *opsi plots.*

d. Pilih *continue* dan data hasil uji normalitas akan muncul. Penentuan nilai signifikansi (α) yang biasa digunakan dalam analisis adalah 5% atau 0,05. Jika nilai *P-value* lebih besar dari 0,05, maka distribusi data normal. Namun, jika nilai *P-value* kurang dari 0,05, maka distribusi data tidak normal.

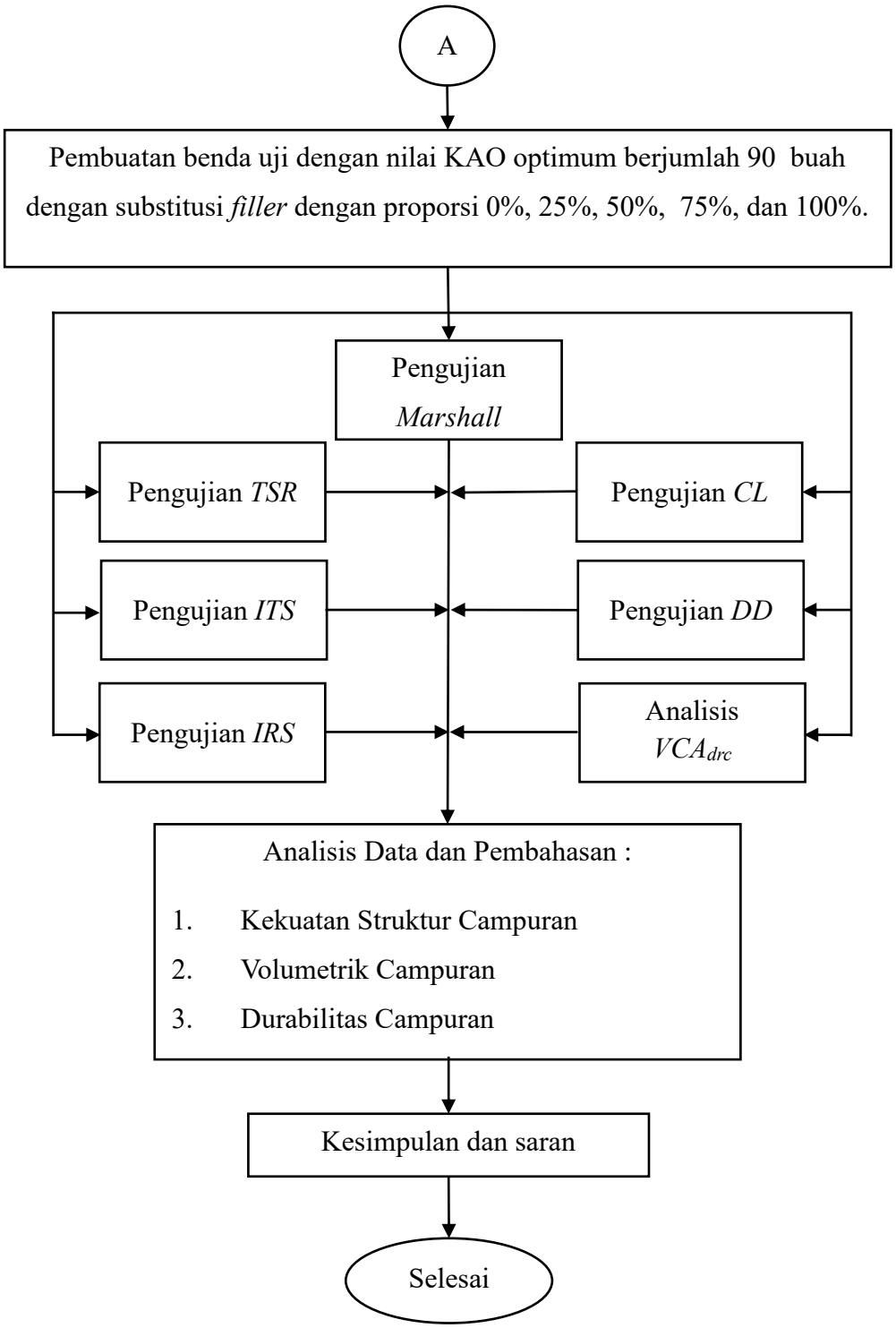
4. Uji homogen
   a. Pilih menu *analyze*, setelah itu pilih *compare means* dan *one way ANOVA*
   b. Masukan *factor list* dan *dependent list*
   c. Pilih *options* dan *homogeneity of variance test*
   d. pilih *continue*
   e. Setelah dilakukan tahapan berikut, pilih *continue* dan data hasil uji normalitas akan muncul. Data normalitas memiliki syarat Nilai Sig. (*P value*) < 0,05 berkesimpulan data tidak homogen. Nilai Sig. (*P value*) > 0,05 ber kesimpulan data homogen.
5. *ANOVA* satu arah
   a. Pilih menu *analyze*, setelah itu pilih *compare means* dan *One Way ANOVA.*
   b. Masukan *factor list* dan *dependent list*.
   c. Lalu pilih *continue.*
   d. Menentukan nilai α atau signifikan umumnya digunakan 5% atau 0,05.
      Jika nilai signifikan atau *P-Value* > 0,05 ; maka H_1 ditolak dan H_0 diterima.
      Jika nilai signifikan atau *P-Value* < 0,05 ; maka H_1 diterima dan H_0 ditolak.
   e. Kesimpulan yang diambil berdasarkan hasil analisis adalah sebagai berikut:
      H_0: Tidak terdapat perbedaan yang signifikan.
      H_1: Terdapat perbedaan yang signifikan.

4.6 Bagan Alir Penelitian

Berikut merupakan bagan alir penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian

BAB V
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian Bahan dan Campuran

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada sampel penelitian, berikut ini adalah hasil dari setiap pengujian tersebut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Adapun jenis aspal yang digunakan adalah aspal Pen 60/70. Pengujian terhadap karakteristik aspal dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, yang terletak di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data yang diperoleh sudah memenuhi persyaratan spesifikasi yang ditetapkan. Proses pengujian ini mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. 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	1,04	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	60-70	66,30	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	≥ 100	164	Memenuhi
4	Titik bakar (°C)	≥ 232	320	Memenuhi
5	Titik nyala (°C)	≥ 232	315	Memenuhi
6	Titik lembek (°C)	≥ 48	48,5	Memenuhi
7	Kelarutan pada *TCE* (%)	≥ 99	99,32	Memenuhi

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Uji karakteristik agregat melibatkan serangkaian tes, di antaranya pengujian agregat kasar, agregat halus, dan *filler*. Semua pengujian tersebut dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Hasil dari pengujian menunjukkan

bahwa data yang diperoleh telah sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan. Prosedur pengujian ini merujuk pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Rekapitulasi hasil yang didapat dapat dilihat pada Tabel 5.2 hingga Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	≥ 2,5	2,59
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 2	1,96
3	Kelekatan agregat terhadap aspal (%)	≥ 95	98
4	Keausan agregat dengan mesin *los angeles* (%)	≤ 40	19,32

Tabel 5.3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	≥ 2,5	2,70
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 2	1,42
3	*Sand equivalent* (%)	≥ 50	92,84

Tabel 5.4 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler*

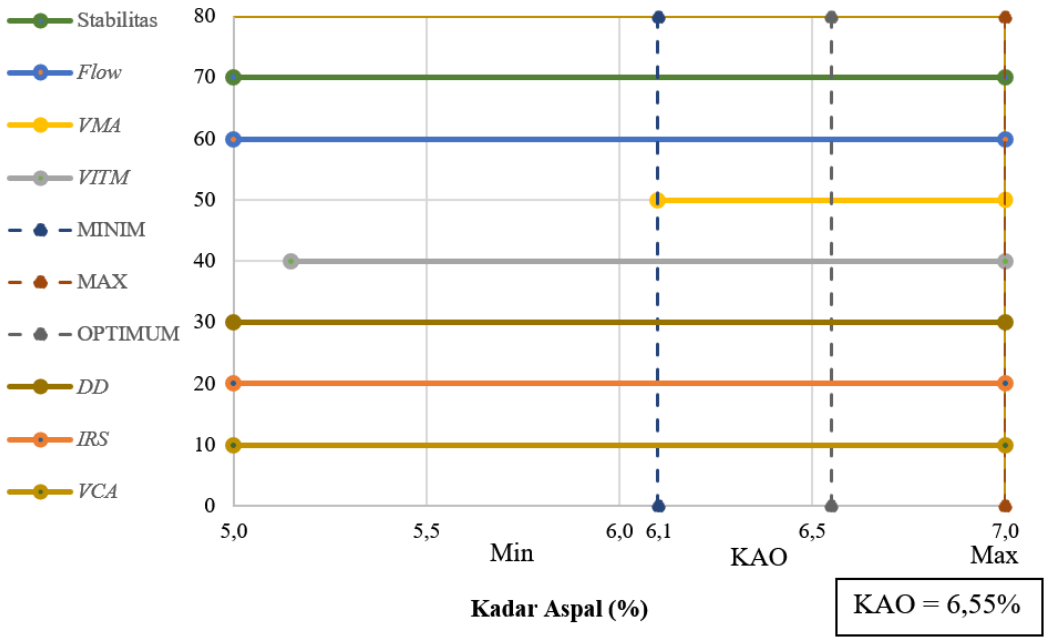
No	Jenis Pengujian	Hasil
1	Berat jenis debu batu	2,56
2	Berat jenis debu granit	2,64

Pada Tabel 5.4, terlihat bahwa hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan berat jenis antara debu batu dan debu granit. Pengujian campuran *SMA* 25 mm untuk menentukan KAO dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh nilai KAO pada campuran *SMA* 25 mm yang menggunakan Pen 60/70. Dari pengujian ini, diperoleh nilai-nilai *stability, flow, VMA, VITM, IRS, DD*, dan *VCA*.

Tabel 5.5 Hasil Pengujian untuk Menentukan KAO

Pengujian	5%	5,5%	6%	6,5%	7%	Spesifikasi
Stabilitas (kg)	881,47	896,28	932,03	946,83	896,28	>600
Flow (mm)	2,53	2,80	3,13	3,35	3,42	2–4,5
VITM (%)	5,30	4,43	3,82	3,36	3,16	3-5
VMA (%)	16,13	16,37	16,85	17,44	18,26	>17
DD (%)	0,09	0,12	0,14	0,18	0,24	<0,3
IRS (%)	90,38	91,04	91,49	91,85	92,73	>90
VCA	0,94	0,95	0,945	0,95	0,95	<1

Untuk menentukan KAO berdasarkan perhitungan secara grafis, nilai KAO dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5.1 Kadar Aspal Optimum dengan Substitusi *Filler* Debu Granit

KAO yang digunakan untuk variasi substitusi *filler* yang bisa dilihat pada Gambar 5.1 tercatat sebesar 6,55%. Penelitian ini mengadopsi *filler* debu granit sebagai pengganti debu batu, meskipun keduanya memiliki perbedaan dalam hal berat jenis. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai berat jenis untuk debu granit sebesar 2,64 gr/cm³, sementara untuk debu batu adalah 2,56 gr/cm³. Untuk memperoleh perbandingan volume yang setara antara kedua *filler* tersebut,

dilakukan proses perhitungan konversi berdasarkan berat jenis. Hasil rekapitulasi perbandingan kedua *filler* tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.6 di bawah ini.

Tabel 5.6 Berat Debu Batu dan Debu Granit

Kadar Variasi Subsitusi *Filler* (%)	Berat Debu Batu (gr)	Berat Debu Granit (gr)	Kadar Aspal Optimum (%)
0	106,53	0	6,55
25	79,90	27,47	
50	53,27	54,93	
75	26,63	82,40	
100	0	109,87	

Berikut adalah contoh perhitungan berat kadar substitusi *filler* debu granit mengunakan varian 50%.

Berat debu granit =

$$(\text{Persentase kadar} \times \text{Total kebutuhan } filler \text{ pada campuran}) \times \frac{\text{Bj debu granit}}{\text{Bj debu batu}}$$

$$\text{Berat debu granit} = (50\% \times 106{,}53) \times \frac{2{,}64}{2{,}56}$$

$$= 54{,}93 \text{ gr}$$

Berikut ini adalah limbah debu granit yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.



Gambar 5.2 Limbah Debu Granit

5.1.3 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt* pada Kadar Aspal Optimum

Untuk mengevaluasi kinerja campuran SMA 25 mm dengan *filler* substitusi debu granit, telah dilakukan serangkaian pengujian pada kondisi KAO. Hasil dari setiap pengujian, yang mencakup parameter *Marshall*, *VCA*, *IRS*, *ITS*, *TSR*, *DD*, dan *CL* telah dirangkum secara rinci dan dapat dilihat pada Tabel 5.7 hingga Tabel 5.16.

1. Debu granit Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Marshall*.

Tabel 5.7 Hasil Rekapitulasi Pengujian *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit

Kadar Substitusi *Filler* Pengganti (%)	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	*MQ* (kg/mm)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*VMA* (%)	*Density* (gr/cc)
0	903,86	3,00	301,80	3,86	78,52	17,97	2,240
25	953,92	2,93	326,67	3,74	79,20	17,86	2,243
50	984,19	2,87	343,36	3,62	79,65	17,76	2,245
75	946,42	2,97	319,40	3,44	80,48	17,61	2,249
100	894,34	3,02	296,57	3,22	81,64	17,42	2,255
Spesifikasi	>600	2 – 4,5	>250	3 - 5	>65	>17	

2. Debu granit Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *DD.*

Tabel 5.8 Hasil Rekapitulasi Pengujian *DD* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit

Kadar Substitusi Debu Granit (%)	*DD* (%)
0	0,18
25	0,15
50	0,13
75	0,09
100	0,07

3. Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *IRS*.

Tabel 5.9 Hasil Rekapitulasi Pengujian *IRS* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit

Kadar Substitusi Debu Granit (%)	*IRS* (%)
0	94,37
25	94,71
50	95,05
75	94,51
100	93,5

4. Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *ITS*.

Tabel 5.10 Hasil Rekapitulasi Pengujian *ITS* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit

Kadar Substitusi Debu Granit (%)	*ITS* (kPa)
0	796,73
25	837,56
50	877,88
75	890,20
100	907,87

5. Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *TSR*.

Tabel 5.11 Hasil Rekapitulasi Pengujian *TSR* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit

Kadar Substitusi Debu Granit (%)	*TSR* (%)
0	89,49
25	92,86
50	93,78
75	94,56
100	96,01

6. Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *CL.*

Tabel 5.12 Hasil Rekapitulasi Pengujian *CL* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit

Kadar Substitusi Debu Granit (%)	*CL* (%)
0	8,69
25	7,86
50	7,39
75	7,07
100	6,71

7. Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *VCA.*

Tabel 5.13 Hasil Rekapitulasi Pengujian *VCA* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler* Debu Granit

Kadar Substitusi Debu Granit (%)	VCA_{MIX}/VCA_{DRC}
0	0,920
25	0,930
50	0,945
75	0,955
100	0,962

Seluruh data hasil pengujian yang meliputi parameter *Marshall*, *VCA*, *DD*, *IRS*, *ITS*, *TSR*, dan *CL* untuk campuran SMA 25 mm selanjutnya dianalisis secara statistik. Analisis ini menggunakan metode *ANOVA* satu arah untuk menentukan pengaruh dari variasi *filler*, di mana hasilnya dirangkum pada Tabel 5.14 dan Tabel 5.15.

Tabel 5.14 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* Satu Arah Untuk Pengaruh *Filler* Debu Granit Terhadap Karakteristik *Marshall*

Parameter	Nilai Signifikan	Keterangan	Hasil Analisis
Stabilitas	0,025	H1 diterima	Signifikan
Flow	0,472	H0 diterima	Tidak signifikan
MQ	0,033	H1 diterima	signifikan
VITM	0,798	H0 diterima	Tidak signifikan
VFWA	0,789	H0 diterima	Tidak signifikan
VMA	0,801	H0 diterima	Tidak signifikan
Density	0,802	H0 diterima	Tidak signifikan

Tabel 5.15 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* Satu Arah Untuk Pengaruh *Filler* Debu Granit Terhadap *IRS, ITS, TSR, CL*, dan *DD*

Parameter	Nilai Signifikan	Keterangan	Hasil Analisis
IRS	0,991	H0 diterima	Tidak signifikan
ITS	0,046	H1 diterima	Signifikan
TSR	0,377	H0 diterima	Tidak signifikan
CL	0,001	H1 diterima	Signifikan
DD	0,277	H0 diterima	Tidak signifikan

Keterangan :

H_0 Diterima : Tidak terdapat pengaruh signifikan pada penggunaan debu granit sebagai *filler* pengganti campuran *SMA*.

H_1 Diterima : Terdapat pengaruh signifikan pada penggunaan debu granit sebagai *filler* pengganti campuran *SMA*.

5.2 Pembahasan

5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Berikut adalah pembahasan untuk data yang telah didapatkan dari pengujian karakteristik aspal.

1. Berat Jenis Aspal

   Berat jenis aspal adalah perbandingan antara massa bitumen dengan volume air suling pada suhu tertentu, dengan kondisi volume yang serupa. Nilai berat jenis bitumen cenderung berubah-ubah, tergantung pada faktor seperti tingkat penetrasi serta suhu bitumen itu sendiri. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diperoleh nilai berat jenis sebesar 1,04, yang mana angka tersebut telah memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni lebih dari 1,00.

2. Penetrasi Aspal

   Uji penetrasi aspal bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan material aspal. Semakin kecil nilai penetrasi yang diperoleh, semakin keras aspal tersebut. Aspal dengan kekerasan yang lebih tinggi umumnya memiliki daya lekat yang lebih baik serta nilai kohesi yang lebih tinggi, yang sangat penting untuk kestabilan dan daya tahan permukaan jalan. Berdasarkan hasil pengujian, aspal Pertamina Pen 60/70 tercatat dengan nilai penetrasi sebesar 66,30 mm, yang sesuai dengan standar yang tercantum dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu berkisar antara 60 hingga 70 mm.

3. Daktilitas Aspal

   Pengujian daktilitas aspal dilakukan untuk menilai sejauh mana aspal dapat mengalami perubahan bentuk (deformasi) tanpa mengalami keretakan ketika diberikan tekanan atau tarikan. Tes ini memberikan gambaran mengenai tingkat kelenturan aspal dan kemampuannya untuk tahan terhadap pembentukan retakan, yang sangat penting untuk kestabilan jalan dalam kondisi beban dan suhu yang bervariasi. Berdasarkan hasil pengujian, aspal menunjukkan nilai daktilitas sebesar 164 cm, yang memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni minimal 100 cm.

4. Titik Lembek Aspal

   Pengujian titik lembek aspal bertujuan untuk menilai seberapa sensitif aspal terhadap perubahan suhu, terutama pada suhu tinggi yang menyebabkan aspal mulai kehilangan kekakuannya dan menjadi lebih lunak. Pengujian ini membantu mengetahui suhu di mana aspal mulai mengalami perubahan dari keadaan keras menjadi lebih cair, yang dapat mempengaruhi kinerja aspal di lapangan. Berdasarkan hasil uji, titik lembek aspal tercatat sebesar 48,5 ºC, yang sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 48 ºC.

5. Titik Nyala Aspal dan Titik Bakar Aspal

   Uji titik nyala aspal bertujuan untuk menentukan suhu maksimum di mana aspal dapat dipanaskan tanpa berisiko menghasilkan uap yang mudah terbakar atau memercikkan api. Pengujian ini penting untuk memastikan keselamatan dalam pengolahan aspal pada suhu tinggi. Hasil uji menunjukkan bahwa titik nyala aspal tercatat pada suhu 315 °C, yang memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 232 °C. Sementara itu, uji titik bakar aspal dilakukan untuk mengetahui suhu di mana aspal mulai memercikkan api yang dapat terlihat menyala selama sekitar lima detik di permukaannya. Hasil uji menunjukkan bahwa titik bakar aspal tercatat pada suhu 320 °C, yang juga memenuhi standar Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu lebih dari 232 °C.

6. Kelarutan dalam *Trychloroethylene* (*TCE*)

   Uji kelarutan dalam *TCE* bertujuan untuk mengukur seberapa baik aspal dapat larut dalam *TCE*, yang berfungsi sebagai indikator tingkat kemurnian aspal tersebut. Hasil dari uji ini memberikan informasi tentang kualitas aspal, di mana semakin banyak aspal yang larut, semakin tinggi tingkat kemurniannya. Hal ini menandakan bahwa kandungan zat pengotor atau mineral dalam aspal sangat rendah, sehingga dapat meminimalkan potensi gangguan terhadap kekuatan ikatan antara aspal dan agregat dalam campuran aspal. Berdasarkan hasil uji, diperoleh nilai kelarutan sebesar 99,32%, yang memenuhi persyaratan dari Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 99%.

5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Berikut adalah pembahasan untuk data yang telah didapatkan dari pengujian karakteristik agregat halus.

1. Berat Jenis Agregat Halus

   Berat jenis merupakan perbandingan antara massa per satuan volume suatu material dengan massa air yang memiliki volume yang sama pada suhu tertentu. Pengujian berat jenis pada agregat halus Clereng, Kulon Progo menghasilkan nilai sebesar 2,70. Nilai ini sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menetapkan batas minimal berat jenis agregat halus sebesar 2,5%.

2. Penyerapan air oleh Agegat Halus

   Penyerapan air oleh agregat mengacu pada kemampuan material untuk menyerap air melalui pori-pori atau rongga yang ada di dalamnya. Semakin besar rongga atau pori pada agregat, semakin banyak aspal yang diperlukan untuk mencapainya, karena tingkat penyerapannya yang tinggi. Hasil pengujian penyerapan air pada agregat halus Clereng, Kulon Progo menunjukkan nilai sebesar 1,42, yang sesuai dengan standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu maksimal 2%.

3. *Sand Equivalent*

   Uji *sand equivalent* digunakan untuk menilai tingkat kebersihan agregat dari kandungan debu, lumpur, atau kotoran lainnya yang dapat mempengaruhi kualitas campuran aspal. Hasil uji *sand equivalent* pada agregat halus Clereng, Kulon Progo menunjukkan nilai sebesar 92,84%. Nilai ini telah memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yang mengharuskan nilai minimal sebesar 50%. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa agregat halus Clereng memiliki tingkat kebersihan yang baik dan relatif bebas dari kandungan kotoran yang dapat mengurangi daya lekat aspal terhadap agregat.

5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Berikut adalah pembahasan untuk data yang telah didapatkan dari pengujian karakteristik agregat kasar.

1. Berat Jenis Agregat Kasar

   Berat jenis agregat kasar mengacu pada rasio antara massa agregat kasar dan volume yang ditempatinya pada suhu tertentu, dan biasanya diukur dalam satuan gram per sentimeter kubik (g/cm^3). Agregat kasar dengan berat jenis yang lebih tinggi umumnya memiliki kerapatan yang lebih besar, yang dapat memberikan dampak positif terhadap kekuatan serta stabilitas campuran aspal. Selain itu, berat jenis agregat kasar juga memberikan gambaran mengenai sifat fisik agregat, seperti tingkat porositas dan kemampuannya untuk menahan deformasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis agregat kasar tersebut mencapai 2,59, yang sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Kasar

   Uji penyerapan air oleh agregat dilakukan untuk mengukur sejauh mana agregat dapat menyerap air yang masuk melalui pori-pori atau rongga dalam strukturnya, mulai dari kondisi kering hingga mencapai titik jenuh. Agregat dengan pori yang lebih besar cenderung memiliki kemampuan penyerapan yang lebih tinggi, yang mengarah pada kebutuhan aspal yang lebih banyak untuk mengisi rongga-rongga tersebut. Sebaliknya, agregat dengan pori-pori yang lebih kecil akan menyerap air lebih sedikit, sehingga memerlukan aspal dalam jumlah yang lebih rendah. Hasil pengujian menunjukkan nilai penyerapan sebesar 1,96%, yang memenuhi standar Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menetapkan nilai maksimal penyerapan air sebesar 2%.

3. Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

   Uji kelekatan agregat terhadap aspal dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana agregat dapat membentuk ikatan yang kuat dan stabil dengan aspal. Pengujian ini memberikan wawasan mengenai kemampuan agregat untuk berikatan secara efektif dengan aspal, yang sangat penting untuk memastikan bahwa campuran aspal dapat mempertahankan kinerjanya dengan baik di

berbagai kondisi lapangan. Hasil pengujian menunjukkan nilai kelekatan sebesar 98%, yang memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 95%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat memiliki kemampuan ikatan yang sangat baik dengan aspal, memastikan ketahanan campuran aspal dalam jangka panjang.

4. Keausan Agregat Kasar dengan Mesin *Los Angeles*

   Uji keausan menggunakan mesin *Los Angeles* bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana agregat dapat bertahan terhadap proses pengikisan yang terjadi selama penggunaannya. Agregat dalam campuran aspal memiliki peran penting dalam menopang beban lalu lintas yang melewati permukaan jalan, sehingga ketahanan terhadap keausan menjadi faktor yang sangat krusial. Agregat yang tahan terhadap gesekan dari roda kendaraan akan memiliki umur pakai yang lebih panjang dan mempertahankan kualitas jalan lebih lama. Berdasarkan hasil pengujian, nilai keausan yang diperoleh adalah 19,32%, yang memenuhi batasan yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni maksimal 40%.

5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*)

Berikut adalah pembahasan untuk data yang telah didapatkan dari pengujian karakteristik bahan pengisi (*filler)*.

1. Pengujian Berat Jenis Debu Batu

   Berat jenis *filler* merupakan rasio antara massa *filler* per unit volume dengan massa air pada suhu yang telah ditentukan. Nilai berat jenis ini berpengaruh langsung terhadap jumlah pori dalam agregat. Agregat dengan berat jenis yang lebih tinggi cenderung memiliki lebih sedikit pori, yang pada gilirannya mengurangi jumlah aspal yang dibutuhkan dalam campuran. Sebaliknya, agregat dengan berat jenis rendah akan memiliki lebih banyak pori, sehingga memerlukan lebih banyak aspal untuk mengisi rongga-rongga tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai berat jenis yang diperoleh adalah 2,556.

2. Pengujian Berat Jenis Debu Granit

   Berat jenis *filler* debu granit adalah rasio antara massa per unit volume debu granit tersebut dengan massa air yang memiliki volume yang sama pada suhu

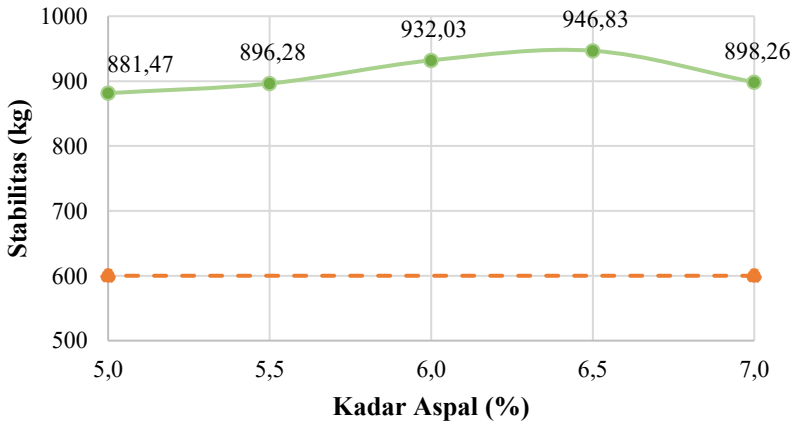
tertentu. Uji berat jenis ini memberikan gambaran mengenai kerapatan material, yang penting untuk menentukan sifat-sifat fisik material tersebut dalam aplikasinya. Berdasarkan hasil pengujian, nilai berat jenis yang diperoleh adalah 2,636.

Menentukan berat volume memerlukan pemahaman mengenai berat jenis setiap jenis *filler*. Ini penting untuk membandingkan volume antar *filler* agar bisa disesuaikan dengan volume yang sama. Sebab, berat jenis abu debu granit sebagai pengganti *filler* berbeda dibandingkan dengan berat jenis *filler* debu batu.

5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

1. Analisis Pengaruh Nilai Stabilitas untuk Menentukan KAO

   Stabilitas merupakan kemampuan campuran aspal untuk mempertahankan kekokohannya dalam menghadapi tekanan lalu lintas, variasi cuaca, dan kondisi lingkungan lainnya tanpa mengalami kerusakan atau perubahan bentuk yang berlebihan. Aspek ini sangat penting agar jalan beraspal dapat bertahan lama, mampu menahan beban berat seperti kendaraan besar, serta tetap berfungsi dengan baik meskipun terpapar suhu yang sangat tinggi atau rendah, serta kelembaban yang fluktuatif. Nilai stabilitas tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.



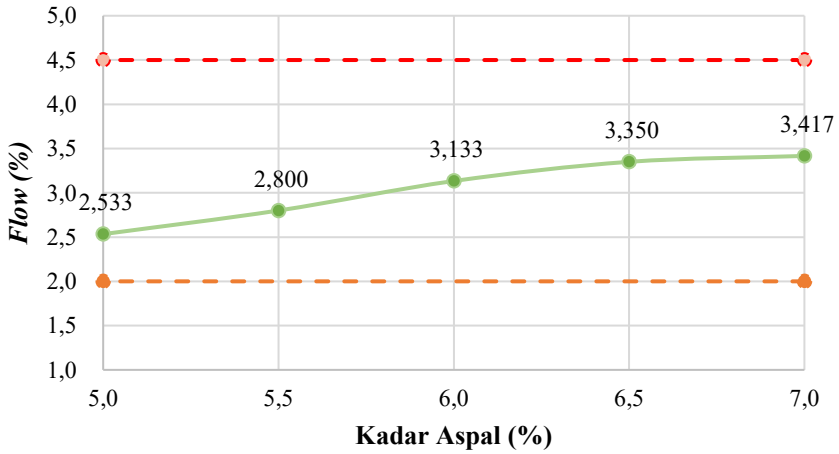
Gambar 5.3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas

Pada Gambar 5.3, terlihat bahwa nilai stabilitas campuran meningkat seiring dengan peningkatan kandungan aspal. Namun, setelah mencapai

puncaknya, stabilitas mulai menurun. Titik optimalnya tercatat pada kadar aspal 6,5%, setelah itu nilai stabilitas mengalami penurunan. Peningkatan stabilitas ini berkorelasi dengan penambahan kadar aspal hingga mencapai batas optimal, setelah itu stabilitas akan berkurang jika kadar aspal terus bertambah. Fenomena ini terjadi karena semakin tingginya kadar aspal, menyebabkan lapisan aspal menjadi lebih tebal, sehingga mengurangi gesekan antar partikel agregat. Selain itu, aspal berfungsi lebih sebagai pelicin antar agregat daripada sebagai pengikat. Berdasarkan persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, campuran *SMA* harus memenuhi nilai stabilitas minimal sebesar 600 kg. Campuran dengan kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0% telah memenuhi standar minimum yang ditetapkan.

2. Analisis Pengaruh Nilai *Flow* untuk Menentukan KAO

Kelelehan (*flow*) mengacu pada sejauh mana campuran aspal mengalami perubahan bentuk atau deformasi ketika diberikan beban. Parameter ini sangat penting dalam mengevaluasi kinerja campuran aspal, terutama pada penggunaan jalan raya, karena menggambarkan seberapa baik campuran tersebut dapat menahan tekanan tanpa mengalami kerusakan bentuk yang signifikan. Nilai kelelehan dapat dilihat pada Gambar 5.4 berikut.



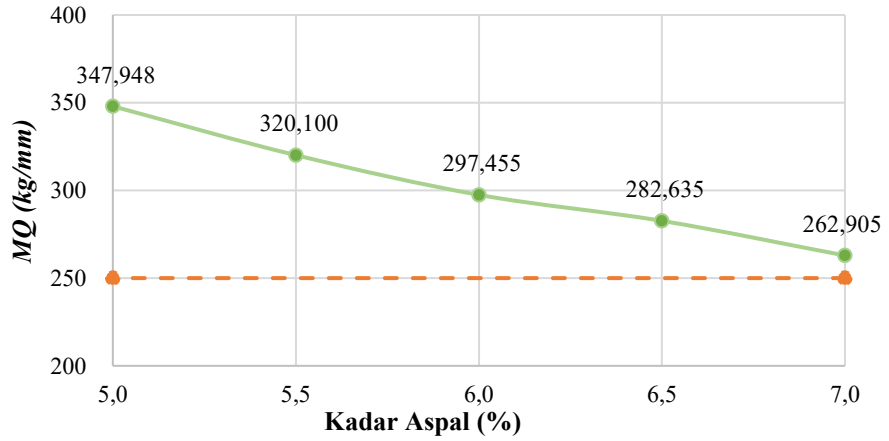
Gambar 5.4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow*

Pada Gambar 5.4, terlihat bahwa nilai *flow* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal dalam campuran, yang disebabkan oleh penebalan lapisan aspal. Peningkatan kadar aspal akan memperbesar nilai *flow*, yang

pada gilirannya membuat campuran menjadi lebih plastis. Kondisi ini menyebabkan campuran lebih mudah mengalami deformasi atau perubahan bentuk ketika diberikan beban. Menurut spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* yang diharapkan berada dalam rentang 2 hingga 4,5 mm. Campuran dengan kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0% sudah memenuhi kriteria minimum yang ditetapkan.

3. Analisis Pengaruh Nilai *MQ* untuk Menentukan KAO

MQ adalah rasio antara nilai stabilitas dan kelelehan (*flow*), yang digunakan untuk mengukur keseimbangan antara kekakuan dan kelenturan suatu campuran. Semakin tinggi nilai *MQ*, maka campuran cenderung lebih kaku, sedangkan nilai *MQ* yang lebih rendah menunjukkan campuran yang lebih lentur atau fleksibel. Nilai *MQ* dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut.



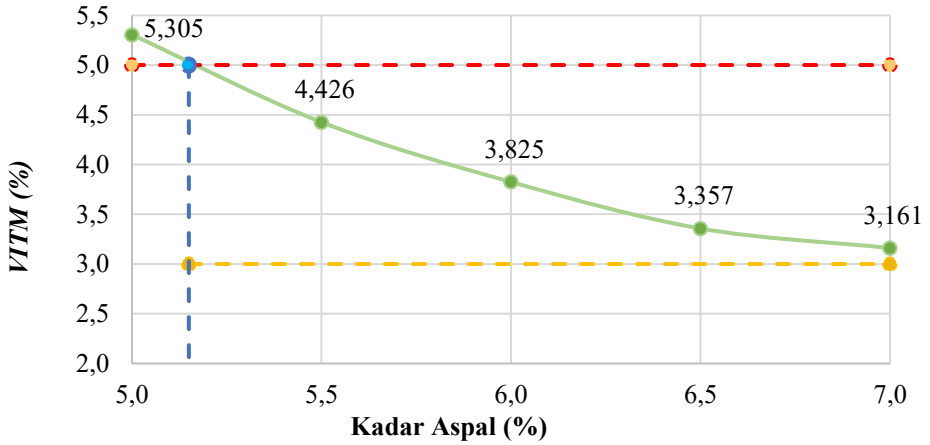
Gambar 5.5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *MQ*

Pada Gambar 5.5, terlihat bahwa nilai *MQ* cenderung menurun seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Penurunan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yang berhubungan dengan struktur dan komposisi campuran aspal dan agregat. Peningkatan kadar aspal juga berimbas pada naiknya nilai *flow*, yang mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih rentan terhadap deformasi saat diberi beban. Faktor ini menyebabkan nilai *MQ* menurun, karena nilai *flow* yang tinggi mengarah pada ketahanan campuran yang lebih rendah terhadap tekanan. Selain itu, ketika kadar aspal terlalu tinggi, interaksi antar partikel agregat berkurang, mengurangi gesekan di antara partikel, dan

menurunkan kekuatan struktural campuran. Hal ini menyebabkan kestabilan campuran berkurang. Campuran dengan kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0% telah memenuhi standar minimum yang ditetapkan.

4. Analisis Pengaruh Nilai *VITM* untuk Menentukan KAO

VITM adalah persentase yang menggambarkan perbandingan antara ruang kosong atau rongga udara dengan volume total campuran setelah proses pemadatan. Seiring dengan bertambahnya kadar aspal, nilai *VITM* cenderung menurun, karena ruang kosong antara partikel agregat semakin terisi oleh aspal. Hal ini terjadi karena aspal mengisi rongga yang ada dalam campuran, mengurangi volume udara yang tersisa. Nilai *VITM* dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut.



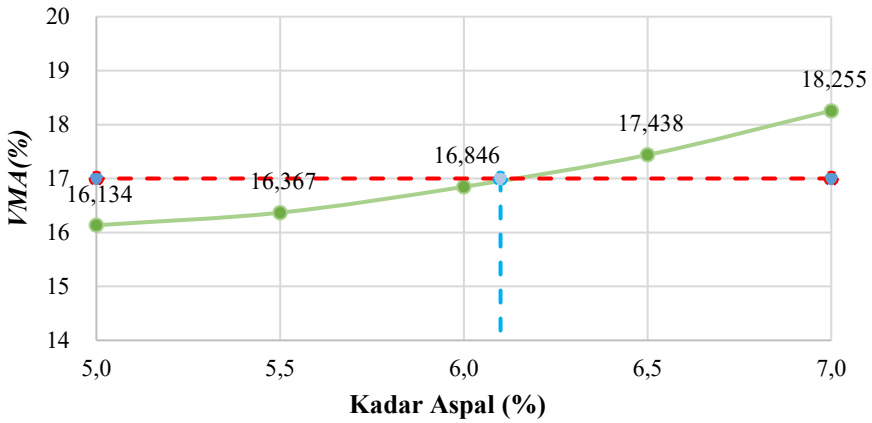
Gambar 5.6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VITM*

Pada Gambar 5.6, dapat dilihat bahwa nilai *VITM* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya kadar aspal dalam campuran. Penurunan ini disebabkan oleh semakin banyaknya aspal yang mengisi rongga udara antara partikel agregat, yang dikenal sebagai *VFWA*. Proses ini mengurangi ruang kosong dalam campuran. Pada kadar aspal 5%, campuran tersebut tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, karena nilai *VITM* untuk campuran *SMA* harus berada antara 3% (batas minimum) dan 5% (batas maksimum). Peningkatan kadar aspal akan menurunkan nilai *VITM*, yang berimbas pada kedapnya campuran terhadap

air. Hal ini menyebabkan udara sulit masuk ke dalam campuran, yang dapat mempercepat proses oksidasi dan membuat aspal menjadi rapuh.

5. Analisis Pengaruh Nilai *VMA* untuk Menentukan KAO

VMA merupakan indikator yang menunjukkan volume rongga dalam agregat mineral yang terisi oleh aspal, yang dihitung dalam bentuk persentase. Nilai *VMA* ini dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut.

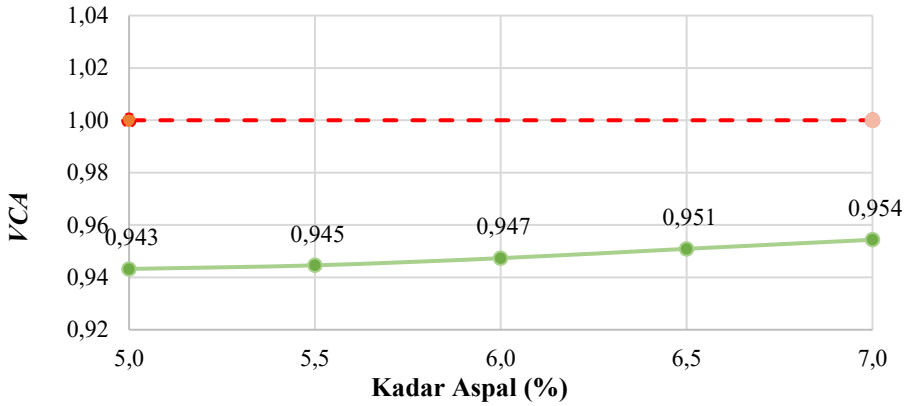


Gambar 5.7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VMA*

Pada Gambar 5.7, dapat dilihat bahwa nilai *VMA* meningkat seiring dengan penambahan kadar aspal. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya aspal yang dapat menyelimuti agregat dan mengisi rongga di antara partikel agregat. Pada kadar aspal 5% - 6%, campuran tersebut tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, karena nilai *VMA* minimum untuk campuran *SMA* adalah 17%. Peningkatan kadar aspal menyebabkan nilai *VMA* naik, karena lapisan aspal yang semakin tebal mengakibatkan ruang kosong antar agregat menjadi lebih besar. Nilai *VMA* yang tinggi, bersama dengan kadar aspal yang tinggi, dapat menyebabkan lapisan perkerasan menjadi lebih lentur.

6. Analisis Pengaruh Nilai *VCA* untuk Menentukan KAO

Pengujian *VCA* merupakan prosedur yang digunakan untuk mengukur volume rongga yang terdapat dalam partikel agregat kasar. Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 5.8 dibawah ini.

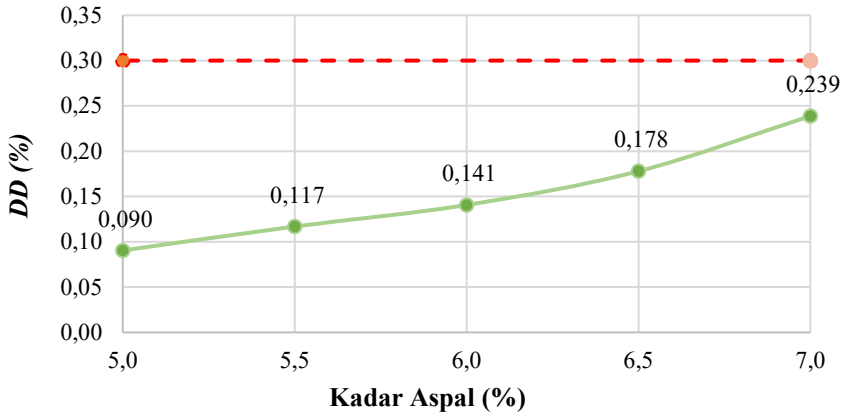


Gambar 5.8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VCA*

Pada Gambar 5.8, terlihat bahwa nilai *VCA* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Hal ini disebabkan oleh penebalan lapisan aspal dalam campuran, yang mengakibatkan jarak antar agregat semakin lebar. Sebagai akibatnya, kontak langsung antara partikel agregat (*stone-on-stone contact*) dalam campuran *SMA* berkurang. Berdasarkan grafik tersebut, semua kadar aspal yang digunakan memenuhi batasan spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menetapkan batas nilai *VCA* maksimum sebesar 1 untuk campuran *SMA*.

7. Analisis Pengaruh Nilai *DD* untuk Menentukan KAO

Pengujian *DD* pada campuran *SMA* dilakukan untuk mengidentifikasi potensi pengaliran aspal yang dapat terjadi akibat tingginya kadar aspal dalam campuran. Pengaliran aspal ini dapat memengaruhi kestabilan dan kualitas campuran secara keseluruhan. Pengujian ini penting untuk memastikan bahwa campuran tetap memiliki konsistensi yang baik dan memenuhi standar performa yang diharapkan dalam penggunaannya di lapangan. Hasil pengujian *DD* ditampilkan pada Gambar 5.9.

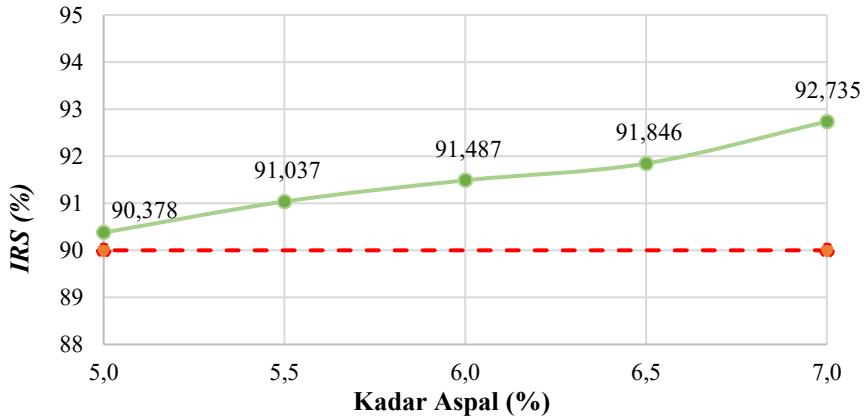


Gambar 5.9 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *DD*

Pada Gambar 5.9, terlihat bahwa nilai *DD* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Peningkatan kadar aspal menyebabkan terjadinya pengaliran aspal dalam campuran. Meskipun demikian, nilai *DD* pada seluruh kadar aspal yang diuji tetap memenuhi batasan yang ditetapkan dalam Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yang mensyaratkan nilai *DD* untuk campuran *SMA* kurang dari 0,3%. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun ada peningkatan kadar aspal, campuran tersebut masih dapat memenuhi standar performa yang diperlukan untuk aplikasi konstruksi.

8. Analisis Pengaruh Nilai *IRS* untuk Menentukan KAO

   Nilai *IRS* dihitung dengan membandingkan stabilitas campuran setelah direndam selama 24 jam dalam *waterbath* pada suhu 60°C dengan stabilitas campuran yang direndam selama 0,5 jam. Menurut Spesifikasi Bina Marga Revisi 2 Tahun 2018, campuran *SMA* harus memiliki nilai *IRS* lebih dari 90%. Hasil pengujian *IRS* dapat dilihat pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *IRS*

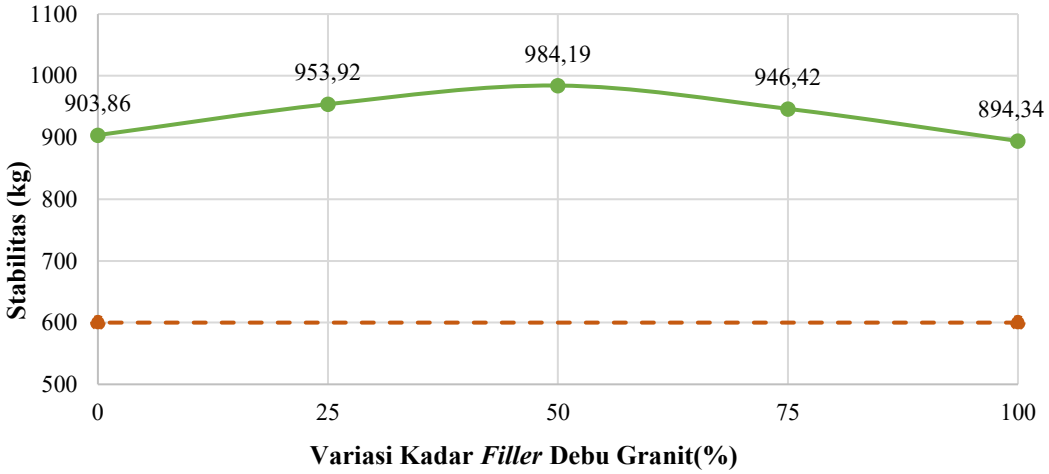
Pada Gambar 5.10, terlihat bahwa nilai *IRS* meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Hal ini disebabkan oleh penurunan nilai *VITM* dan peningkatan nilai *VMA* dalam campuran. Akibatnya, campuran tersebut menjadi lebih tahan terhadap keausan yang disebabkan oleh faktor-faktor eksternal seperti kondisi cuaca, kelembaban, dan fluktuasi suhu. Peningkatan *IRS* menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik, sehingga dapat memberikan umur pakai yang lebih lama dan performa yang stabil dalam kondisi lingkungan yang beragam.

5.2.6 Karakteristik *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum Campuran dengan Subsititusi *Filler* Debu Granit

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* pada campuran *SMA* 25 mm dengan substitusi *filler* debu granit, diketahui bahwa nilai berat jenis debu granit lebih besar dibandingkan dengan berat jenis debu batu Clereng. Perbedaan ini dapat mempengaruhi karakteristik campuran aspal yang dihasilkan. Berikut ini disajikan hasil pengujian yang menunjukkan pengaruh penggunaan debu granit sebagai substitusi *filler*, dengan nilai KAO sebesar 6,55%. Hasil ini memberikan wawasan tentang bagaimana perubahan komposisi *filler* dapat mempengaruhi kualitas dan kinerja campuran aspal secara keseluruhan.

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

Grafik hasil nilai stabilitas akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut.



Gambar 5.11 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Stabilitas

Berdasarkan Gambar 5.11, grafik menunjukkan bahwa penambahan *filler* debu granit pada campuran menyebabkan nilai stabilitas meningkat hingga mencapai titik maksimum pada kadar substitusi 50%. Setelah melewati titik optimum tersebut, nilai stabilitas mengalami penurunan pada kadar 75% dan 100%. Pencapaian nilai stabilitas maksimum pada 50% ini mengindikasikan bahwa proporsi tersebut merupakan kadar *filler* debu granit yang paling efektif untuk digunakan dalam campuran ini.

Peningkatan stabilitas dari 0% hingga 50% terjadi karena sifat fisik unggul dari debu granit. Partikelnya yang bersudut (angular) dan memiliki tekstur permukaan yang kasar secara signifikan meningkatkan friksi internal dan kuncian antar agregat (*interlocking*). Stabilitas menurun karena butiran debu granit yang lebih halus cenderung bercampur lebih mudah dengan aspal. dengan meningkatnya jumlah debu granit, mastik yang terbentuk menjadi berlebih, mengurangi kekuatan ikatan antar butiran dan menurunkan stabilitas.

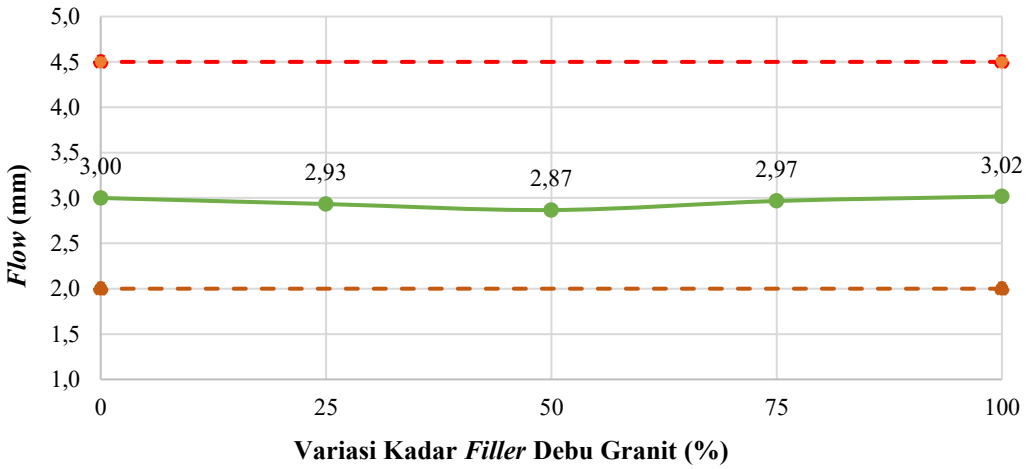
Nilai signifikansi analisis *ANOVA* sebesar 0,025 pada tingkat signifikansi 0,05 menunjukkan bahwa hasil tersebut signifikan (0,025 < 0,05), sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan *filler* debu granit berpengaruh terhadap nilai stabilitas. Dengan demikian, campuran *SMA* 25 mm dengan penggunaan *filler* debu granit mempengaruhi stabilitas campuran secara signifikan.

Penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Firmansyah dan Chasanah (2018), yang menyatakan bahwa Peningkatan kadar *filler* gypsum dalam campuran aspal berkorelasi positif dengan peningkatan stabilitas, namun hanya sampai pada titik tertentu. Setelah melewati kadar jenuhnya, kelebihan *filler* akan mengganggu ikatan antar agregat. Akibatnya, kekuatan internal campuran menurun yang ditandai dengan turunnya nilai stabilitas.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai stabilitas minimum untuk campuran *SMA* adalah > 600 kg, sehingga nilai stabilitas campuran *SMA* dengan variasi *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan.

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

Grafik hasil nilai *flow* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut.



Gambar 5.12 Grafik Pengaruh debu granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Flow*

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.12, terlihat bahwa substitusi *filler* debu granit menyebabkan nilai *flow* pada awalnya terjadi penurunan hingga mencapai titik terendah pada kadar substitusi 50%, sebelum akhirnya kembali meningkat pada kadar yang lebih tinggi. Tren ini menunjukkan adanya perubahan fundamental pada karakteristik campuran.

Penurunan nilai *flow* pada rentang awal (0% hingga 50%) berbanding terbalik dengan tren nilai Stabilitas yang justru mencapai puncaknya pada kadar yang sama. Kombinasi dari Stabilitas yang tinggi dan *flow* yang rendah menghasilkan nilai *MQ* yang paling tinggi pada substitusi 50%. Hal ini secara definitif menunjukkan bahwa campuran mencapai tingkat kekakuan dan ketahanan terhadap deformasi plastis yang paling optimal pada titik ini. Efisiensi pemadatan yang lebih baik, yang terlihat dari nilai *VMA* dan *VITM* yang terus menurun, berkontribusi pada pembentukan struktur agregat yang sangat padat dan kaku, sehingga menahan pergerakan dan menghasilkan *flow* yang rendah.

Setelah melewati kadar optimum 50%, kenaikan kembali nilai *flow* terjadi bersamaan dengan penurunan nilai Stabilitas. Hubungan terbalik ini menandakan adanya pelemahan pada struktur internal campuran. Pada kadar jenuh, kelebihan partikel *filler* diduga mulai mengganggu matriks agregat, menyebabkan campuran kehilangan sebagian kekuatannya meskipun secara teknis terus memadat. Pelemahan struktur ini terkonfirmasi oleh penurunan nilai *MQ* secara progresif pada kadar 75% dan 100%. Ini menunjukkan bahwa campuran telah kehilangan kekakuan idealnya dan menjadi lebih rentan terhadap deformasi plastis, yang tercermin dari nilai *flow* yang kembali meningkat.

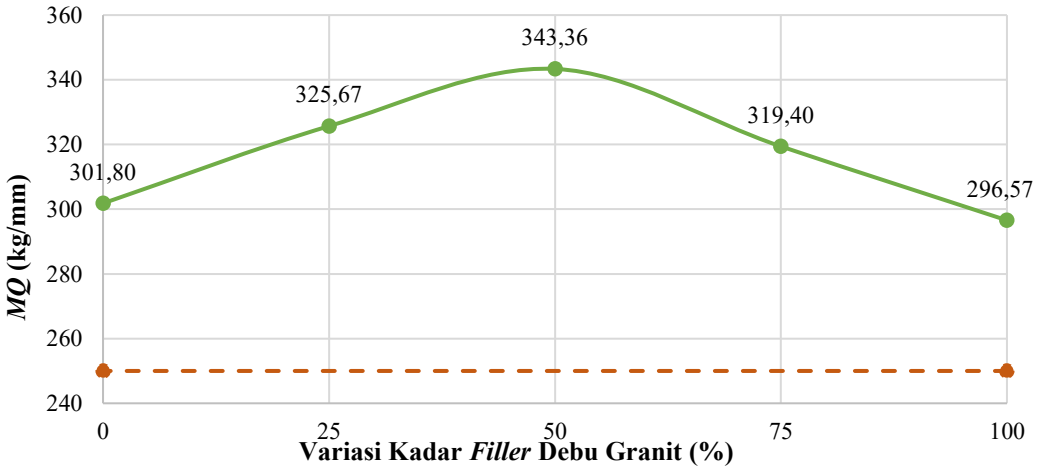
Nilai signifikansi analisis *ANOVA* sebesar 0,472 pada tingkat signifikansi 0,05 menunjukkan bahwa hasil tersebut tidak signifikan (0,472 > 0,05), yang menyimpulkan bahwa penggunaan *filler* debu granit tidak berpengaruh terhadap nilai *flow*. Dengan demikian, penggunaan *filler* debu granit dalam campuran *SMA* 25 mm tidak mempengaruhi nilai *flow* campuran.

Hasil ini sejalan dengan penelitian Hidayat dan Kushari (2019), Dalam penelitian tersebut, diamati bahwa nilai *flow* pada awalnya sempat menurun sebelum akhirnya menunjukkan tren kenaikan yang konsisten. Secara keseluruhan, penambahan kadar *filler* abu ampas tebu (AAT) membuat nilai *flow* cenderung semakin tinggi. Kondisi ini diduga terjadi karena AAT membuat campuran menjadi lebih fleksibel dan tidak sekaku campuran aspal pada umumnya, yang berdampak pada menurunnya kemampuan menahan beban.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* untuk campuran *SMA* berkisar antara 2,0 mm hingga 4,5 mm, sehingga nilai *flow* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

3. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Marshall Quotient (MQ)*

Grafik hasil nilai *MQ* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5.13 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *MQ*

Grafik pada Gambar 5.13 menunjukkan bahwa nilai *MQ* mencapai puncaknya pada kadar *filler* debu granit 50%. Peningkatan nilai *MQ* hingga titik optimum ini menandakan bahwa campuran mencapai tingkat kekakuan

dan ketahanan terhadap deformasi yang maksimal. Pada kadar ini, debu granit secara efektif mengisi rongga antar agregat, yang secara langsung berkontribusi pada peningkatan nilai stabilitas. Sebaliknya, penurunan nilai *MQ* setelah melewati kadar 50% mengindikasikan bahwa penambahan *filler* yang berlebihan mulai mengurangi kekakuan campuran, membuatnya lebih rentan terhadap deformasi plastis.

Pada kadar yang lebih tinggi yakni 75% dan 100%, penambahan *filler* debu granit secara berlebihan justru mulai memberikan dampak negatif pada kekakuan campuran, yang terlihat dari menurunnya nilai *MQ*. Hal ini terjadi karena proporsi *filler* terhadap aspal menjadi tidak seimbang. Kuantitas *filler* yang jenuh menyebabkan partikel-partikel agregat tidak lagi terikat secara optimal, melainkan mulai terpisahkan oleh massa *filler* yang berlebih. Akibatnya, kekuatan ikatan internal campuran menurun, yang secara langsung mengurangi nilai stabilitas dan kekakuan keseluruhan.

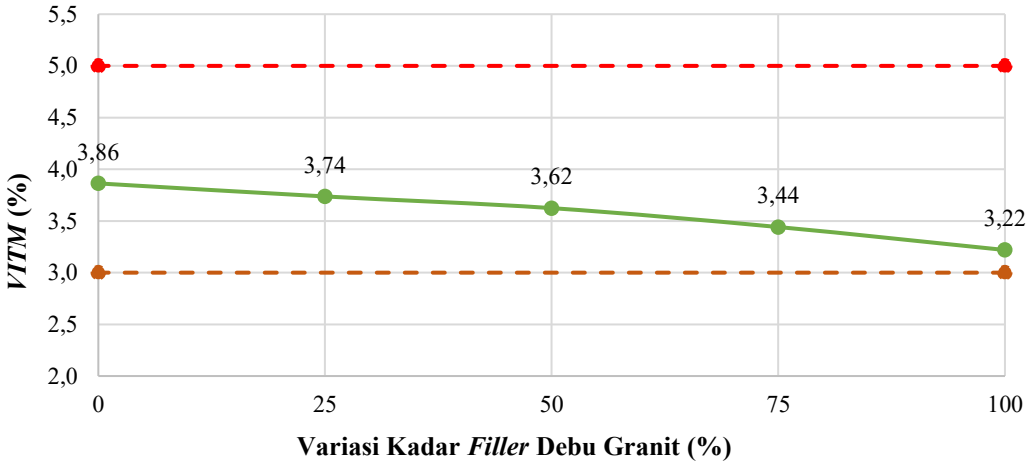
Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,03 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh 0,03 lebih kecil dari 0,05 (signifikan), maka dapat disimpulkan bahwa penggantian *filler* debu granit berpengaruh terhadap nilai *MQ*. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit pada campuran *SMA* 25 mm mempengaruhi nilai *MQ* campuran tersebut.

Temuan serupa juga dikemukakan oleh Hidayati dan Fauziah (2018), yang melaporkan bahwa nilai *MQ* mencapai puncaknya pada kadar *filler* 50% dan kemudian menurun. Penelitianya mengemukakan bahwa penurunan tersebut disebabkan oleh melemahnya struktur ikatan agregat saat kadar *filler* menjadi berlebihan. Nilai *MQ* maksimum yang selaras dengan puncak stabilitas pada kadar 50% menegaskan bahwa pada titik inilah campuran memiliki ketahanan terbaik terhadap deformasi permanen.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *MQ* yang dibutuhkan adalah > 250 kg/mm, sehingga nilai *MQ* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

4. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Void in Total Mix* (*VITM*)

Grafik hasil nilai *VITM* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut.



Gambar 5.14 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VITM*

Berdasarkan hasil pengujian yang terlihat pada Gambar 5.14, substitusi *filler* debu granit menyebabkan penurunan nilai *VITM* seiring dengan meningkatnya kadar variasi substitusi *filler* debu granit. Hal ini disebabkan oleh partikel debu granit yang sangat halus dan bersudut (*angular*) mampu mengisi rongga-rongga di antara agregat halus secara lebih efektif dibandingkan *filler* konvensional. Akibatnya menghasilkan struktur kerangka agregat yang lebih rapat dan solid. Akibatnya, setelah melalui proses pemadatan, rongga udara sisa yang terperangkap dalam campuran menjadi lebih sedikit, yang tercermin dari nilai *VITM* yang terus menurun. Kepadatan yang lebih tinggi ini berkorelasi positif dengan peningkatan kekuatan campuran hingga mencapai titik optimumnya.

Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,798 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh (0,798) lebih besar dari 0,05 (tidak signifikan), dapat disimpulkan bahwa penggunaan *filler* debu granit tidak berpengaruh terhadap nilai *VITM*. Ini

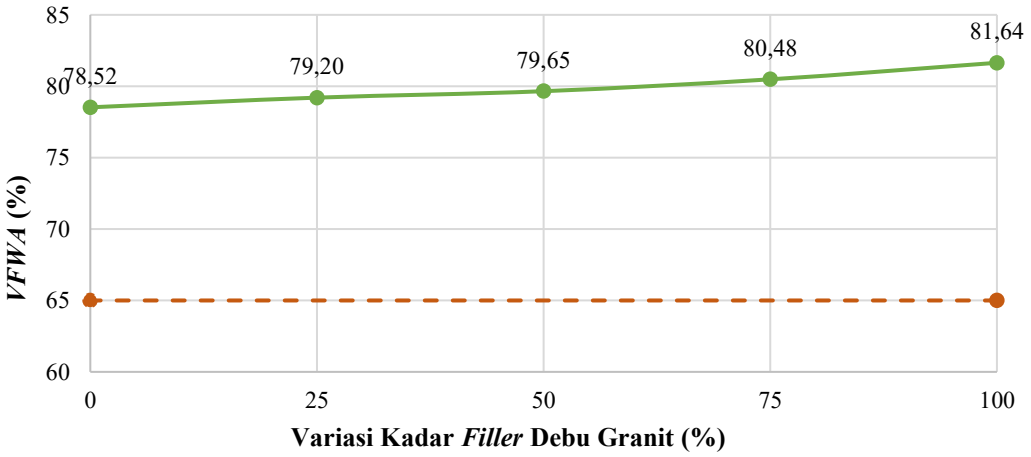
menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit dalam campuran *SMA* 25 mm tidak mempengaruhi nilai *VITM* campuran tersebut.

Penelitian oleh Hidayat dan Kushari (2019) juga menemukan fenomena serupa terkait penurunan nilai *VITM*. Mereka menjelaskan bahwa semakin banyaknya rongga yang terisi oleh partikel *filler* AAT, ditambah dengan bertambahnya volume aspal dalam campuran, secara kolektif mengurangi ruang udara sisa setelah proses pemadatan. Kombinasi kedua faktor ini menghasilkan sebuah struktur campuran yang lebih padat.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VITM* untuk campuran *SMA* harus berada dalam kisaran 3% hingga 5%. Oleh karena itu, nilai *VITM* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

5. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Void Filled with Asphalt (VFWA)*

Grafik hasil nilai *VFWA* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5.15 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VFWA*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.15, substitusi *filler* debu granit menyebabkan peningkatan nilai *VFWA* seiring dengan meningkatnya kadar variasi substitusi *filler* debu granit. Hal ini

disebabkan oleh penyerapan aspal yang berlebihan oleh *filler* debu granit. Peningkatan *VFWA* yang diiringi penurunan *VMA* dan *VITM* adalah indikator yang sangat baik. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit menghasilkan campuran yang lebih padat, lebih kedap air, dan lebih durabel, karena rongga-rongganya terisi oleh aspal secara sangat efektif. Akibatnya, campuran menjadi lebih lunak dan kaya akan aspal, yang berdampak pada penurunan stabilitas dan meningkatkan kerentanannya terhadap deformasi plastis.

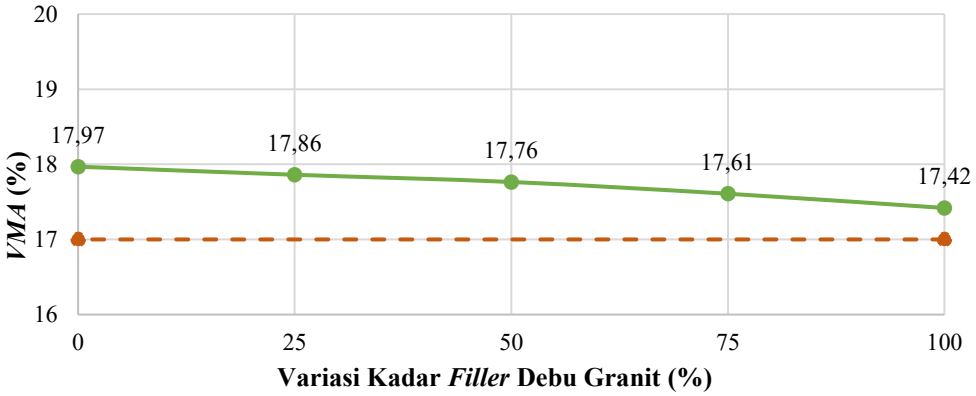
Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,789 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh (0,789) lebih besar dari 0,05 (tidak signifikan), maka dapat disimpulkan bahwa penggunaan *filler* debu granit tidak berpengaruh terhadap nilai *VFWA*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit dalam campuran *SMA* 25 mm tidak mempengaruhi nilai *VFWA* campuran tersebut.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Ardi dan Chasanah (2020), yang juga menemukan adanya tren kenaikan nilai *VFWA* seiring bertambahnya kadar *filler* gamping. Menurut mereka, peningkatan ini terjadi karena partikel *filler* secara efisien mengisi rongga antar agregat, yang pada akhirnya menghasilkan campuran yang lebih padat dan kedap air.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VFWA* yang dibutuhkan adalah > 65%, sehingga nilai *VFWA* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

6. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Void Mineral Aggregate (VMA)*

Grafik hasil nilai *VMA* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.16.



Gambar 5.16 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VMA*

Berdasarkan Gambar 5.16 berikut menunjukkan adanya penurunan nilai *VMA* seiring dengan peningkatan kadar *filler* debu granit. Fenomena ini terjadi karena partikel *filler* yang halus secara efektif mengisi rongga-rongga di antara butiran agregat, sehingga menciptakan susunan butir yang lebih padat. Struktur yang lebih rapat ini secara langsung mengurangi total volume rongga yang tersedia untuk diisi oleh aspal dan udara, yang kemudian tercermin dari menurunnya nilai *VITM* dan naiknya nilai *VFWA*. Meskipun kepadatan meningkat, penurunan *VMA* ini perlu dicermati karena dapat mengurangi ruang yang tersedia untuk selimut aspal, yang berpotensi menurunkan durabilitas campuran.

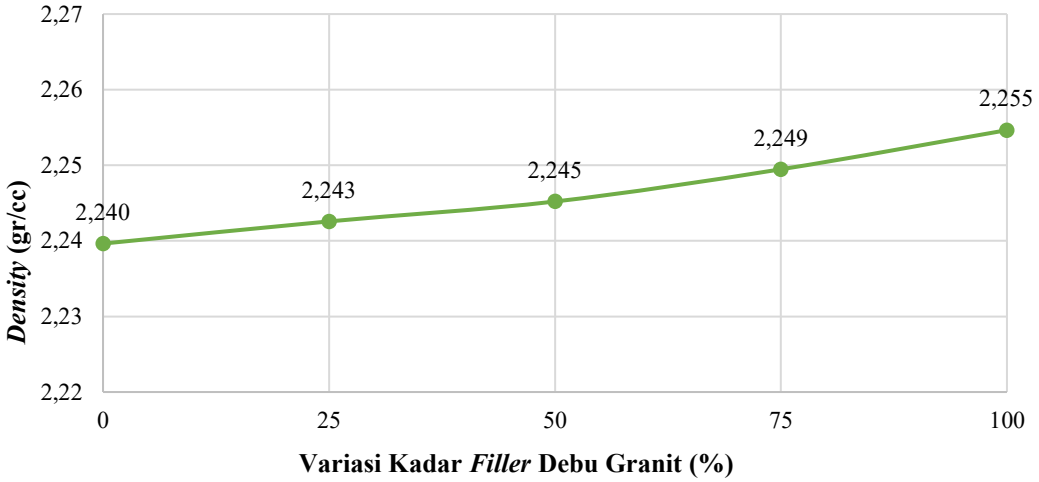
Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,801 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh lebih besar dari 0,05 (0,801 > 0,05), dapat disimpulkan bahwa penggantian *filler* debu granit tidak mempengaruhi nilai *VMA*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit dalam campuran *SMA* 25 mm tidak berdampak pada nilai *VMA* campuran.

Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hidayat dan Kushari (2019). Mereka juga mengamati adanya tren penurunan nilai *VMA* seiring dengan penambahan kadar *filler* AAT. Menurut mereka, fenomena ini terjadi karena partikel *filler* secara efektif mengisi rongga-rongga di antara butiran agregat, sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VMA* yang disyaratkan adalah lebih dari 17%. Oleh karena itu, nilai *VMA* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* debu granit masih memenuhi standar yang ditetapkan.

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

   Grafik hasil nilai *density* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.17 berikut.



Gambar 5.17 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Density*

Hasil pengujian pada Gambar 5.17 menunjukkan bahwa nilai kepadatan (*density*) campuran mengalami peningkatan seiring bertambahnya persentase *filler* debu granit. Peningkatan ini merupakan hasil langsung dari efisiensi partikel debu granit dalam mengisi rongga-rongga mikro antar agregat. Proses *particle packing* yang lebih baik ini menyebabkan berkurangnya rongga udara sisa (*VITM*) dan meningkatnya persentase rongga yang terisi aspal (*VFWA*), sehingga menghasilkan massa per volume yang lebih tinggi. Meskipun demikian, peningkatan kepadatan ini tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan. Setelah melewati titik optimum, struktur internal campuran yang terlalu padat oleh *filler* justru dapat melemahkan ikatan agregat, yang pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan stabilitas.

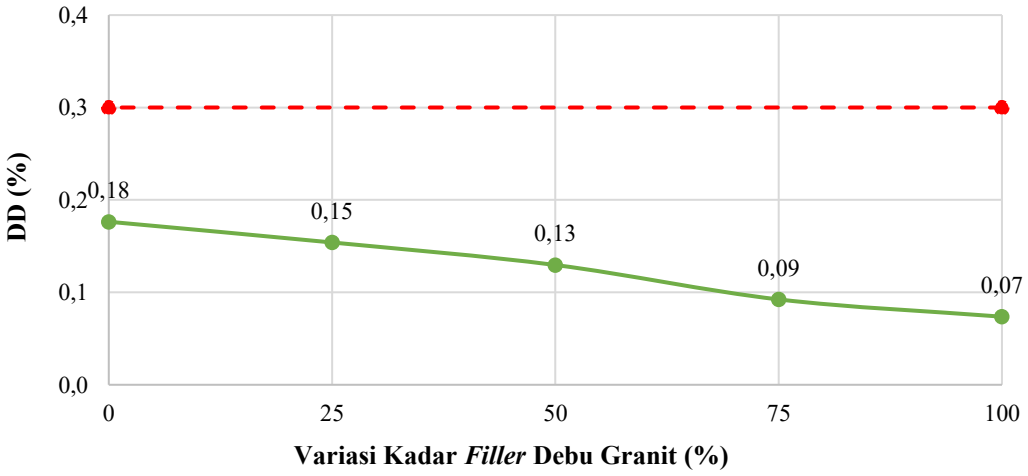
Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,802 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh lebih besar dari

0,05 (0,802 > 0,05), dapat disimpulkan bahwa penggunaan *filler* debu granit tidak berpengaruh terhadap nilai kepadatan (*density*). Dengan demikian, penggunaan *filler* debu granit dalam campuran *SMA* 25 mm tidak mempengaruhi nilai kepadatan campuran.

Penelitian ini sejalan dengan temuan Dayanti, dkk (2024), yang menunjukkan bahwa nilai kepadatan juga menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya proporsi *filler* abu kapur. Mereka menjelaskan bahwa fenomena ini terjadi karena partikel *filler* secara efektif mengisi ruang-ruang kosong, baik rongga di antara agregat maupun rongga udara sisa, sehingga menghasilkan struktur campuran yang lebih padat secara keseluruhan.

5.2.7 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *DD*

DD merupakan kondisi dimana terjadi pemisahan antara aspal dan agregat, sehingga aspal mengalir keluar dari campuran. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui jumlah pengaliran aspal yang terjadi saat suhu pencampuran pada campuran yang belum dipadatkan. Hasil pengujian ini kemudian dibandingkan dengan batas spesifikasi yang telah ditentukan. Pengaruh dari substitusi *filler* debu granit terhadap nilai *DD* disajikan pada Gambar 5.18.



Gambar 5.18 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *DD*

Hasil pengujian pada Gambar 5.18 menunjukkan bahwa penambahan *filler* debu granit secara progresif dapat mengurangi nilai *DD*. Ini menandakan bahwa *filler* debu granit berhasil meningkatkan kohesi dan kestabilan campuran, sehingga lebih efektif dalam menahan aspal agar tidak terpisah. Hal ini disebabkan oleh kemampuan menyerap aspal yang lebih baik yang menciptakan ikatan adhesi yang kuat dengan aspal. Ikatan ini membuat campuran lebih stabil dan tidak mudah mengalir, bahkan ketika rongga-rongga dalam campuran semakin terisi oleh *filler*.

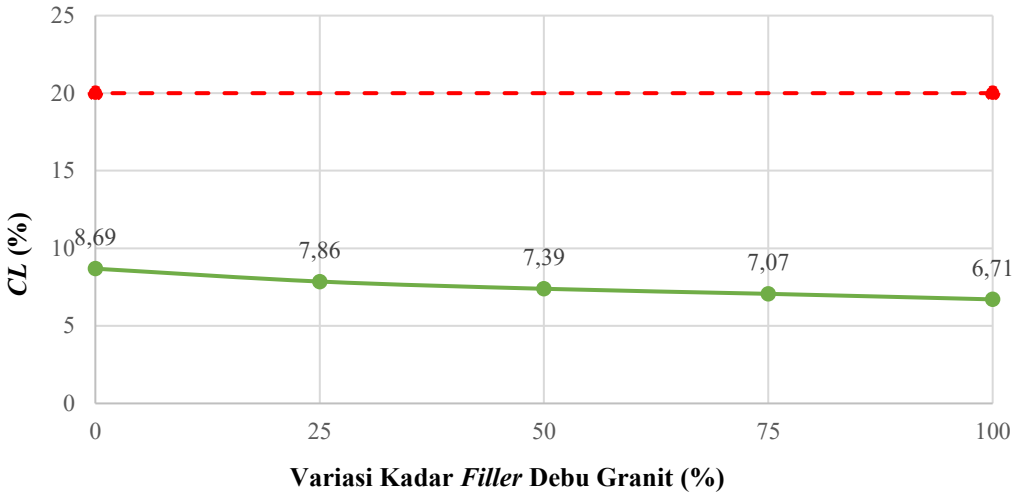
Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,277 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh lebih besar dari 0,05 (0,277 < 0,05), dapat disimpulkan bahwa penggunaan *filler* debu granit tidak berpengaruh terhadap nilai *DD*. Hal ini menunjukkan bahwa campuran *SMA* 25 mm dengan penggunaan *filler* debu granit tidak memengaruhi nilai *DD* campuran.

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian yang dipublikasikan oleh Syammaun, dkk (2020). Dalam studi mereka, penggunaan *filler* dari tempurung kelapa juga terbukti efektif dalam menurunkan nilai *DD*, yang menunjukkan bahwa penambahan *filler* tersebut mampu meningkatkan ketahanan campuran terhadap pemisahan aspal.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *DD* yang disyaratkan adalah kurang dari 0,3%. Oleh karena itu, nilai *DD* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

5.2.8 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *CL*

Nilai *CL* menggambarkan kemampuan bahan uji dalam menghadapi keausan yang diuji menggunakan mesin *Los Angeles*. Pada pengujian ini, sampel dimasukkan ke dalam mesin *Los Angeles* untuk mengukur tingkat kerusakan akibat gesekan. *CL* memberikan gambaran mengenai sejauh mana lapisan aspal dapat bertahan dari tekanan yang ditimbulkan oleh pergerakan roda kendaraan pada permukaan jalan. Grafik yang menunjukkan pengaruh substitusi *filler* debu granit terhadap nilai *CL* dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.



Gambar 5.19 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *CL*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditampilkan pada Gambar 5.19, dapat dilihat bahwa hasil pengujian menunjukkan bahwa substitusi dengan *filler* debu granit secara efektif meningkatkan durabilitas campuran, yang tercermin dari penurunan nilai *CL*. Nilai *CL* mengalami penurunan seiring kadar substitusi *filler* bertambah. Peningkatan kinerja ini diartikan pada karakteristik fisik dan kimia dari debu granit yang mampu memperkuat ikatan antar partikel, membuat campuran menjadi lebih kohesif dan lebih tahan terhadap benturan.

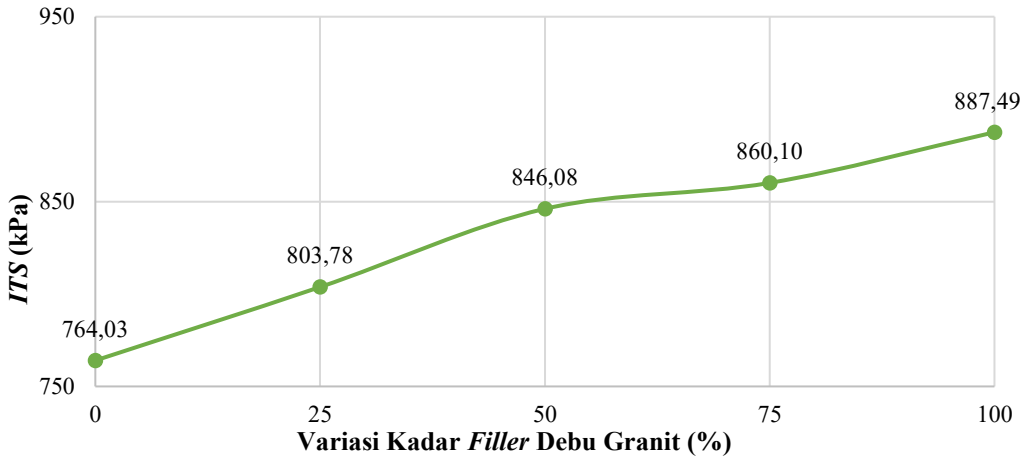
Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,001 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh (0,001) lebih kecil dari 0,05 (signifikan), dapat disimpulkan bahwa *filler* pengganti debu granit mempengaruhi nilai *CL*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit pada campuran *SMA* 25 mm dapat mempengaruhi nilai *CL* campuran tersebut.

Hasil penelitian ini, di mana campuran menjadi lebih tahan terhadap disintegrasi, sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Yuniarti (2019). Mereka juga mencatat bahwa substitusi dengan *filler* limbah kaca hingga kadar 75% berkontribusi pada penurunan nilai *CL*. Penurunan ini menandakan adanya perbaikan pada ketahanan internal campuran, membuatnya tidak mudah kehilangan butiran agregat.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *CL* yang disyaratkan adalah <20%. Dengan demikian, nilai *CL* pada campuran *SMA* dengan variasi campuran *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

5.2.9 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *ITS*

ITS pada aspal merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur kekuatan tarik tidak langsung dari campuran aspal. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana campuran aspal dapat menahan gaya tarik yang diterapkan secara horizontal. Pada pengujian *ITS*, sampel aspal berbentuk silinder diletakkan pada mesin uji, kemudian diberikan beban secara vertikal hingga terjadi keretakan pada sampel tersebut. Grafik yang menunjukkan hasil nilai *ITS* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.20 berikut.



Gambar 5.20 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *ITS*

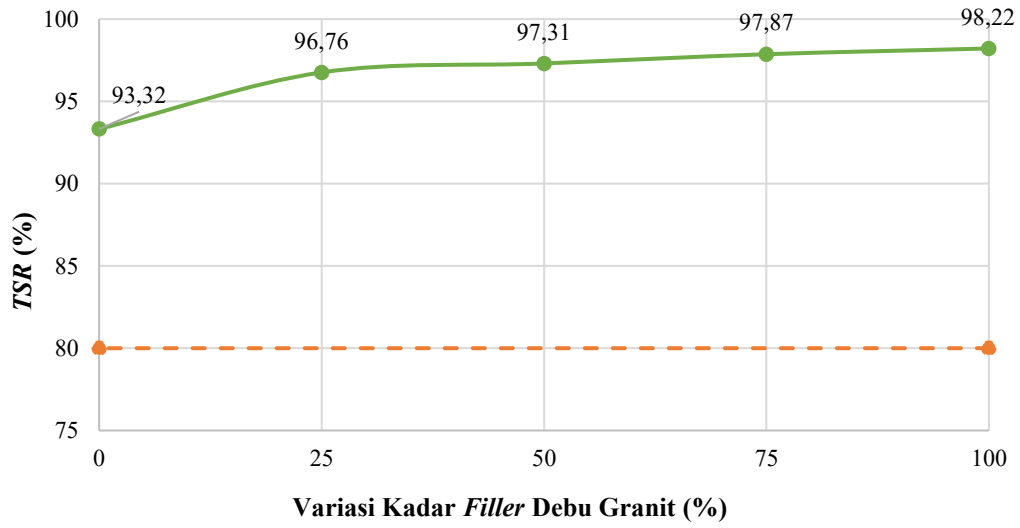
Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.20, menunjukkan adanya peningkatan nilai *ITS* seiring dengan penambahan *filler* debu granit. Tren positif ini berkorelasi terbalik dengan hasil uji *CL*, di mana peningkatan *ITS* diiringi oleh peningkatan ketahanan terhadap disintegrasi. Hal ini mengindikasikan bahwa debu granit secara signifikan memperbaiki ikatan internal campuran. Partikel *filler* ini diyakini mampu meningkatkan gaya kohesi dalam matriks aspal, sehingga agregat terikat satu sama lain dengan lebih kuat dan menghasilkan campuran dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi.

Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,046 pada tingkat signifikansi 0,05. Dengan nilai signifikansi yang diperoleh (0,046) lebih kecil dari 0,05 (signifikan), dapat disimpulkan bahwa *filler* pengganti debu granit berpengaruh terhadap nilai *ITS*. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit pada campuran *SMA* 25 mm mempengaruhi nilai *ITS* dari campuran tersebut.

Temuan ini didukung oleh beberapa penelitian sebelumnya. Yuniarti (2019), misalnya, melaporkan bahwa penggunaan *filler* limbah kaca mampu meningkatkan nilai *ITS* hingga titik optimum pada kadar 75%. Peningkatan kekuatan tarik ini juga diiringi oleh perbaikan pada ketahanan disintegrasi, yang tecermin dari menurunnya nilai *CL*.

5.2.10 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *TSR*

TSR adalah parameter yang digunakan untuk mengukur ketahanan campuran aspal terhadap kelembaban atau pengaruh air. *TSR* menunjukkan sejauh mana air mempengaruhi kekuatan tarik campuran aspal dengan membandingkan kekuatan tarik sampel aspal dalam kondisi kering dan basah. Pengujian ini dilakukan dengan cara merendam sampel selama 24 jam dalam *waterbath* pada suhu 60ºC, kemudian membandingkan hasilnya dengan bahan uji yang tidak direndam. Grafik yang menunjukkan hasil nilai *TSR* akibat pengaruh substitusi *filler* debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.21 berikut.



Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *TSR*

Hasil pengujian pada Gambar 5.21 menunjukkan peningkatan nilai *TSR* yang membuktikan bahwa substitusi dengan *filler* debu granit secara progresif meningkatkan ketahanan campuran terhadap air. Partikel debu granit berperan dalam memperkuat campuran aspal, menciptakan ikatan yang lebih solid antar agregat dan mengurangi potensi kerusakan akibat penetrasi air. Struktur yang lebih stabil ini tidak hanya meningkatkan durabilitas, tetapi juga mengindikasikan kemampuan yang lebih baik dalam mendistribusikan tegangan dari beban lalu lintas, sehingga mengurangi risiko deformasi.

Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,377 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh (0,377) lebih besar dari 0,05 (tidak signifikan), dapat disimpulkan bahwa *filler* pengganti debu granit tidak mempengaruhi nilai *TSR*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit pada campuran *SMA* 25 mm tidak berpengaruh terhadap nilai *TSR* campuran.

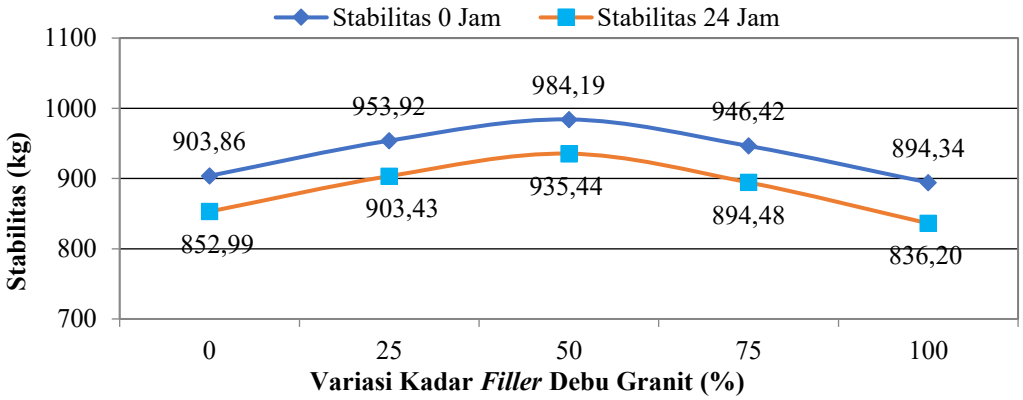
Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian yang dipublikasikan oleh Fauziah, dkk (2012). Dalam studi mereka, *fly ash* yang berfungsi sebagai pengisi rongga terbukti mampu meningkatkan viskositas dan sifat kohesif dari campuran aspal. Peningkatan ini memberikan dampak signifikan pada kemampuan campuran

untuk mempertahankan stabilitasnya saat terpapar air, sehingga durabilitas dan ketahanannya terhadap air menjadi lebih baik.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *TSR* yang disyaratkan adalah >80%. Dengan demikian, nilai *TSR* pada campuran *SMA* dengan variasi campuran *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

5.2.11 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *IRS*

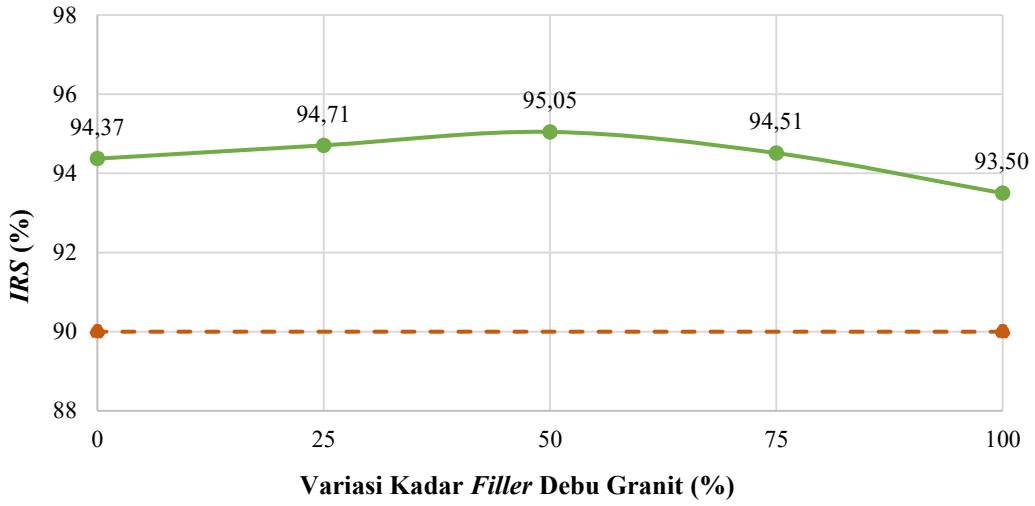
IRS adalah parameter yang digunakan untuk mengukur kekuatan campuran aspal dalam menahan beban setelah mengalami siklus kelembapan atau perendaman dalam air. *IRS* sering kali dikaitkan dengan kemampuan campuran aspal untuk mempertahankan kekuatan tariknya setelah terpapar air atau kelembapan, sehingga parameter ini sangat berguna untuk mengukur daya tahan aspal terhadap kerusakan akibat air dengan membandingkan kekuatan tekan benda uji yang direndam dengan perendaman 0,5 jam terhadap 24 jam pada suhu 60°C. Nilai stabilitas rendaman 0,5 jam dan rendaman 24 jam dapat dilihat pada Gambar 5.22 berikut.



Gambar 5.22 Grafik Hubungan antara Rendaman dan Stabilitas

Berdasarkan Gambar 5.22, dapat dilihat bahwa stabilitas pada sampel yang direndam selama 24 jam lebih rendah dibandingkan dengan sampel yang direndam selama 0,5 jam. Perubahan suhu yang tinggi menyebabkan campuran aspal menjadi lebih lunak, yang akhirnya menurunkan nilai stabilitasnya. Selain itu, penurunan stabilitas juga dipengaruhi oleh masuknya air ke dalam rongga campuran pada suhu tinggi, yang melemahkan ikatan antara aspal dan agregat (adhesi). Grafik yang

menunjukkan nilai *IRS* akibat pengaruh variasi substitusi debu granit dapat dilihat pada Gambar 5.23 berikut.



Gambar 5.23 Grafik Pengaruh Debu Granit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *IRS*

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.23, terlihat bahwa substitusi *filler* debu granit menyebabkan peningkatan nilai *IRS* hingga mencapai kadar variasi substitusi 50%, kemudian mengalami penurunan pada kadar 75% hingga 100%. Peningkatan nilai *IRS* dari 0% hingga 50% pada campuran *SMA* dengan *filler* debu granit menunjukkan bahwa pada kadar tersebut, *filler* ini memberikan kontribusi positif terhadap kekuatan campuran. Pada kadar yang lebih rendah, debu granit berperan dalam memperbaiki ikatan antara aspal dan agregat, serta mengurangi porositas dalam campuran, yang pada akhirnya meningkatkan daya tahan campuran terhadap kelembapan.

Namun, ketika kadar *filler* debu granit meningkat hingga 75% hingga 100%, nilai *IRS* mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh berlebihnya jumlah *filler* yang mengurangi efisiensi aspal dalam melapisi agregat dan mengisi rongga dalam campuran. Pada kadar yang terlalu tinggi, *filler* menyerap lebih banyak aspal, sehingga mengurangi jumlah aspal yang efektif untuk membentuk ikatan adhesi yang kuat. Akibatnya, campuran menjadi lebih rapuh dan kurang tahan terhadap kelembapan, yang menyebabkan penurunan nilai *IRS*.

Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,991 pada tingkat signifikansi 0,05. Karena nilai signifikansi yang diperoleh (0,991) lebih besar dari 0,05 (tidak signifikan), dapat disimpulkan bahwa *filler* pengganti debu granit tidak berpengaruh terhadap nilai *IRS*. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *filler* debu granit pada campuran *SMA* 25 mm tidak mempengaruhi nilai *IRS* campuran tersebut.

Penurunan nilai *IRS* ini menunjukkan bahwa meskipun debu granit dapat meningkatkan kekuatan campuran pada kadar tertentu, penggunaan yang berlebihan justru merugikan karena menyebabkan campuran lebih rentan terhadap kerusakan akibat air.

Hasil penelitian ini, di mana nilai *IRS* meningkat, menunjukkan hasil yang serupa dengan temuan-temuan sebelumnya. Penelitian yang dilakukan Ismadani, dkk (2013) juga mencatat adanya kenaikan nilai *IRS* saat menggunakan *filler* ASP, yang mereka jelaskan sebagai akibat dari selimut aspal yang lebih tebal yang melindungi agregat. Demikian pula, Penelitian yang dilakukan Hidayat dan Kushari (2019) menemukan bahwa kandungan silika yang tinggi pada *filler* AAT berkontribusi pada peningkatan *IRS*, yang menandakan ikatan internal yang lebih kuat dan durabilitas yang lebih baik terhadap beban dan paparan air.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *IRS* yang disyaratkan adalah >90%. Dengan demikian, nilai *IRS* pada campuran *SMA* dengan variasi campuran *filler* debu granit masih memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

5.2.12 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *VCA*

Hasil analisis *VCA* memvalidasi efektivitas gradasi agregat yang digunakan. Diperoleh nilai rasio *VCAmix* terhadap *VCAdrc* sekitar 0,9, yang mana angka ini berada di bawah batas maksimum yang disyaratkan, yaitu 1,0. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa struktur kerangka agregat kasar pada campuran *SMA* 25 mm telah terbentuk dengan baik, di mana kontak antar batuan (*stone-on-stone contact*) telah tercapai.

5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Campuran *Filler* Debu Granit

Rekapitulasi hasil pengujian pada campuran dengan menggunakan *filler* debu granit dapat dilihat pada Tabel 5.16.

Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Debu Granit

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Debu Granit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	Stabilitas (kg)	903,86	935,92	984,19	946,42	894,34	Pada kadar substitusi *filler* Debu Granit 0 hingga 50%, nilai stabilitas campuran meningkat tidak signifikan. Setelah mencapai titik optimum, nilai stabilitas mulai mengalami penurunan tidak signifikan yakni pada kadar 75% hingga 100%. Sehingga campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap deformasi pada kadar filler 0% sampai 50 % dan kadar 75% dan 100% lebih mudah menerima deformasi.
	Flow (mm)	3,00	2,93	2,87	2,97	3,02	Semakin besar kadar substitusi *filler* Debu Granit, nilai *flow* mengalami peneurunan tidak signifikan hingga pada kadar 50%. Namun pada kadar 75% dan 100% nilai *flow* mengalami peningkatan tidak signifikan. Sehingga pada kadar 0% hingga 50% campuran menjadi kurang elastis saat terkena beban. Serta pada kadar 75% dan 100% campuran menjadi lebih elastis.
	MQ (kg/mm)	301,80	325,67	343,36	319,40	296,57	Semakin besar kadar substitusi *filler* Debu Granit, nilai *MQ* cenderung mengalami peningkatan tidak signifikan sampai titik maksimum pada kadar 50%. Pada titik optimum, nilai *MQ* menunjukkan fleksibilitas tinggi,

Lanjutan Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Debu Granit

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Debu Granit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	*MQ* (kg/mm)	301,80	325,67	343,36	319,40	296,57	sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap deformasi. Namun, setelah melewati titik optimum, fleksibilitas campuran mengalami penurunan tidak signifikan, yang menyebabkan campuran lebih mudah mengalami deformasi.
	ITS (kPa)	764,03	803,78	846,08	860,10	887,49	Semakin besar kadar substitusi *filler* Debu Granit, nilai *ITS* cenderung mengalami peningkatan. Sehingga campuran memiliki kemampuan menahan kuat tarik.
Volumetrik	*VITM* (%)	3,86	3,74	3,62	3,44	3,22	Nilai *VITM* menurun seiring dengan peningkatan kadar substitusi *filler* debu granit. Hal ini mengakibatkan campuran memiliki rongga udara yang kecil.
	VFWA (%)	78,52	79,20	79,65	80,48	81,64	Nilai *VFWA* meningkat seiring dengan peningkatan kadar substitusi *filler* debu granit. Penambahan kadar *filler* debu granit secara efektif dapat mengisi rongga-rongga dalam campuran sehingga campuran menjadi semakin padat dan kedap.
	VMA (%)	17,97	17,86	17,76	17,61	17,42	Nilai *VMA* menurun seiring dengan peningkatan kadar substitusi *filler* debu granit, sehingga menurunkan pula jarak antar agregat.

Lanjutan Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Debu Granit

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Debu Granit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumetrik	*VCA*	0,920	0,930	0,945	0,955	0,962	Nilai *VCA* meningkat seiring dengan peningkatan kadar substitusi *filler* debu granit. Sehingga campuran masih mampu menahan deformasi.
	Density (gr/cc)	2,240	2,243	2,245	2,249	2,255	Nilai *Density* meningkat seiring dengan peningkatan kadar substitusi *filler* debu granit. Sehingga campuran menjadi rapat.
Durabilitas	*IRS* (%)	93,37	94,71	95,05	94,51	93,50	Semakin besar kadar substitusi *filler* debu granit, nilai *IRS* cenderung mengalami peningkatan tidak signifikan. Hal ini terjadi karena campuran mampu mempertahankan ikatan yang kuat antara aspal dan agregat. Sehingga campuran tahan terhadap air, suhu, dan udara.
	DD (%)	0,18	0,15	0,13	0,09	0,07	Semakin besar kadar substitusi *filler* debu granit, nilai *DD* cenderung mengalami penurunan signifikan. Sehingga pemisahan aspal terhadap campuran semakin kecil dan campuran bersifat homogen

Lanjutan Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* Debu Granit

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Limbah Debu Granit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas	*CL* (%)	8,69	7,86	7,39	7,07	6,71	Semakin besar kadar substitusi *filler* debu granit, nilai *CL* cenderung mengalami penurunan. Sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap benturan yang diterima.
	TSR (%)	93,32	96,76	97,31	97,87	98,22	Semakin besar substitusi *filler* debu granit, nilai *TSR* cenderung mengalami peningkatan tidak signifikan. Dengan demikian, campuran yang dihasilkan memiliki kekuatan tarik yang baik dan tetap stabil walaupun telah melewati proses perendaman.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian dan analisis data, diperoleh beberapa kesimpulan terkait pengaruh substitusi *filler* debu granit pada kadar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap karakteristik campuran *SMA* 25 mm. Adapun poin-poin kesimpulan tersebut adalah sebagai berikut.

1. Penambahan limbah debu granit sebagai substitusi *filler* berpengaruh signifikan terhadap kekuatan struktur campuran *SMA*. Peningkatan kadar *filler* debu granit hingga 50% terbukti mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan campuran, yang ditandai dengan tercapainya nilai Stabilitas dan *MQ* tertinggi, serta nilai *Flow* terendah. Meskipun setelahnya Stabilitas menurun, *ITS* campuran secara konsisten terus meningkat hingga kadar substitusi 100%.
2. Substitusi dengan limbah debu granit secara konsisten memperbaiki karakteristik volumetrik campuran. Penambahan *filler* debu granit menyebabkan campuran menjadi lebih padat, yang dibuktikan dengan tren penurunan nilai *VITM* (rongga udara) dan *VMA* (rongga dalam agregat). Sebagai konsekuensinya, nilai *VFWA* (rongga terisi aspal) dan *Density* (kepadatan) terus mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar *filler*.
3. Substitusi *filler* debu granit memberikan dampak positif terhadap ketahanan (durabilitas) campuran. Nilai *CL* dan *DD* terus menurun seiring bertambahnya kadar debu granit, yang menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap abrasi dan stabilitas panas. Ketahanan terhadap kerusakan akibat air juga membaik, di mana nilai *TSR* terus meningkat. Nilai *IRS* mencapai puncaknya pada kadar 50%, menandakan pada kadar inilah campuran memiliki ketahanan paling optimal terhadap perendaman.

6.2 Saran

Berdasarkan temuan yang diperoleh dari penelitian mengenai pemanfaatan limbah debu granit sebagai *filler* substitusi ini, terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan lebih lanjut. Oleh karena itu, penulis merumuskan beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi acuan bagi penelitian sejenis di masa mendatang. Adapun saran-saran tersebut diuraikan sebagai berikut.

1. Mengingat penelitian ini tidak mencakup analisis sifat kimia secara mendalam, maka disarankan untuk melakukan pengujian lebih lanjut untuk mengetahui pengaruhnya terhadap campuran aspal.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan menerapkan kadar optimum 50% *filler* debu granit pada jenis campuran aspal yang berbeda. Misalnya pada campuran *Asphalt Concrete-Wearing Course* (*AC-WC*) atau gradasi *SMA* lainnya, untuk menguji apakah peningkatan karakteristik yang diperoleh bersifat universal dan dapat diterapkan secara lebih luas pada perkerasan lentur.
3. Penggunaan limbah debu granit sebagai *filler* pengganti pada campuran *SMA* 25 mm direkomendasikan pada *kadar* substitusi 50**%**. Pada kadar tersebut, campuran menunjukkan keseimbangan kinerja yang paling optimal, ditandai dengan tercapainya nilai puncak pada parameter kekuatan struktur (Stabilitas dan *MQ*) dan ketahanan terhadap air (*IRS*).
4. Perlu dilakukan analisis biaya-manfaat secara rinci. Analisis ini bisa membandingkan total biaya produksi campuran *SMA* menggunakan *filler* debu granit (termasuk biaya transportasi limbah) dengan campuran yang menggunakan *filler* konvensional. Analisis ini akan memberikan justifikasi ekonomi yang kuat untuk penerapan material ini di industri konstruksi jalan.

DAFTAR PUSTAKA

Abdillah, A. F., Pradani, N., dan Batti, J. F. 2018. Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Viatop66 pada Campuran Stone Matrix Asphalt Terhadap Titik Lembek Aspal dan Sifat Draindown Campuran. *Jurnal HPJI (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*. Vol.4 No.1: 49-58.

Agustian, K., Agusmaniza, R., dan Syaifuddin, S. 2021. Evaluasi Karakteristik Campuran AC-BC menggunakan Abu Cangkang Kemiri sebagai Bahan Substitusi Filler terhadap Parameter Marshall. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*. Vol.13 No.2: 86-93.

Aini, S. N., and Hastuti, E. W. D. 2022. Tectonic Evolution of Granitoid Rock Granite Garba Based on Major Element in Tanjung Beringin, Muaradua, South OKU, South Sumatra. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*. Vol.3 No.1: 1-5.

Ardi, B. N., dan Chasanah, F. 2020. Pengaruh Penggunaan Serbuk Batu Gamping Sebagai Substitusi Filler Terhadap Karakteristik Campuran Bergradasi Superpave dengan Bahan Ikat Starbit E-55.

Bato'tanete, F. B., and Rachman, R. 2021. Characteristics of the Stone Matrix Asphalt Coarse using the Tabu River Stone North Toraja Regency. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. *IOP Publishing*. Vol.1088 No.1.

Chasanah, F., dan Sukmo, T. A. 2023. Pengaruh Bubuk Talk Sebagai Bahan Filler Pengganti Pada Campuran Ac-Wc: Indonesia. *AJIE (Asian Journal of Innovation and Entrepreneurship)*. Vol.7 No.03: 82-90.

de Medeiros, W. R. P., Neto, O. D. M. M., Luz, P. M. S. G., de Oliveira, R. K. F., and Guedes, L. R. 2023. Utilizing marble and granite industry waste in asphalt mixtures for enhanced road performance and sustainability. *Journal of Engineering Research.* Vol.12 No.4: 670-679.

Erikasari, Y. 2020. Pengaruh perubahan viskositas aspal akibat penambahan Viatop66 terhadap nilai tegangan tarik (tensile strength) campuran HRS-WC menggunakan uji semi circular bending (SCB). *Jurnal Sains dan Teknologi Tadulako*. Vol.6 No.1: 48-62.

Fasdarsyah, F., dan Mukhlis, M. 2014. Pengaruh Penambahan Filler Granit Dan Keramik Pada Campuran Laston Ac-Wc Terhadap Karakteristik Uji Marshall. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*. Vol.4 No.1.

Fauziah, S., dan Syaifurrohman, M. Denny. 2012. Studi Eksperimental Penggunaan Fly Ash Sebagai Additive Terhadap Kinerja Beton Aspal Sebagai Upaya Pemanfaatan Material Limbah. *Jurnal Rekayasa Sipil*. Vol.2 No.1.

Firmansyah, D. 2018. Pengaruh Penambahan Limbah Ban Karet Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Ac-Wc Dengan Filler Gypsum *(*The Effect Of Addition Of Waste Tire Rubber As Additive On Ac-Wc Concrete With Gypsum Filler*)*. *Tugas Akhir*. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Hadi, P. L., Wasanta, T., dan Santosa, W. 2021. Pengaruh Indeks Infrastruktur Jalan Terhadap Indikator Ekonomi Di Indonesia. *Jurnal HPJI (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*. Vol.7 No.2: 143-152.

Hermansyah, H., Isnan, A. F., dan Yanti, F. 2022. Karakteristik Marshall pada Campuran Aspal HRS-WC Menggunakan Abu Sekam Padi. *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*. Vol.5 No.1: 60-73.

Hidayat, R. dan Kushari, B. 2019. Analisis Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt Dengan Debu Ampas Tebu Sebagai Filler Pengganti. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Hidayati, E. T. dan Fauziah, M. 2018. Pengaruh abu sekam padi sebagai filler pengganti terhadap karakteristik campuran Stone Matrix Asphalt (SMA). *Tugas Akhir.* Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Ibedu, K. E., and Murana, A. A. 2024. Effect of Blended Granite Dust and Pulverized Burnt Brick as Mineral Filler in Hot Mix Asphalt. *Nigerian Journal of Engineering*. Vol.31 No.2: 55.

Ismadarni, I., Risman, R., dan Kasan, M. 2013. Karakteritik Beton Aspal Lapis Pengikat *(*AC-BC*)* Yang Menggunakan Bahan Pengisi (Filler) Abu Sekam Padi. *MEKTEK*. Vol.15 No.2.

Kurniasari, F. D., Saleh, S. M., dan Sugiarto, S. 2018. Pengaruh Filler Abu Ampas Tebu (AAT) Dengan Bahan Pengikat Aspal Pen 60/70 Pada Campuran Laston AC-WC. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil dan Perencanaan*. Vol.1 No.4: 69-78.

Metekohy, J. G., Amaheka, S. G., dan Latupeirissa, H. B. 2022. Pengaruh Serat Selulosa terhadap Nilai Stabilitas Marshall pada Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA). *DINTEK*. Vol.15 No.1: 48-52.

Oesman, M., Sundara, A., Endawati, J., and Virnawan, D. 2021. Deformation and dynamic stability of asphalt concrete by using granite dust as filler. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. *IOP Publishing*. Vol.1108 No.1: 012004.

Pratama, F. Y., dan Hadi, M. A. 2024. Pemanfaatan Limbah Abu Arang Kayu Mindi sebagai Filler Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA). *Agregat*. Vol.9 No.2: 1162-1170.

Setiobudi, A., Amiwarti, A., dan Tamara, D. 2020. Analisis Penambahan Limbah Bakaran Abu Ampas Tebu Sebagai Filler Campuran Aspal AC WC. *Jurnal Deformasi*. Vol.5 No.2: 63-68.

Sudarman, C. S. 2022. Pengaruh penggantian sebagian pasir dengan limbah batu granit dan rambut terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton. *Formosa Journal of Multidisciplinary Research*. Vol.1 No.3: 803-818.

Sugiyono, D. 2013. *Memahami penelitian kualitatif*. Penerbit Alfabeta. Bandung

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.

Sukirman, S. 2016. *Beton Aspal Campuran Panas*. Penerbit Institut Teknologi Nasional. Bandung.

Supit, F. P., dan Mangontan, R. 2021. Pemanfaatan Limbah Nikel Sorowako Dalam Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar. *Paulus Civil Engineering Journal*. Vol.3 No.1: 63-69.

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*. Bandung.

Tegalaksana, S. 1994. Studi Bahan Additive Arbocel pada Aspal Campuran Panas. *Tugas Akhir.* Universitas Kristen Petra. Surabaya.

Tolab, L. Z., & Fauziah, M. 2024. The Effect of Geothermal Waste as Filler Substitution on Stone Matrix Asphalt (SMA) Characteristics. *Rekayasa Sipil*. Vol. 18 No.3: 172-178.

Purbanto, I. G. R., Thanaya, I. N. A., & Dewi, N. K. S. S. 2022. Analisis Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) Dengan Serat Selulosa Serabut Kelapa. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil· A Scientific Journal Of Civil Engineering*. Vol.26 No.1.

Yuniarti, R., Hasyim, H., Hariyadi, H., dan Handayani, T. 2019. Penggunaan Limbah Kaca Sebagai Filler Pada Campuran Perkerasan Aspal Panas. *Jurnal Teknik Sipil*. Vol.26 No.3: 265.

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 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 : Juni 2025

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	15,39	15,63
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	25,95	25,92
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	10,56	10,29
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	16,42	16,78
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,03	1,15
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	26,01	25,94
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	9,59	9,16
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	0,97	1,13
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,06	1,018
10	Rata-rata BJ Aspal	1,040	

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bachtiar Ibrahim, M.Eng./R.M., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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

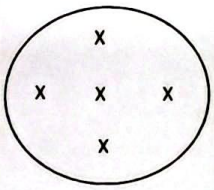
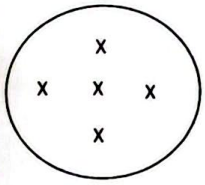
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : Juni 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	66			
2	64	65			
3	68	68			
4	66	65			
5	67	69			
Rata2	66	66,6			
Rata2	66,3				

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	**Pemanasan Benda uji**			
	Mulai pemanasan	27 ^{o}C	08.20 WIB	
	Selesai pemanasan	140 ^{o}C	08.35 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	140 ^{o}C	08.35 WIB	
	Selesai	27 ^{o}C	09.40 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	27 ^{o}C	09.40 WIB	
	Selesai	320 ^{o}C	10.20 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	315 ^{o}C	320 ^{o}C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	315 ^{o}C	320 ^{o}C	

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 2025

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

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)		Titik Lembek (^{o}C)	
		Benda Uji I	Benda Uji II	I	II
1	5 ^{o}C	0 detik	0 detik		
2	10 ^{o}C	60 detik	60 detik		
3	15 ^{o}C	120 detik	120 detik		
4	20 ^{o}C	180 detik	180 detik		
5	25 ^{o}C	240 detik	240 detik		
6	30 ^{o}C	300 detik	300 detik		
7	35 ^{o}C	360 detik	360 detik		
8	40 ^{o}C	420 detik	420 detik		
9	45 ^{o}C	480 detik	480 detik		
10	50 ^{o}C	525 detik	527 detik	48^{o}C	49^{o}C
11	55 ^{o}C				
12	60 ^{o}C				

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 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	164 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	164 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	164 cm	

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 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	58,580 gr	56,110 gr	
2	Berat erlen meyer kosong + Aspal	60,110 gr	57,530 gr	
3	Berat Aspal (2 - 1)	1,530 gr	1,420 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%)	0,654 %	0,704 %	
8	Aspal yang larut (100% - 7)	99,346 %	99,296 %	
9	Rata-rata Aspal yang larut (%)	99,321 %		

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	1629,10	1631,25	1630,18
2	Berat benda uji dalam Air (BA) gr	1000,40	1000,49	1000,45
3	Berat benda uji dkering oven (BK) gr	1597,78	1599,89	1598,84
4	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(BJ - BA}$	2,541	2,536	2,539
5	Berat jenis (SSD) = $\frac{BJ}{(BJ - BA}$	2,591	2,586	2,589
6	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(BK - BA)}$	2,675	2,669	2,672
7	Penyerapan air = $\frac{(BJ - BK)}{BK} \times 100\%$	1,960	1,960	1,960
8	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,608	2,603	2,605

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 2025

Persiapan pemeriksaan

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

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	99%	
2	Sampel 2	97%	
	Rata-rata	98%	

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 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")	2500,00	2500,00	
7	12.5 mm (0.5")	09.5 mm (3/8")	2500,00	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)		5000,00	5000,00	
12	JUMLAH TERTAHAN DI SIEVE 12(B)		3945,00	4123,00	
13	KEAUSAN 100x = $\frac{(A-B)}{A} \times 100\%$		21,100	17,540	
17	Rata-rata Keausan (%)		19,32		

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bertian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 91511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	500,00	500,00	
2	Berat Vicnometer + Air (B) gr	704,53	693,30	
3	Berat Vicnometer + Air + benda uji (BT) gr	1020,73	1007,28	
4	Berat benda uji kering oven (BK)	492,46	493,55	
5	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(B+500)-BT}$	2,679	2,653	2,666
6	Berat jenis (SSD) = $\frac{500}{(B+500)-BT}$	2,720	2,688	2,704
7	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(B+BK)-BT}$	2,794	2,749	2,771
8	Penyerapan air = $\frac{(500-BK)}{BK} \times 100\%$	1,531	1,307	1,419
9	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,737	2,701	2,719

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 2025

No.	Keterangan		Benda uji		Rata-rata
			1	2	
1	Persiapan, dan perendaman benda uji dalam larutan $CaCl_2$ selama (± 10.1 menit).	Mulai	15.40	15.40	
		Selesai	15.50	15.50	
2	Waktu pengendapan (benda uji setelah digojok sebanyak 90x, dan di tambah larutan $CaCl_2$)	Mulai	15.55	15.55	
		Selesai	16.15	16.15	
4	Clay reading (Pembacaan Lumpur) Inchi		4,42	4,52	4,47
5	Sand reading (Pembacaan Pasir)		4,10	4,20	4,15
6	$Sand\ Eqiuvalent = \frac{Sand\ Reading}{Clay\ Reading} \times 100\ \%$		92,76	92,92	92,84
7	Kandungan Lumpur = 100 - SE		7,24	7,08	7,16

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 : Juni 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	20,45	23,81	
2	Berat Vicnometer + Air gr	42,87	46,97	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,42	23,16	
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	28,54	30,29	
5	Berat *Filler* (4-1) gr	8,090	6,480	7,29
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	47,800	50,910	49,36
7	Berat Aquadest (6-4) gr	19,260	20,620	19,94
8	Volume *Filler* (3-7) gr	3,160	2,540	2,85
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	2,560	2,551	2,556

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 Bauksit*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER* DEBU GRANIT

RUJUKAN : SNI 2441-2011

1 Jenis Material : *Filler Debu Granit*
2 Sumber Material : Clereng
3 Diuji Pada : Juni 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	23,67	23,88	
2	Berat Vicnometer + Air gr	46,63	46,88	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,96	23,00	
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	32,46	32,54	
5	Berat *Filler* (4-1) gr	8,790	8,660	8,73
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	52,130	52,210	52,17
7	Berat Aquadest (6-4) gr	19,670	19,670	19,67
8	Volume *Filler* (3-7) gr	3,290	3,330	3,31
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	2,672	2,601	2,636

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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
DENGAN METODE MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

Tanggal Pengujian **AGUSTUS 2025**
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%	71,94	5,26	5,00	1165,29	1170,61	659,28	511,33	2,279	2,379	10,956	84,855	4,188	15,14	4,19	53	1017,82	0,8233	837,92	2,40
5%	71,11	5,26	5,00	1170,45	1179,97	660,65	519,32	2,254	2,379	10,836	83,920	5,245	16,08	5,24	55	1056,23	0,8416	888,92	2,50
5%	70,03	5,26	5,00	1178,70	1193,81	663,91	529,90	2,224	2,379	10,694	82,824	6,482	17,18	6,48	54	1037,03	0,8848	917,56	2,70
								2,252					**16,13**	**5,30**				**881,47**	**2,53**
5,5%	70,21	5,82	5,50	1190,14	1197,20	676,87	520,33	2,287	2,363	12,096	84,718	3,186	15,28	3,19	51	979,41	0,8776	859,53	2,80
5,5%	71,50	5,82	5,50	1198,80	1208,26	676,54	531,72	2,255	2,363	11,923	83,506	4,571	16,49	4,57	57	1094,64	0,8288	907,18	2,90
5,5%	69,92	5,82	5,50	1199,56	1215,60	678,19	537,41	2,232	2,363	11,804	82,674	5,521	17,33	5,52	54	1037,03	0,8892	922,12	2,70
								2,258					**16,37**	**4,43**				**896,28**	**2,80**
6%	71,62	6,38	6,00	1182,99	1196,38	673,45	522,93	2,262	2,347	13,051	83,347	3,602	16,65	3,60	55	1056,23	0,8273	873,77	3,00
6%	72,66	6,38	6,00	1189,25	1199,47	671,89	527,58	2,254	2,347	13,005	83,049	3,946	16,95	3,95	58	1113,84	0,8143	906,95	3,15
6%	70,12	6,38	6,00	1188,29	1197,52	670,47	527,05	2,255	2,347	13,007	83,066	3,927	16,93	3,93	60	1152,25	0,8812	1015,36	3,25
								2,257					**16,85**	**3,82**				**932,03**	**3,13**
6,5%	71,07	6,95	6,50	1160,15	1178,28	665,75	512,53	2,264	2,331	14,147	82,953	2,900	17,05	2,90	58	1113,84	0,843	939,19	3,5
6,5%	71,18	6,95	6,50	1184,00	1196,94	668,23	528,71	2,239	2,331	13,996	82,067	3,937	17,93	3,94	57	1094,64	0,839	918,18	3,3
6,5%	70,82	6,95	6,50	1187,22	1200,28	673,98	526,30	2,256	2,331	14,099	82,667	3,234	17,33	3,23	60	1152,25	0,853	983,10	3,25
								2,253					**17,44**	**3,36**				**946,83**	**3,35**
7%	73,28	7,53	7,00	1177,99	1196,87	668,41	528,46	2,229	2,316	15,004	81,252	3,744	18,75	3,74	57	1094,64	0,8048	880,91	3,40
7%	70,35	7,53	7,00	1178,19	1190,67	664,12	526,55	2,238	2,316	15,061	81,561	3,379	18,44	3,38	55	1056,23	0,8720	921,03	3,55
7%	70,22	7,53	7,00	1168,39	1179,11	662,39	516,72	2,261	2,316	15,219	82,421	2,359	17,58	2,36	53	1017,82	0,8772	892,83	3,30
								2,243					**18,26**	**3,16**				**898,26**	**3,42**

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, September 2025
Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 *IRS*

HASIL 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	71,56	0,83	50	19,20	960,21	240	2,47	795,05	796,65	600	71,4	73	0,83	0,81
	2	70,48	0,87	50	19,20	960,21	250		832,31			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	74,71	0,78	51	19,20	979,41	250		762,60			74,6	76,2	0,78	0,76
5,5%	1	69,84	0,89	49	19,20	941,01	380	3,87	837,50	815,94	600	68,3	69,9	0,89	0,89
	2	68,09	0,90	48	19,20	921,80	390		825,24			66,7	68,3	0,93	0,89
	3	72,39	0,82	50	19,20	960,21	390		785,09			71,4	73	0,83	0,81
6,0%	1	73,42	0,80	55	19,20	1056,23	425	4,22	847,23	852,68	600	73	74,6	0,81	0,78
	2	71,50	0,83	53	19,20	1017,82	410		843,52			71,4	73	0,83	0,81
	3	72,11	0,82	55	19,20	1056,23	430		867,30			71,4	73	0,83	0,81
6,5%	1	69,92	0,89	52	19,20	998,62	250	2,50	887,97	869,62	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	72,02	0,82	53	19,20	1017,82	240		836,90			71,4	73	0,83	0,81
	3	70,02	0,89	52	19,20	998,62	260		883,98			69,9	71,4	0,89	0,83
7,0%	1	70,12	0,88	50	19,20	960,21	460	4,65	846,14	833,00	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	69,96	0,89	49	19,20	941,01	465		835,24			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	72,30	0,82	52	19,20	998,62	470		817,62			71,4	73	0,83	0,81

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 *Draindown*

HASIL PENGUJIAN *DRAINDOWN*

Kadar Aspal (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
5,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1530,14	1537,21	1532,55
	2	Berat Benda Uji	1184,13	1192,13	1185,54
	3	Berat Awal Piring Penampung	346,01	345,08	347,01
	4	Berat Akhir Piring Penampung	346,99	345,81	348,52
	5	Draindown	0,083%	0,06%	0,13%
	6	Rata-Rata Draindown		0,09	
5,5%	1	Berat Piring + Benda Uji	1535,56	1536,47	1533,87
	2	Berat Benda Uji	1190,28	1191,32	1187,82
	3	Berat Awal Piring Penampung	345,28	345,15	346,05
	4	Berat Akhir Piring Penampung	346,55	346,52	347,58
	5	Draindown	0,107%	0,11%	0,13%
	6	Rata-Rata Draindown		0,117	
6,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1506,33	1508,22	1505,47
	2	Berat Benda Uji	1200,85	1202,95	1200,69
	3	Berat Awal Piring Penampung	305,48	305,27	304,78
	4	Berat Akhir Piring Penampung	306,91	306,96	306,73
	5	Draindown	0,12%	0,14%	0,16%
	6	Rata-Rata Draindown		0,141	
6,5%	1	Berat Piring + Benda Uji	1545,21	1544,18	1544,95
	2	Berat Benda Uji	1186,47	1185,74	1186,64
	3	Berat Awal Piring Penampung	358,74	358,44	358,31
	4	Berat Akhir Piring Penampung	360,59	360,55	360,68
	5	Draindown	0,16%	0,18%	0,20%
	6	Rata-Rata Draindown		0,178	
7,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1530,25	1529,15	1528,32
	2	Berat Benda Uji	1288,73	1284,64	1283,08
	3	Berat Awal Piring Penampung	241,52	244,51	245,24
	4	Berat Akhir Piring Penampung	245,09	247,52	247,87
	5	Draindown	0,28%	0,23%	0,20%
	6	Rata-Rata Draindown		0,239	

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 *VCA*

HASIL PENGUJIAN IRS

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	4992	3424	4384	1178,1	962,4	1,629	0,9975	2,55	35,983	2,28	2,55	76	32,11568	0,893	OK
	2	4975	3424	4356	1178,1	934,3	1,660	0,9975	2,55	34,774	2,25	2,55	76	32,86414	0,945	OK
	3	4978	3424	4347	1178,1	925,3	1,679	0,9975	2,55	34,011	2,22	2,55	76	33,74081	0,992	OK
	Rata-Rata									34,923	Rata-Rata			32,90688	0,943	OK
5,50%	1	4982	3424	4376	1178,1	954,3	1,633	0,9975	2,55	35,856	2,29	2,55	76	31,86725	0,889	OK
	2	4988	3424	4356	1178,1	934,3	1,674	0,9975	2,55	34,228	2,25	2,55	76	32,84158	0,960	OK
	3	4990	3424	4354	1178,1	932,3	1,680	0,9975	2,55	34,002	2,23	2,55	76	33,51051	0,986	OK
	Rata-Rata									34,695	Rata-Rata			32,73978	0,945	OK
6,00%	1	4969	3424	4350	1178,1	928,3	1,664	0,9975	2,55	34,606	2,26	2,55	76	32,61329	0,942	OK
	2	4978	3424	4342	1178,1	920,3	1,689	0,9975	2,55	33,651	2,25	2,55	76	32,85378	0,976	OK
	3	4938	3424	4345	1178,1	923,3	1,640	0,9975	2,55	35,570	2,25	2,55	76	32,84051	0,923	OK
	Rata-Rata									34,609	Rata-Rata			32,76919	0,947	OK
6,50%	1	4988	3424	4356	1178,1	934,3	1,674	0,9975	2,55	34,228	2,26	2,55	76	32,573	0,952	OK
	2	4960	3424	4340	1178,1	918,3	1,673	0,9975	2,55	34,277	2,24	2,55	76	33,293	0,971	OK
	3	4948	3424	4347	1178,1	925,3	1,647	0,9975	2,55	35,285	2,26	2,55	76	32,805	0,930	OK
	Rata-Rata									34,596	Rata-Rata			32,8906	0,951	OK
7,00%	1	4989	3424	4356	1178,1	934,3	1,675	0,9975	2,55	34,186	2,23	2,55	76	33,60028	0,983	OK
	2	4945	3424	4340	1178,1	918,3	1,656	0,9975	2,55	34,919	2,24	2,55	76	33,34811	0,955	OK
	3	4948	3424	4347	1178,1	925,3	1,647	0,9975	2,55	35,285	2,26	2,55	76	32,64508	0,925	OK
	Rata-Rata									34,796	Rata-Rata			33,19783	0,954	OK

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

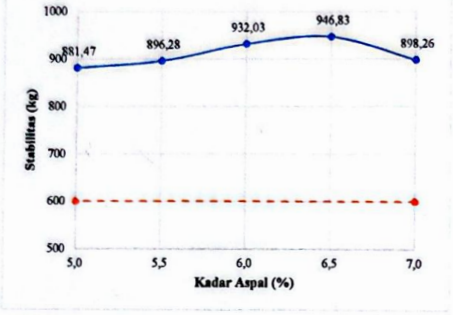
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

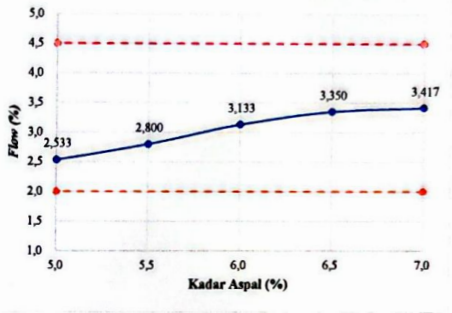
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

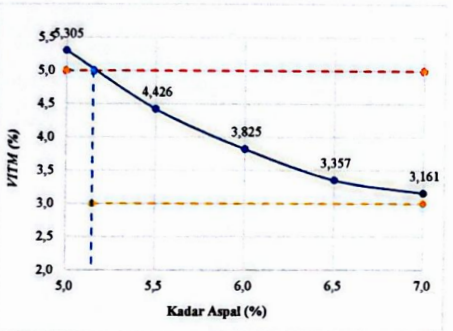
Lampiran 18 Rekapitulasi *Marshall, IRS, Draindown* Untuk KAO

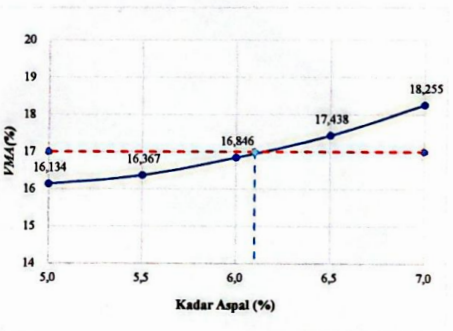
REKAPITULASI *MARSHALL, IRS, DRAINDOWN* UNTUK KAO

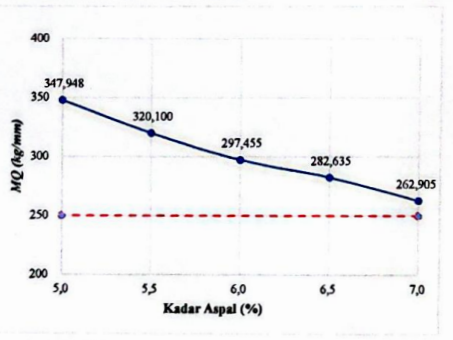
No.	Aspal	Stabilitas 0 Jam	Flow	VITM	VMA	Stabilitas 24 Jam	Draindown	IRS	VCA	VFWA	Density	MQ
1	5,00	881,47	2,53	5,30	16,13	796,65	0,09	90,38	0,94	67,12	2,25	347,95
2	5,50	896,28	2,80	4,43	16,37	815,94	0,12	91,04	0,94	72,96	2,26	320,10
3	6,00	932,03	3,13	3,82	16,85	852,68	0,14	91,49	0,95	77,29	2,26	297,46
4	6,50	946,83	3,35	3,36	17,44	869,62	0,18	91,85	0,95	80,75	2,25	282,63
5	7,00	898,26	3,42	3,16	18,26	833,00	0,24	92,73	0,95	82,69	2,24	262,91
Spec		>600	2-4.5	3-5	>17	>600	<0.3	>90	<1			>250

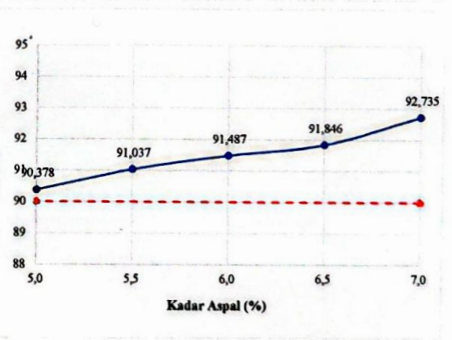


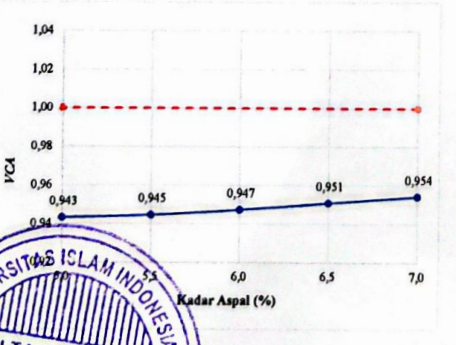


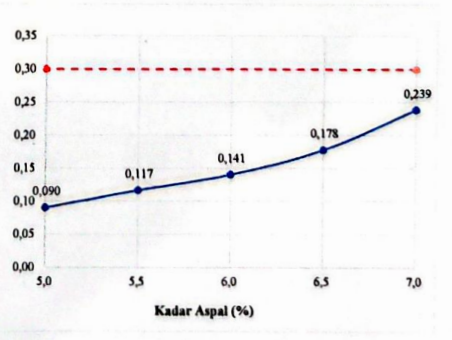












Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Mengetahui Kalab. Jalan Raya	Peneliti
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.	Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Muhammad Rajiv Sabrino
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 007

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
DENGAN METODE MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

Tanggal Pengujian **SEPTEMBER 2025**
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 (%)	m VFWA (%)	n VITM (%)	o	p	Koreksi Tebal	q Stab. (kg)	r *Flow* (mm)	MQ (kg/mm)
0%	72,31	7,01	6,55	1188,21	1196,45	668,15	528,30	2,249	2,330	14,165	82,379	3,456	17,62	80,387	3,46	60	1152,25	0,8191	943,84	2,90	325,46
0%	73,36	7,01	6,55	1192,54	1199,52	664,74	534,78	2,230	2,330	14,044	81,677	4,278	18,32	76,650	4,28	58	1113,84	0,8108	903,10	3,00	301,03
0%	71,75	7,01	6,55	1190,96	1199,67	667,95	531,72	2,240	2,330	14,107	82,038	3,855	17,96	78,537	3,86	55	1056,23	0,8186	864,66	3,10	278,92
								2,240					**17,97**	**78,52**	**3,86**				**903,86**	**3,00**	**301,80**
25%	69,94	7,01	6,55	1148,11	1159,27	641,58	517,69	2,218	2,330	13,968	81,230	4,802	18,77	74,414	4,80	58	1113,84	0,8659	964,44	3,10	311,11
25%	70,64	7,01	6,55	1190,48	1199,55	672,45	527,10	2,259	2,330	14,225	82,724	3,051	17,28	82,337	3,05	58	1113,84	0,8499	946,62	2,80	338,08
25%	70,81	7,01	6,55	1187,24	1196,45	669,12	527,33	2,251	2,330	14,180	82,463	3,358	17,54	80,855	3,36	59	1133,05	0,8391	950,70	2,90	327,83
								2,243					**17,86**	**79,20**	**3,74**				**953,92**	**2,93**	**325,67**
50%	70,84	7,01	6,55	1153,48	1159,34	641,85	517,49	2,229	2,330	14,038	81,641	4,320	18,36	76,468	4,32	59	1133,05	0,8729	989,08	2,85	347,04
50%	70,14	7,01	6,55	1155,74	1163,86	650,45	513,41	2,251	2,330	14,178	82,451	3,371	17,55	80,791	3,37	61	1171,46	0,8560	1002,77	2,95	339,92
50%	71,20	7,01	6,55	1161,21	1166,39	651,56	514,83	2,256	2,330	14,205	82,613	3,181	17,39	81,702	3,18	58	1113,84	0,8625	960,73	2,80	343,12
								2,245					**17,76**	**79,65**	**3,62**				**984,19**	**2,87**	**343,36**
75%	73,00	7,01	6,55	1161,58	1171,77	657,97	513,80	2,261	2,330	14,238	82,805	2,956	17,19	82,807	2,96	58	1113,84	0,814	906,62	3,05	297,2532
75%	68,21	7,01	6,55	1157,23	1167,45	651,91	515,54	2,245	2,330	14,137	82,217	3,646	17,78	79,497	3,65	57	1094,64	0,911	997,58	2,9	343,9936
75%	70,83	7,01	6,55	1155,23	1160,64	645,59	515,05	2,243	2,330	14,126	82,153	3,721	17,85	79,150	3,72	56	1075,44	0,869	935,06	2,95	316,9678
								2,249					**17,61**	**80,48**	**3,44**				**946,42**	**2,97**	**319,40**
100%	70,30	7,01	6,55	1159,31	1165,26	646,82	518,44	2,236	2,330	14,083	81,904	4,013	18,10	77,825	4,01	52	998,62	0,8739	872,66	2,90	300,92
100%	69,96	7,01	6,55	1154,82	1162,91	649,92	512,99	2,251	2,330	14,178	82,453	3,369	17,55	80,801	3,37	54	1037,03	0,8737	906,08	3,05	297,08
100%	70,29	7,01	6,55	1156,14	1168,01	660,18	507,83	2,277	2,330	14,338	83,386	2,275	16,61	86,304	2,28	55	1056,23	0,8561	904,27	3,10	291,70
								2,255					**17,42**	**81,64**	**3,22**				**894,34**	**3,02**	**296,57**

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN Eng
NIK : 01 511 010

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, September 2025
Penelitı

Muhammad Raıiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 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%	1	71,69	70,68	71,45	71,27	0,84	55	19,20	1056,23	882,02	852,99	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	74,53	75,26	75,32	75,04	0,77	56	19,20	1075,44	832,97			74,6	76,2	0,78	0,76
	3	72,65	73,16	72,27	72,69	0,81	54	19,20	1037,03	843,97			71,4	73	0,83	0,81
25%	1	70,12	69,40	70,54	70,02	0,89	52	19,20	998,62	883,98	903,43	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	69,89	69,27	69,54	69,57	0,89	53	19,20	1017,82	905,86			68,3	69,9	0,89	0,89
	3	70,62	69,34	69,92	69,96	0,89	54	19,20	1037,03	920,46			69,9	71,4	0,89	0,83
50%	1	71,34	72,48	72,56	72,13	0,82	58	19,20	1113,84	914,37	935,44	600	71,4	73	0,83	0,81
	2	71,34	72,41	72,35	72,03	0,82	60	19,20	1152,25	947,25			71,4	73	0,83	0,81
	3	72,59	71,63	72,41	72,21	0,82	60	19,20	1152,25	944,70			71,4	73	0,83	0,81
75%	1	73,78	73,41	72,65	73,28	0,80	58	19,20	1113,84	896,37	894,48	600	73	74,6	0,81	0,78
	2	73,91	72,56	73,41	73,29	0,80	57	19,20	1094,64	880,64			73	74,6	0,81	0,78
	3	72,81	73,17	72,11	72,70	0,81	58	19,20	1113,84	906,44			71,4	73	0,83	0,81
100%	1	70,74	71,79	71,48	71,34	0,83	52	19,20	998,62	831,38	836,20	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	70,52	70,78	71,39	70,90	0,85	54	19,20	1037,03	881,61			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	71,95	71,20	71,39	71,51	0,83	50	19,20	960,21	795,61			71,4	73	0,83	0,81

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

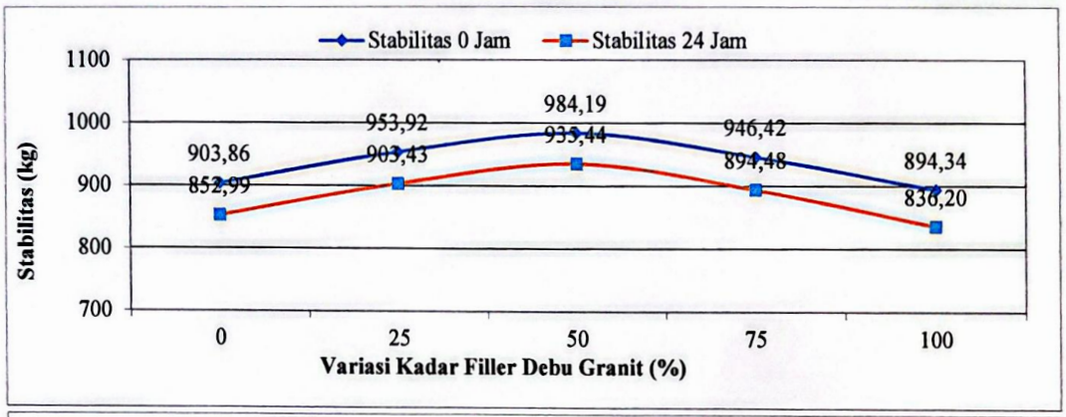
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

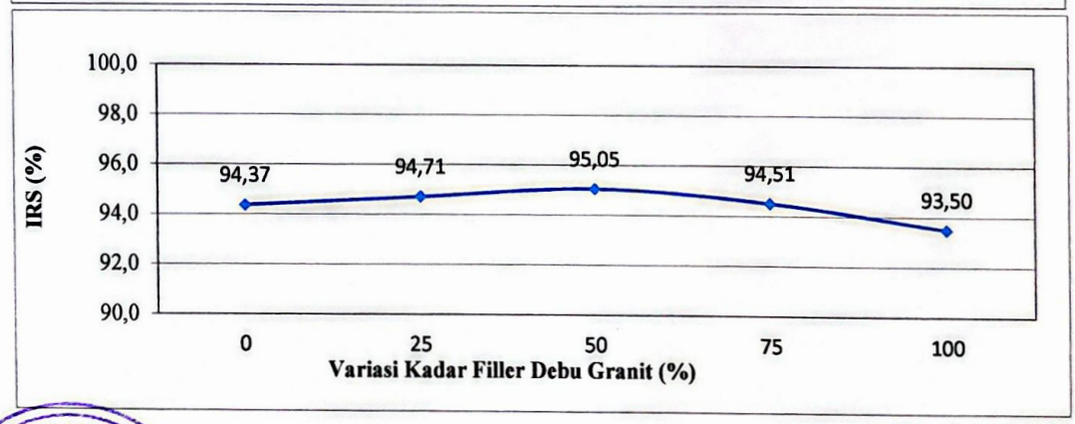
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 21 Rekapitulasi Pengujian *IRS*

REKAPITULASI PENGUJIAN *IRS*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	Stabilitas 0 Jam	Stabilitas 24 Jam	IRS
0	6,55	903,86	852,99	94,37
25		953,92	903,43	94,71
50		984,19	935,44	95,05
75		946,42	894,48	94,51
100		894,34	836,20	93,50





Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh	Mengetahui	Peneliti
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Kajur. Jalan Raya	
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Muhammad Rajiv Sabrino
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 007

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 Hasil Pengujian ITS

HASIL PENGUJIAN *ITS*

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		
			1	2	3	rata2		1	2	3	rata2		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	Tebal Sampel MIN	Tebal Sampel MAX	Koreksi MIN	Koreksi MAX	Tebal Sampel MIN	Tebal Sampel MAX	Koreksi MIN	Koreksi MAX	awal	rata2	MIN
6,55%	0,0%	1	70,42	70,63	69,34	70,13	0,88	4,00	3,99	3,97	3,99	0,16	47	19,20	902,60	360,62	352,59	600	69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,164	0,156	792,04	764,03	600
		2	71,32	69,22	72,52	71,02	0,85	4,05	4,08	4,03	4,05	0,16	48	19,20	921,80	353,40			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,16	0,152	759,57		
		3	70,34	71,44	70,33	70,70	0,86	4,02	4,00	4,03	4,02	0,16	46	19,20	883,39	343,75			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	740,49		
	25,0%	1	74,22	73,76	73,63	73,87	0,79	3,99	3,96	4,00	3,98	0,16	51	19,20	979,41	352,61	378,79	600	73	74,6	0,81	0,78	3,9	4	0,16	0,156	733,36	803,78	600
		2	70,88	70,72	71,28	70,96	0,85	4,00	3,97	3,95	3,97	0,16	53	19,20	1017,82	391,32			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	849,43		
		3	71,68	72,43	72,71	72,27	0,82	4,01	4,00	4,02	4,01	0,16	55	19,20	1056,23	392,43			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	828,54		
	50,0%	1	71,47	72,32	72,49	72,09	0,82	4,00	3,99	3,98	3,99	0,16	54	19,20	1037,03	386,35	393,38	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	821,95	846,08	600
		2	70,34	71,43	70,12	70,63	0,86	4,00	3,92	3,98	3,97	0,16	53	19,20	1017,82	397,42			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	868,16		
		3	71,16	72,32	71,37	71,62	0,83	3,99	3,99	4,00	3,99	0,16	55	19,20	1056,23	396,36			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	848,13		
	75,0%	1	71,96	73,50	72,96	72,81	0,81	3,99	4,00	3,96	3,98	0,16	56	19,20	1075,44	396,31	400,62	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	836,30	860,10	600
		2	68,62	68,77	69,56	68,98	0,89	4,00	4,00	3,99	4,00	0,16	55	19,20	1056,23	426,40			68,3	69,9	0,89	0,89	3,9	4	0,16	0,156	946,44		
		3	71,83	72,14	72,34	72,10	0,82	4,00	4,06	4,04	4,03	0,15	53	19,20	1017,82	379,14			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	797,55		
	100,0%	1	72,37	71,32	72,15	71,95	0,82	3,99	4,00	3,98	3,99	0,16	56	19,20	1075,44	401,56	412,22	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	856,04	887,49	600
		2	70,56	71,23	70,67	70,82	0,85	3,96	3,99	4,00	3,98	0,16	58	19,20	1113,84	431,07			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	935,17		
		3	71,28	70,61	71,31	71,07	0,84	3,99	3,99	4,00	3,99	0,16	55	19,20	1056,23	404,05			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	871,27		

Diperiksa Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kal.Lab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, September 2025
Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

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 Pengujian TSR

HASIL PENGUJIAN *TSR*

Kadar Aspal	Substitusi		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi Tebal Sampel		Angka Koreksi Koreksi		Angka Koreksi Tebal Sampel		Angka Koreksi Koreksi		ITS 24 JAM Kpa		
			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
6,6%	0,0%	1	71,62	73,48	73,35	72,82	0,81	3,96	3,99	3,98	3,98	0,157	46	19,20	883,39	325,49	335,77	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,1600	0,1560	687,93	713,00	600
		2	71,23	72,65	72,32	72,07	0,82	3,99	3,94	3,99	3,97	0,16	48	19,20	921,80	343,56			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	734,30		
		3	71,32	72,12	71,67	71,70	0,83	4,00	4,06	4,02	4,03	0,15	47	19,20	902,60	338,26			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	716,78		
	25,0%	1	69,32	67,21	68,63	68,39	0,89	3,99	3,98	4,01	3,99	0,156	47	19,20	902,60	364,38	359,34	600	68,3	69,9	0,89	0,89	3,9	4	0,160	0,156	816,53	777,73	600
		2	72,80	72,90	71,53	72,41	0,82	4,00	3,96	4,01	3,99	0,156	49	19,20	941,01	348,89			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,160	0,156	739,00		
		3	72,43	71,62	72,31	72,12	0,82	3,94	4,00	4,00	3,98	0,157	51	19,20	979,41	364,74			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,160	0,156	777,67		
	50,0%	1	69,36	68,92	70,47	69,58	0,89	4,03	4,08	4,00	4,04	0,15	49	19,20	941,01	379,89	378,70	600	68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	827,36	823,28	600
		2	70,62	71,57	72,45	71,55	0,83	4,00	3,98	3,96	3,98	0,16	53	19,20	1017,82	382,35			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	821,75		
		3	70,14	71,35	71,23	70,91	0,85	3,95	4,00	3,96	3,97	0,16	51	19,20	979,41	377,50			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	820,74		
	75,0%	1	71,97	71,45	72,28	71,90	0,82	4,00	4,06	4,04	4,03	0,15	55	19,20	1056,23	394,66	402,73	600	71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	832,53	841,74	600
		2	73,43	72,69	73,87	73,33	0,80	4,04	4,00	4,09	4,04	0,15	58	19,20	1113,84	406,12			73	74,6	0,81	0,78	4	4,1	0,156	0,152	837,84		
		3	72,42	71,72	72,34	72,16	0,82	4,00	4,08	4,04	4,04	0,15	57	19,20	1094,64	407,40			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	854,86		
	100,0%	1	72,44	72,56	71,13	72,04	0,82	3,98	3,94	4,00	3,97	0,16	55	19,20	1056,23	393,81	404,58	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	841,96	871,65	600
		2	71,23	71,91	70,46	71,20	0,84	3,99	4,00	3,98	3,99	0,16	57	19,20	1094,64	416,09			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	896,33		
		3	71,62	70,35	71,26	71,08	0,84	4,00	3,96	3,94	3,97	0,16	55	19,20	1056,23	403,85			69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	876,68		

Diketahui Oleh
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Ir. Bernadia Kaniaru, M.Eng., P.M., ASEAN Eng.
NIK : 05 511 0101

Mengetahui
Kaprodi Teknik Sipil

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

Yogyakarta, September 2025
Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM 20 511 007

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

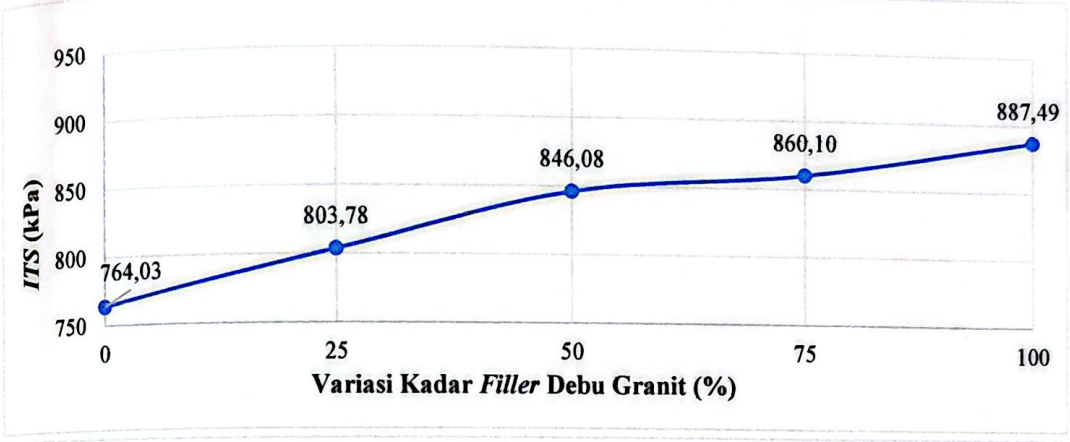
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

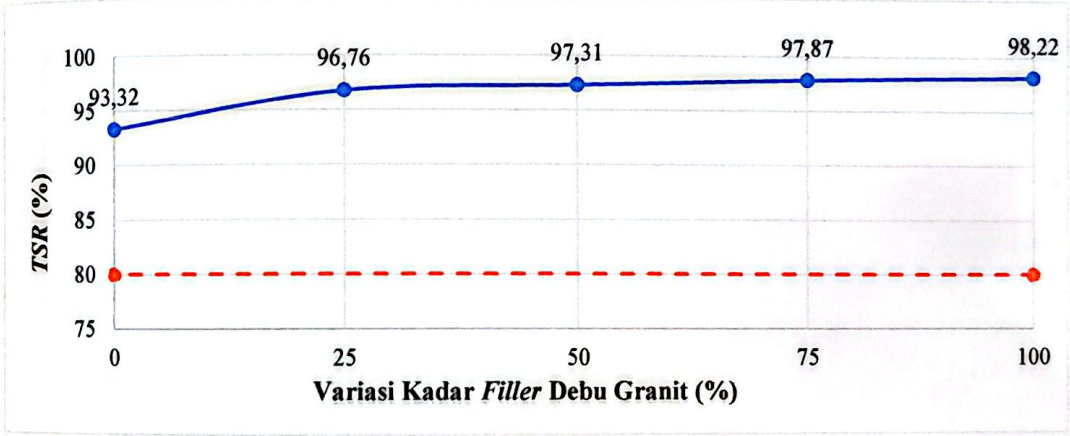
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 24 Rekapitulasi Pengujian *ITS & TSR*

REKAPITULASI PENGUJIAN *ITS & TSR*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	ITS	ITS 24 Jam	TSR (%)
0	6,55	764,03	713,00	93,32
25		803,78	777,73	96,76
50		846,08	823,28	97,31
75		860,10	841,74	97,87
100		887,49	871,65	98,22





Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh	Mengetahui	Peneliti
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Ketua Jalan Raya	
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Muhammad Rajiv Sabrino
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 007

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 Pengujian *CL*

HASIL PENGUJIAN *CL*

Substitusi	No.	Keterangan	Benda uji		
			1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi	1142,43	1128,72	1131,46
	2	Berat Sesudah Abrasi	1041,64	1030,70	1034,69
	3	Persentase Kehilangan Berat	8,82	8,68	8,55
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat	8,69		
25%	1	Berat Sebelum Abrasi	1151,66	1161,48	1159,54
	2	Berat Sesudah Abrasi	1062,78	1069,91	1067,11
	3	Persentase Kehilangan Berat	7,72	7,88	7,97
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat	7,86		
50%	1	Berat Sebelum Abrasi	1138,55	1130,10	1149,68
	2	Berat Sesudah Abrasi	1050,78	1045,89	1069,10
	3	Persentase Kehilangan Berat	7,71	7,45	7,01
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat	7,39		
75%	1	Berat Sebelum Abrasi	1147,76	1147,91	1150,31
	2	Berat Sesudah Abrasi	1065,47	1067,26	1069,79
	3	Persentase Kehilangan Berat	7,17	7,03	7,00
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat	7,07		
100%	1	Berat Sebelum Abrasi	1136,03	1137,68	1154,15
	2	Berat Sesudah Abrasi	1065,96	1057,47	1074,44
	3	Persentase Kehilangan Berat	6,17	7,05	6,91
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat	6,71		

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, September 2025
Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

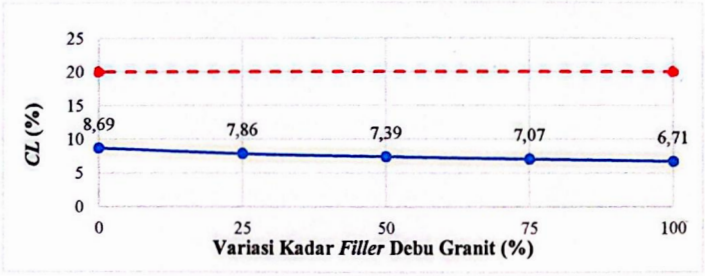
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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 Hasil Pengujian *CL*

REKAP PENGUJIAN *CL*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL (%)
0	6,55	8,69
25		7,86
50		7,39
75		7,07
100		6,71



Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Mengetahui Kalab. Jalan Raya	Peneliti
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Muhammad Rajiv Sabrino
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 007

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 27 Hasil Pengujian *Draindown*

HASIL PENGUJIAN *DRAINDOWN*

Kadar Filler (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
0,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1407,16	1453,32	1419,26
	2	Berat Benda Uji	1166,36	1203,31	1165,14
	3	Berat Awal Piring Penampung	240,80	250,01	254,12
	4	Berat Akhir Piring Penampung	241,18	252,97	257,04
	5	Draindown	0,033%	0,25%	0,25%
	6	Rata-Rata Draindown		0,176	
25,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1355,12	1330,32	1337,76
	2	Berat Benda Uji	1173,55	1150,67	1152,49
	3	Berat Awal Piring Penampung	181,57	179,65	185,27
	4	Berat Akhir Piring Penampung	183,71	181,05	187,09
	5	Draindown	0,182%	0,12%	0,16%
	6	Rata-Rata Draindown		0,154	
50,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1531,24	1531,63	1525,41
	2	Berat Benda Uji	1285,11	1286,22	1278,15
	3	Berat Awal Piring Penampung	246,13	245,41	247,26
	4	Berat Akhir Piring Penampung	248,06	246,99	248,74
	5	Draindown	0,15%	0,12%	0,12%
	6	Rata-Rata Draindown		0,130	
75,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1426,33	1436,28	1428,81
	2	Berat Benda Uji	1164,37	1176,26	1166,03
	3	Berat Awal Piring Penampung	261,96	260,02	262,78
	4	Berat Akhir Piring Penampung	262,58	261,21	264,21
	5	Draindown	0,05%	0,10%	0,12%
	6	Rata-Rata Draindown		0,092	
100,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1438,13	1426,73	1431,33
	2	Berat Benda Uji	1192,91	1179,84	1181,77
	3	Berat Awal Piring Penampung	245,22	246,89	249,56
	4	Berat Akhir Piring Penampung	246,18	247,64	250,47
	5	Draindown	0,08%	0,06%	0,08%
	6	Rata-Rata Draindown		0,074	

Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh	Mengetahui	Peneliti
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Kalab. Jalan Raya	
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Muhammad Rajiv Sabrino
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 007

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

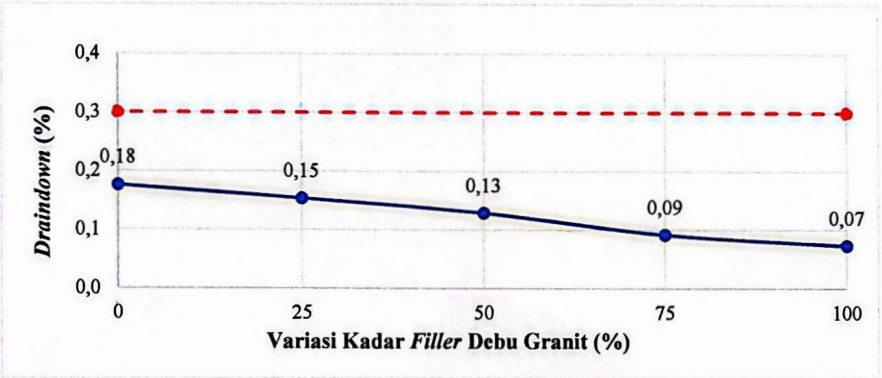
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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 28 Hasil Pengujian *DD*

REKAP PENGUJIAN *DRAINDOWN*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	DD (%)
0	6,55	0,11
25		0,09
50		0,06
75		0,04
100		0,03



Yogyakarta, September 2025

Disahkan Oleh	Mengetahui	Peneliti
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Kalab. Jalan Raya	
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Ir Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Muhammad Rajiv Sabrino
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 007

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

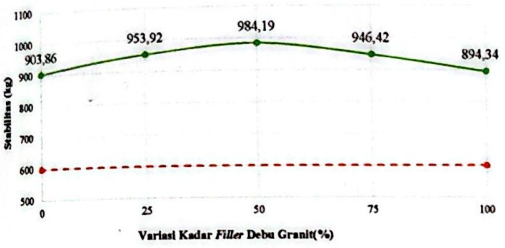
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

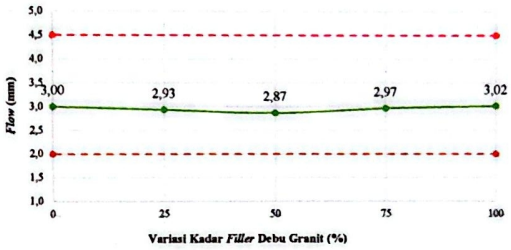
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

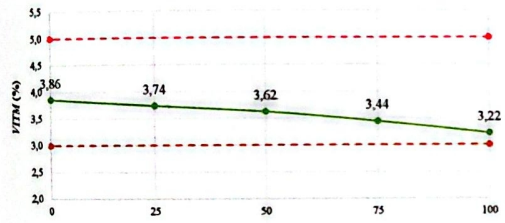
Lampiran 29 Rekapitulasi Pengujian *Marshall* Setelah Substitusi *Filler* Debu Granit

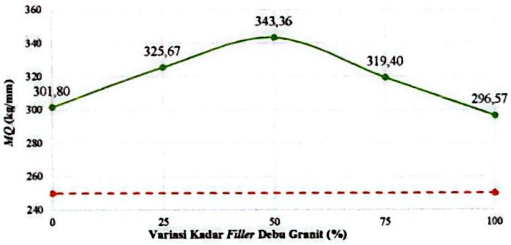
Rekapitulasi Pengujian *Marshall* Setelah Substitusi *Filler* Debu Granit

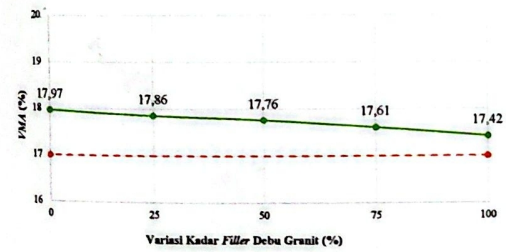
Kadar Filler (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	*Flow* (mm)	VITM (%)	VFWA (%)	MQ (kg/mm)	VMA (%)	Draindown (%)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)	*VCA*	Density	*ITS* kPa
0	903,86	3,00	3,86	78,52	301,80	17,97	0,18	852,99	94,37	0,920	2,240	764,03
25	953,92	2,93	3,74	79,20	325,67	17,86	0,15	903,43	94,71	0,930	2,243	803,78
50	984,19	2,87	3,62	79,65	343,36	17,76	0,13	935,44	95,05	0,945	2,245	846,08
75	946,42	2,97	3,44	80,48	319,40	17,61	0,09	894,48	94,51	0,955	2,249	860,10
100	894,34	3,02	3,22	81,64	296,57	17,42	0,07	836,20	93,50	0,962	2,255	887,49
	> 600	**2-4,5**	**3 - 5**	**>65**	**>250**	**> 17**	**<0,3**	**> 600**	**>90**	**<1**	**>2**	

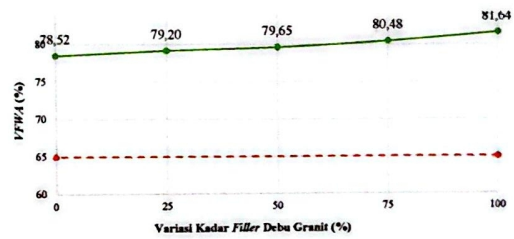


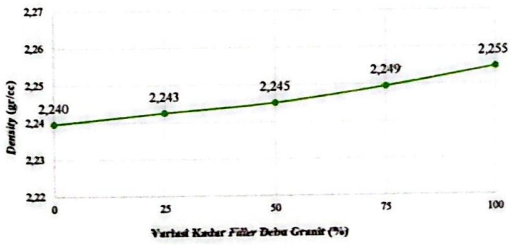












Yogyakarta, September 2025

Mengetahui
Kaprodi Jalan Raya

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

Peneliti

Muhammad Rajiv Sabrino
NIM : 20 511 007

Diketahui Oleh
Dekan Fakultas Teknik Sipil
dan Perencanaan

Ir. Hestin Mulyani, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 014 100 101

Lampiran 30 Hasil Uji Normalitas *ANOVA*

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Variasi Filler	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Stabilitas	0%	,177	3	.	1,000	3	,968
	25%	,302	3	.	,911	3	,421
	50%	,257	3	.	,961	3	,621
	75%	,263	3	.	,955	3	,593
	100%	,368	3	.	,790	3	,092
Flow	0%	,175	3	.	1,000	3	1,000
	25%	,253	3	.	,964	3	,637
	50%	,253	3	.	,964	3	,637
	75%	,253	3	.	,964	3	,637
	100%	,292	3	.	,923	3	,463
VITM	0%	,177	3	.	1,000	3	,973
	25%	,323	3	.	,878	3	,318
	50%	,328	3	.	,871	3	,298
	75%	,355	3	.	,818	3	,159
	100%	,235	3	.	,978	3	,715
VFWA	0%	,176	3	.	1,000	3	,988
	25%	,319	3	.	,885	3	,339
	50%	,325	3	.	,876	3	,312
	75%	,354	3	.	,821	3	,166
	100%	,244	3	.	,971	3	,674
VMA	0%	,177	3	.	1,000	3	,968
	25%	,324	3	.	,876	3	,313
	50%	,328	3	.	,870	3	,295
	75%	,350	3	.	,829	3	,185
	100%	,235	3	.	,978	3	,714
MQ	0%	,180	3	.	,999	3	,945
	25%	,230	3	.	,981	3	,737
	50%	,193	3	.	,997	3	,889
	75%	,208	3	.	,992	3	,828
	100%	,211	3	.	,991	3	,816
Density	0%	,181	3	.	,999	3	,942
	25%	,316	3	.	,890	3	,354
	50%	,320	3	.	,883	3	,334
	75%	,349	3	.	,832	3	,194
	100%	,237	3	.	,977	3	,706

a. Lilliefors Significance Correction

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Variasi Filler	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
CL	0%	,177	3	.	1,000	3	,972
	25%	,248	3	.	,969	3	,660
	50%	,236	3	.	,977	3	,710
	75%	,333	3	.	,862	3	,272
	100%	,329	3	.	,869	3	,291
IRS	0%	,303	3	.	,909	3	,416
	25%	,306	3	.	,905	3	,401
	50%	,249	3	.	,968	3	,655
	75%	,321	3	.	,881	3	,328
	100%	,306	3	.	,904	3	,398
ITS	0%	,235	3	.	,978	3	,716
	25%	,322	3	.	,880	3	,324
	50%	,202	3	.	,994	3	,854
	75%	,288	3	.	,929	3	,484
	100%	,317	3	.	,888	3	,348
TSR	0%	,381	3	.	,760	3	,122
	25%	,222	3	.	,986	3	,770
	50%	,182	3	.	,999	3	,937
	75%	,191	3	.	,997	3	,898
	100%	,253	3	.	,965	3	,639
Draindown	0%	,378	3	.	,766	3	,135
	25%	,218	3	.	,988	3	,786
	50%	,312	3	.	,896	3	,373
	75%	,265	3	.	,954	3	,586
	100%	,312	3	.	,896	3	,374

a. Lilliefors Significance Correction

Lampiran 31 Hasil Uji Homogenitas *ANOVA*

Tests of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Stabilitas	Based on Mean	1,616	4	10	,245
	Based on Median	,779	4	10	,564
	Based on Median and with adjusted df	,779	4	6,222	,577
	Based on trimmed mean	1,554	4	10	,260
Flow	Based on Mean	,647	4	10	,642
	Based on Median	,259	4	10	,898
	Based on Median and with adjusted df	,259	4	7,410	,896
	Based on trimmed mean	,614	4	10	,662
VITM	Based on Mean	1,261	4	10	,347
	Based on Median	,288	4	10	,879
	Based on Median and with adjusted df	,288	4	6,941	,877
	Based on trimmed mean	1,151	4	10	,388
VFWA	Based on Mean	1,279	4	10	,341
	Based on Median	,303	4	10	,869
	Based on Median and with adjusted df	,303	4	7,246	,867
	Based on trimmed mean	1,171	4	10	,380
VMA	Based on Mean	1,258	4	10	,348
	Based on Median	,286	4	10	,880
	Based on Median and with adjusted df	,286	4	6,932	,878
	Based on trimmed mean	1,148	4	10	,389
MQ	Based on Mean	1,781	4	10	,209
	Based on Median	1,342	4	10	,320
	Based on Median and with adjusted df	1,342	4	5,549	,362
	Based on trimmed mean	1,755	4	10	,214
Density	Based on Mean	1,242	4	10	,354
	Based on Median	,303	4	10	,870
	Based on Median and with adjusted df	,303	4	7,059	,868
	Based on trimmed mean	1,139	4	10	,392

Tests of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
CL	Based on Mean	3,572	4	10	,147
	Based on Median	,750	4	10	,580
	Based on Median and with adjusted df	,750	4	3,769	,609
	Based on trimmed mean	3,248	4	10	,160
IRS	Based on Mean	1,357	4	10	,316
	Based on Median	,221	4	10	,921
	Based on Median and with adjusted df	,221	4	6,615	,918
	Based on trimmed mean	1,204	4	10	,368
ITS	Based on Mean	2,323	4	10	,128
	Based on Median	,443	4	10	,775
	Based on Median and with adjusted df	,443	4	5,961	,775
	Based on trimmed mean	2,091	4	10	,157
TSR	Based on Mean	2,763	4	10	,188
	Based on Median	,535	4	10	,713
	Based on Median and with adjusted df	,535	4	3,909	,721
	Based on trimmed mean	2,513	4	10	,108
Draindown	Based on Mean	8,591	4	10	,103
	Based on Median	,666	4	10	,630
	Based on Median and with adjusted df	,666	4	2,322	,667
	Based on trimmed mean	7,052	4	10	,206

Lampiran 32 Hasil Uji *ANOVA*

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Stabilitas	Between Groups	16557,560	4	4139,390	4,467	,025
	Within Groups	9266,337	10	926,634		
	Total	25823,897	14			
Flow	Between Groups	,043	4	,011	,955	,472
	Within Groups	,112	10	,011		
	Total	,154	14			
VITM	Between Groups	,771	4	,193	,409	,798
	Within Groups	4,709	10	,471		
	Total	5,480	14			
VFWA	Between Groups	17,461	4	4,365	,423	,789
	Within Groups	103,230	10	10,323		
	Total	120,691	14			
VMA	Between Groups	,559	4	,140	,405	,801
	Within Groups	3,451	10	,345		
	Total	4,010	14			
MQ	Between Groups	4270,978	4	1067,744	4,069	,033
	Within Groups	2624,079	10	262,408		
	Total	6895,057	14			
Density	Between Groups	,000	4	,000	,403	,802
	Within Groups	,003	10	,000		
	Total	,003	14			
CL	Between Groups	7,065	4	1,766	22,494	<,001
	Within Groups	,785	10	,079		
	Total	7,850	14			
IRS	Between Groups	4,189	4	1,047	,065	,991
	Within Groups	160,156	10	16,016		
	Total	164,345	14			
ITS	Between Groups	28448,296	4	7112,074	2,784	,046
	Within Groups	25547,637	10	2554,764		
	Total	53995,933	14			
TSR	Between Groups	70,905	4	17,726	1,180	,377
	Within Groups	150,250	10	15,025		
	Total	221,154	14			
Draindown	Between Groups	,000	4	,000	1,490	,277
	Within Groups	,000	10	,000		
	Total	,000	14			