TUGAS AKHIR

PEMANFAATAN LIMBAH *BOTTOM ASH* BATU BARA SEBAGAI *FILLER* PENGGANTI TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT* (*SMA*)
(*UTILIZATION OF COAL BOTTOM ASH WASTE AS A SUBSTITUTE FILLER ON THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT MIXTURES*)

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

Wiji Rahayu
20511193

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

2024

TUGAS AKHIR

PEMANFAATAN LIMBAH *BOTTOM ASH* BATU BARA SEBAGAI *FILLER* PENGGANTI TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT* (*SMA*)
(*UTILIZATION OF COAL BOTTOM ASH WASTE AS A SUBSTITUTE FILLER ON THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT MIXTURES*)

Disusun Oleh

Wiji Rahayu
20511193

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

Diuji pada tanggal
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	**Pravogo Afang Pravitno, S.T., M.Sc.**	**Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.**
NIK : 215111307	**NIK : 205111303**	**NIK : 145110101**

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

4/12 2024

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 pencdebutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 26 November 2024

Yang membuat pernyataan



Wiji Rahayu

(20511193)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Pengaruh *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt*. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Penulis berharap karya ini dapat memberikan manfaat yang berarti bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

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

1. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang senantiasa membimbing dan memberikan arahan kepada penulis selama penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc. selaku Dosen Penguji dalam Sidang Tugas Akhir saya yang telah memberikan banyak saran dan masukkan kepada penulis untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.
3. Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc. selaku Dosen Penguji dalam Sidang Tugas Akhir saya yang telah memberikan banyak saran dan masukkan kepada penulis untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.
4. Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D (Eng)., IPM selaku Kepala Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Seluruh Laboran Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

6. Kedua orang tua, Bapak Sukardi dan Ibu Sujiati serta seluruh keluarga yang selalu memberikan motivasi, semangat, do'a, serta dukungan yang tulus dan tiada henti kepada penulis sehingga penulis bisa sampai pada titik ini.
7. PT. ENCEHA PASIFIC yang sudah memberikan bantuan bahan tambah VIATOP^{66}, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir.
8. Teman-teman yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan bantuan selama penyusunan laporan Tugas Akhir, Firmanda Yoga Pratama, Dony Prasetya, Fadlurrohman Assidiqi, Bibit Santoso, Fathoni Abdul Mukti.

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

Yogyakarta, 26 November 2024
Penulis,



Wiji Rahayu
(20511193)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii
KATA PENGANTAR iv
DAFTAR ISI vi
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 4
1.5 Batasan Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Fungsi *Filler* Dalam Campuran Aspal Agregat Panas 6
2.2 Pemanfaatan Limbah *Bottom ash* batu bara Sebagai Bahan Pengganti *Filler* 8
2.3 Pemanfaatan *Filler* Sebagai Subtitusi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 9
2.4 Persamaan dan Perbandingan Penelitian Terkait Subtitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal 11
BAB III LANDASAN TEORI 16
3.1 Perkerasan Lentur Jalan 16

3.2 Limbah *Bottom Ash* Batu bara 17
3.3 Bahan Penyusun Perkerasan Lentur 18
3.3.1 Aspal 18
3.3.2 Agregat 19
3.3.3 Gradasi Agregat 21
3.3.4 Bahan Aditif 21
3.4 Campuran *Stone Matrix Asphalt* 23
3.5 Karakteristik Beton Aspal 23
3.5.1 Stabilitas (*Stability*) 24
3.5.2 Keawetan (*Durability*) 24
3.5.3 Kelenturan (*Flexibility*) 24
3.5.4 Kekesatan (*Skid Resistance*) 25
3.5.5 Ketahanan Terhadap Kelelehan (*Fatigue Resistance*) 25
3.5.6 Kedap Air (*Impermeabilitas*) 25
3.5.7 Kemudahan Pelaksanaan (*Workability*) 26
3.6 Parameter Pengujian *Marshall Test* 26
3.6.1 Stabilitas (*Stability*) 26
3.6.2 Kelelahan (*Flow*) 27
3.6.3 *VMA* (*Void in Mineral Agregate*) 28
3.6.4 Kepadatan (*Density*) 28
3.6.5 *Marshall Quotient (MQ)* 29
3.6.6 *VITM* (*Void in the Total Mix*) 30
3.6.7 *VFWA* (*Void Filled With Asphalt*) 31
3.7 Pengujian *Cantabro Loss (CL)* 32
3.8 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*) 33
3.9 Pengujian *Draindown* 34
3.10 *Void in Coarse Aggregate* (*VCA*) 34
3.11 Pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*) 35
3.12 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*) 36
3.13 Analisis Statistik *ANOVA* 36
BAB IV METODE PENELITIAN 38

4.1 Metode Penelitian 38
4.2 Metode Pengambilan Sampel 38
4.3 Metode Pengambilan Data 38
4.4 Tahapan Penelitian 38
4.4.1 Pemeriksaan Material 39
4.4.2 Persiapan Alat 41
4.4.3 Perencanaan Campuran 42
4.4.4 Pembuatan Campuran Benda Uji 46
4.4.5 Pengujian *Marshall* 47
4.4.6 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* 48
4.4.7 Pengujian *Tensile Strength Rasio* (*TSR*) 48
4.4.8 Pengujian *Indeks of Retained Strength (IRS)* 49
4.4.9 Pengujian *Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition* (VCA_{DRC}) 49
4.4.10 Pengujian *Draindown* 50
4.4.11 Pengujian *Cantabro Loss* 51
4.5 Analisis Data 51
4.5.1 Analisis Karakteristik *Marshall* 51
4.5.2 Analisis Pengujian *Cantabro Loss* 53
4.5.3 Analisis Pengujian *ITS* 53
4.5.4 Analisis Pengujian *Draindown* 53
4.5.5 Analisis Pengujian *VCA* 53
4.5.6 Analisis Pengujian *IRS* 53
4.5.7 Analisis Pengujian *TSR* 53
4.5.8 Analisis Statistik *ANOVA* 53
4.6 Analisis Statistika *ANOVA* 53
4.7 Bagan Alir Penelitian 55
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 58
5.1 Hasil Pengujian Bahan Dan Campuran 58
5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 58
5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat 58

5.1.3 Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum 59
5.1.4 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm Dengan KadarAspal Optimum 61
5.2 Pembahasan 65
5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 65
5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kassar 66
5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus 67
5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*) 68
5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum 68
5.2.6 Karakteristik *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum Campuran dengan Substitusi *Filler Bottm Ash* Batu Bara (BABB) 75
5.2.7 Karakteristik Pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*) pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* BABB 88
5.2.8 Karakteristik Pengujian *Index Tensile Strength* (*ITS*) pada KAO Campuran dengan Substitusi BABB 90
5.2.9 Karakteristik Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*) pada KAO Campuran dengan Substitusi BABB 92
5.2.10 Karakteristik Pengujian *Cantabro Loss* pada KAO Campuran dengan Substitusi BABB 93
5.2.11 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai *Draindown* 95
5.2.12 Analisa Pengaruh Variasi Subtitusi *Filler* Terhadap Nilai *VCA* 96
5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler Bottom Ash* Batu Bara 96
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 100
6.1 Kesimpulan 100
6.2 Saran 101

DAFTAR PUSTAKA 102
LAMPIRAN 105

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Persamaan dan perbandingan penelitian Terkait Subsitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal 12
Tabel 3.1 Hasil Uji *XRF Bottom Ash* 17
Tabel 3.2 Sifat Fisik Penciri dari *Bottom Ash* 18
Tabel 3.3 Ketentuan-Ketentuan Aspal Keras 19
Tabel 3.4 Persyaratan Agregat Kasar Pada Campuran *SMA* 20
Tabel 3.5 Persyaratan Agregat Halus Pada Campuran *SMA* 20
Tabel 3.6 Gradasi Agregat Gabungan Campuran *SMA* 21
Tabel 3. 7 Persyaratan Serat Selulosa 22
Tabel 3.8 Persyaratan *Stone Matrix Asphalt* 23
Tabel 4.1 Rencana Gradasi Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm 43
Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5% 44
Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5,5 % 45
Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6 % 45
Tabel 4. 5 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6,5 % 45
Tabel 4.6 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 7 % 45
Tabel 4.7 Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO 46
Tabel 4. 8 Jumlah Benda Uji Untuk Setiap Pengujian KAO 46
Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70 58
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler* 59
Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng 59
Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Agregat Kasar 59
Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Campuran Untuk Menentukan KAO 59
Tabel 5. 6 Berat Debu Batu dan *Bottom Ash* Batu Bara 60
Tabel 5. 7 Hasil Rekapitulasi Pengujian *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara 62

Tabel 5. 8 Rekapitulasi Pengujian Nilai *VCA* pada KAO Setiap Kadar Substitusi *Filler Bottom* Ash Batu Bara 62
Tabel 5. 9 Rekapitulasi Pengujian *Draindown* pada KAO Setiap Kadar 62
Tabel 5. 10 Rekapitulasi Pengujian *IRS* pada KAO Setiap Kadar Substitusi BABB 63
Tabel 5. 11 Rekapitulasi Pengujian *ITS* pada KAO Setiap Kadar 63
Tabel 5. 12 Rekapitulasi Nilai *TSR* pada KAO Setiap Kadar Substitusi BABB 63
Tabel 5. 13 Rekapitulasi Pengujian *Cantabro Loss* pada KAO Setiap Kadar Substitusi BABB 64
Tabel 5. 14 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* untuk Pengaruh *Filler* BABB Terhadap Karakteristik *Marshall* 64
Tabel 5. 15 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* untuk Pengaruh *Filler* BABB Terhadap *IRS, ITS, TSR, Cantabro Loss*, dan *Draindown* 64
Tabel 5. 16 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* BABB 97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas 27
Gambar 3.2 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow* 27
Gambar 3.3 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VMA* 28
Gambar 3.4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Density* 29
Gambar 3.5 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *MQ* 30
Gambar 3.6 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VITM* 31
Gambar 3.7 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *VFWA* 32
Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Rencana Stone Matrix Asphalt 25 mm 43
Gambar 4. 2 Bagan Alir Penelitian 57
Gambar 5. 1 Penentuan Kadar Aspal Optimum dengan Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (BABB) 60
Gambar 5. 2 Limbah *Bottom Ash* Batu Bara 61
Gambar 5. 3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas 69
Gambar 5. 4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow* 70
Gambar 5. 5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *MQ* 71
Gambar 5. 6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VITM* 71
Gambar 5. 7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VMA* 72
Gambar 5. 8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VCA* 73
Gambar 5. 9 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Draindown* 74
Gambar 5. 10 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *IRS* 75
Gambar 5. 11 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Stabilitas 76
Gambar 5. 12 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Flow* 78
Gambar 5. 13 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *MQ* 80

Gambar 5. 14 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VITM* 82
Gambar 5. 15 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VMA* 83
Gambar 5. 16 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VFWA* 85
Gambar 5. 17 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Density* 86
Gambar 5. 18 Grafik Hubungan antara Rendaman dan Stabilitas 88
Gambar 5. 19 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *IRS* 89
Gambar 5. 20 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *ITS* 91
Gambar 5. 21 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *TSR* 92
Gambar 5. 22 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *CL* 94
Gambar 5. 23 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Draindown* 95

DAFTAR LAMPIRAN

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

Lampiran 25 Hasil & Rekap Pengujian *Draindown* pada Subtitusi *Filler Bottom Ash* 130
Lampiran 26 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Subtitusi *Filler Bottom Ash* 131
Lampiran 27 Hasil Analisis *ANOVA* Terhadap Karakteristik *Marshall* 132
Lampiran 28. Hasil Analisis ANOVA Terhadap *IRS*, *ITS*, *TSR*, *VCA*, *Cantabro Loss*, dan *Draindown* 135

DAFTAR NOTASI

A_0	= Konstanta
A	= Nilai absolut kehilangan selama satu hari (kg)
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 (cm^3)
g	= Berat isi sampel (gr/cc)
G_{CA}	= Berat jenis *bulk* dari fraksi campuran agregat kasar
G_{mb}	= Berat jenis *bulk* dari campuran aspal yang telah dipadatkan
h	= Berat jenis maksimum teoritis campuran
L	= Persentase kehilangan berat (%)
I	= Nilai *VMA* (%)
m	= Nilai rongga terisi aspal (*VFWA*) (%)
MQ	= Nilai *Marshall Quetient* (kg/mm)
Mo	= Berat sebelum di abrasi (gr)
Mi	= Berat setelah di abrasi (gr)
n	= Nilai rongga dalam campuran (*VITM*) (%)
P_{CA}	= Persentase campuran agregat kasar dalam total campuran aspal
P runtuh	= Beban puncak (kg)
q	= Nilai stabilitaas (kg)
r	= Nilai *flow* (mm)
r	= Indeks penurunan stabilitas (%)
S_1	= Stabilitas setelah direndam selama 0,5 jam

S_2 = Stabilitas setelah direndam selama 24 jam

S_1 = Rata-rata nilai *ITS* tanpa rendaman

S_2 = Rata-rata nilai *ITS* stelah perendaman 24 jam (kg)

t1+1 = Periode perendaman

V_s = Volume silinder takaran (m^3)

Ws = Berat silinder takaran (kg)

W_{S+W} = Berat silinder takaran dengan air (kg)

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

Y_W = Berat satuan agregat kasar dalam kondisi *dry-rodded* (kg/m3)

DAFTAR SINGKATAN

ANOVA	= *Analysis of Variance*
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 Agregate*
VCA	= *Void in Coarse Aggregate*
VCA_{DRC}	= *Void Coarse Aggregate Dry Rodded Condition*
VCA_{MIX}	= *Void Coarse Aggregate Mix*
BABB	= *Bottom Ash* Batu Bara
SNI	= Standar Nasional Indonesia
PLTU	= Pembangkit Listrik Tenaga Uap

ABSTRAK

Jalan merupakan infrastruktur penting untuk kemajuan ekonomi suatu negara. Pembangunan jalan di Indonesia perlu diperluas hingga ke desa untuk pemerataan ekonomi dan peningkatan kualitas hidup. Namun, masalah kualitas perkerasan dan terbatasnya dana sering dihadapi. Salah satu solusi untuk meningkatkan daya tahan jalan dan menekan biaya produksi adalah dengan memanfaatkan limbah, seperti *fly ash* dan *bottom ash* (limbah *FABA*) dari pembakaran batu bara di PLTU. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *bottom ash* sebagai substitusi *filler* terhadap kekuatan struktur, karakteristik volumetrik, dan durabilitas pada campuran *stone matrix asphalt.*

Penelitian dimulai dengan pengujian fisik bahan agregat dan aspal, lalu menentukan nilai KAO dengan parameter stabilitas, *flow*, *MQ*, *VITM*, *VMA*, *VCA*, *draindown*, dan *IRS*. Selanjutnya dilakukan pengujian berupa *marshall*, *ITS*, *TSR*, *IRS*, *VCA*, *draindown*, dan *cantabro loss* dengan substitusi *filler bottom ash* 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%.

Hasil penelitian penggunaan bottom ash sebagai pengganti *filler* pada campuran *SMA* menunjukkan perubahan karakteristik *Marshall* sebagai berikut, stabilitas meningkat pada kadar 50% (1020,53 kg), *flow* menurun pada kadar 50% (2,77 mm), *MQ* meningkat pada kadar 50% (368,88 kg/mm), *VITM* dan *VMA* meningkat pada kadar 100% (4,76% dan 18,44%), *VFWA* dan *density* menurun pada kadar 100% (75,10% dan 2,22 gr/cc). *IRS* meningkat pada kadar 50% (97,01%), *ITS* dan *TSR* meningkat pada kadar 100% (928,07 kpa dan 95,62%), *Cantabro Loss* menurun pada kadar 50% (4,99%), serta *draindown* menurun pada kadar 100% (0,06). Secara keseluruhan hasil pengujian substitusi *filler bottom ash* pada campuran *SMA* memenuhi syarat spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga *bottom ash* dapat digunakan sebagai pengganti bahan *filler*.

Kata kunci: *Battom Ash, Filler, Stone Matrix Asphalt*

ABSTRACT

Roads are essential infrastructure for a country's economic progress. Road development in Indonesia needs to be extended to villages for economic equality and improved quality of life. However, pavement quality problems and limited funds are often encountered. One solution to improve road durability and reduce production costs is to utilize waste, such as fly ash and bottom ash (FABA waste) from burning coal in PLTU. This study aims to determine the effect of bottom ash as a filler substitution on structural strength, volumetric characteristics, and durability in stone matrix asphalt mixtures.

The research started with physical testing of aggregate materials and asphalt, then determining the KAO value with the parameters of stability, flow, MQ, VITM, VMA, VCA, draindown, and IRS. Furthermore, tests were conducted in the form of marshall, ITS, TSR, IRS, VCA, draindown, and cantabro loss with 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% bottom ash filler substitution.

The results of the study on the use of bottom ash as a filler replacement in SMA mixtures showed changes in Marshall characteristics as follows, stability increased at 50% (1020.53 kg), flow decreased at 50% (2.77 mm), MQ increased at 50% (368.88 kg/mm), VITM and VMA increased at 100% (4.76% and 18.44%), VFWA and density decreased at 100% (75.10% and 2.22 gr/cc). IRS increased at 50% (97.01%), ITS and TSR increased at 100% (928.07 kpa and 95.62%), Cantabro Loss decreased at 50% (4.99%), and draindown decreased at 100% (0.06). Overall, the test results of bottom ash filler substitution in SMA mixtures meet the requirements of Bina Marga 2018 Revision 2 specifications, so bottom ash can be used as a substitute for filler materials

Keywords: *Battom Ash, Filler, Stone Matrix Asphalt*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan merupakan infrastruktur utama dalam meningkatkan ekonomi dan kemajuan suatu negara, Oleh karena itu pembangunan jalan di Indonesia harus lebih ditingkatkan hingga sampai plosok desa agar terjadi pemerataan ekonomi dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat Anshar dkk (2023) . Selain kendala akan kebutuhan material yang terus meningkat, tetapi juga sering menghadapi persoalan dana yang terbatas, olehkarena itu harus mencari cara dan bahan material yang paling efisien serta ekonomis untuk memperoleh suatu hasil pekerjaan yang maksimal.

Menutur Hartono dkk (2023) meningkatnya pemakaian listrik di Indonesia menyebabkan penggunaan batu bara sebagai sumber energi pada pembangkit tenaga listrik ataupun industri lainnya cukup besar. Penggunaan batu bara akan menghasilkan residu hasil pembakaran berupa *fly ash* (abu terbang) dan *bottom ash* (abu dasar) atau biasa disebut dengan limbah *FABA*. Indriyati dkk (2019) banyaknya jumlah residu hasil pembakaran akan menimbulkan permasalahan baru bagi lingkungan terutama pada saat proses pembuangannya dikarenakan limbah *FABA* dikategorikan sebagai limbah B3 yang berbahaya bagi manusia dan bisa mencemari lingkungan sekitar, maka dari itu diperlukan penanganan khusus untuk mengelolanya

Salah satu upaya untuk mengatasi kebutuhan akan bahan material yang semakin mahal dan limbah dari proses pembakaran batu bara yaitu dengan cara menjadikan *bottom ash* sebagai bahan pengganti *filler* perkerasan. Zulfhazli dkk (2016) menerangkan bahwa *bottom ash* batu bara terdiri dari partikel-partikel halus, gradasi dan kehalusan abu batu bara dapat memenuhi persyaratan gradasi untuk mineral *filler*. Pemanfaatan limbah abu *bottom ash* sudah cukup banyak digunakan sebagai bahan pengganti *filler* dalam campuran beraspal, berikut pengujian

terhadap *filler* terdahulu antara lain Lizar dkk (2021) sebagai *filler* campuran aspal *AC-WC,* Chasanah dan Sukmo (2023) sebagai *filler* campuran *AC-WC*, Syammaun dkk (2020) sebagai campuran perkerasan aspal porus, Wenur dkk (2023) sebagai *filler* campuran *HRS-WC,* Yuniarti dkk (2019) sebagai campuran perkerasan aspal panas, Hawari dan Lizar (2021) sebagai *filler* pengganti pada campuran *AC-WC*. Menurut Umboh, dkk (2024) *Filler* sendiri merupakan agregat yang lolos saringan No. 200 yang mempunyai fungsi sebagai bahan pengisi rongga antar agregat serta dapat meningkatkan stabilitas struktur jalan. *Filler* digunakan sebagai campuran perkerasan yang nantinya akan berpengaruh pada pembentukan tekstur jalan dan meningkatkan kekuatan struktural jalan. dalam penelitian ini limbah *bottom ash* batu bara digunakan sebagai pengganti bahan pengisi (*filler*) terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt*.

Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*), merupakan campuran beraspal panas yang memaksimalkan penggunaan agregat kasar dan kadar aspal yang tinggi, kemudian diisi campuran agregat halus, *filler*, dan aspal serta serat selulosa yang berfungsi untuk mereduksi pengaliran aspal yang disebabkan oleh kadar aspal yang cukup tinggi Purbanto (2022). Menurut Banafsaj dan Fauziah (2018) menjelaskan *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) merupakan jenis campuran aspal yang dirancang khusus untuk memberikan kinerja yang sangat baik dalam hal daya tahan, ketahanan terhadap retakan, dan ketahanan terhadap deformasi pada jalan serta memiliki ketahanan durabilitas yang baik. Sedangkan menurut Sombo dkk (2022) *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) merupakan inovasi dalam teknologi campuran aspal dan telah digunakan di seluruh dunia untuk memperpanjang masa pakai dan meningkatkan kinerja permukaan jalan. Penggunaan campuran *Stone Matrix Asphalt* sudah cukup banyak digunakan berikut beberapa pengujian terhaadap campuran *SMA* terdahulu antara lain, Hidayati dan Fauziah (2018) sebagai *filler* Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*), Hidayat dan Kushari (2019) sebagai *filler* Campuran *Stone Matrix Asphalt*.

Pada penelitian ini limbah *bottom ash* batu bara digunakan sebagai pengganti bahan pengisi (*filler*) terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt*. Penggunaan *bottom ash* batu bara juga belum banyak digunakan untuk konstruksi

perkerasan jalan. Maka dari itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kelayakan *bottom ash* batu bara sebagai *filler* atau bahan pengisi pada campuran *Stone Matrix Asphalt* .

Pada penelitian ini menggunakan metode pengujian *marshall test*, *Indirect Tensile Strength* (*ITS*), *Index of Retained Strength* (*IRS*), *Tensile Strength Ratio* (*TSR*), *Void in Coarse Aggregate* (*VCA*), *Draindown* dan *Cantabro Loss* untuk mengetahui karakteristik dan kekuatan campuran dengan menggunakan *filler bottom ash* batu bara sebagai bahan pengganti. Dilakukannya penilitian ini adalah *filler bottom ash* batu bara dapat memiliki kinerja dan kualitas yang setara atau bahkan lebih baik daripada *filler* konvensional seperti semen atau serbuk batu, sehingga pencemaran lingkungan yang ditimbulkan dari *bottoom ash* dapat berkurang dan menjadikan *bottom ash* sebagai bahan pengganti yang lebih mudah didapat, lebih murah, dan lebih berkelanjutan dari segi lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh pemakaian limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap kekuatan struktur pada campuran *Stone Matrix Asphalt?*
2. Bagaimana pengaruh pemakaian limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap parameter volumentrik pada campuran *Stone Matrix Asphalt*?
3. Bagaimana pengaruh pemakaian limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap durabilatas pada campuran *Stone Matrix Asphalt*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dirumuskan, Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh pemakaian limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap kekuatan struktur pada campuran *Stone Matrix Asphalt*.

2. Mengetahui pengaruh pemakaian limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap parameter volumetrik pada campuran *Stone Matrix Asphalt*.
3. Mengetahui pengaruh pemakaian limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap durabilitas pada campuran *Stone Matrix Asphalt*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui kelebihan dan kekurangan yang dihasilkan dari penggantian *filler* dengan menggunakan *bottom ash* batu bara dengan metode pencampuran *Stone Matrix Asphalt*.
2. Mengetahui apakah *bottom ash* batu bara dapat digunakan sebagai *filler* pada campuran perkerasan beton aspal secara optimal seperti *filler* abu batu.
3. Memberikan pemahaman dan pengetahuan tentang penggantian *filler* dengan menggunakan *bottom ash* batu bara dengan metode pencampuran *Stone Matrix Asphalt*.
4. Sebagai acuan atau referensi untuk penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan dari penelitian ini agar lebih terarah, tidak menyimpang dan tersusun dengan baik adalah sebagai berikut.

1. Bahan ikat yang digunakan adalah aspal Pertamina pen 60/70.
2. Dalam perencanaan dan pengujian campuran karakteristik campuran menggunakan metode *marshall standar*.
3. Agregat kasar dan halus diperoleh dari Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
4. Serat Selulosa yang digunakan adalah Viatop [66]
5. Pada penelitian ini tidak meneliti dan menguji kandungan kimia serat selulosa Viatop [66]

6. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah 5%, 5,5%, 6%, 6,5, dan 7%
7. *Filler* yang digunakan adalah *bottom ash* batu bara dengan kadar 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari berat agregat lolos saringan No. 200.
8. Limbah *bottom ash* batu bara diperoleh dari PLTU Batang
9. Tinjauan pengujian terhadap kekuatan struktur berdasarkan stabilitas, *flow, marshall quotient, dan ITS.*
10. Tinjauan pengujian pengujian terhadap karakteristik volumetrik campuran aspal berdasarkan *density, VITM, VFWA, VMA,* dan *VCA.*
11. Tinjauan pengujian terhadap durabilitas campuran aspal berdasarkan *IRS, TSR, draindown,* dan *cantabro Loss*
12. Pada penelitian ini mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 dan *ASSHTO* 2020.
13. Pengujian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
14. Penelitian ini tidak menguji kandungan unsur mineral yang terdapat pada *bottom ash* batu bara.
15. Pada penelitian ini tidak menguji stabilitas dinamis

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fungsi *Filler* Dalam Campuran Aspal Agregat Panas

Filler atau bahan pengisi merupakan agregat penyusun campuran lapis perkerasan jalan aspal yang mempunyai peran penting dalam menentukan sifat dan kandungan pada campuran aspal beton. *Filler* yang digunakan untuk penelitian ini adalah butiran halus yang lolos saringan no.200 yang berfungsi sebagai bahan pengisi rongga antar material agregat kasar dan halus dalam rangka mengurangi besarnya rongga, serta meningkatkan kerapatan dan stabilitas dari massa pada campuran.

Hawari dan Lizar (2021) telah melakukan penelitian tentang analisis pengaruh penggantian *filler* abu sawit *fly ash* dan *bottom ash* terhadap karakteristik perkerasan lentur (*AC-WC*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan variasi *filler* abu sawit pada campuran perkerasan lentur (*AC-WC*) dengan pengujian *Marshall*, Proporsi aspal yang digunakan pada campuran yaitu : 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%, 6,5% sementara untuk kadar *filler* yang digunakan yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%. Hasil Penelitian menunjukkan bahwa campuran *fly ash* dan *bottom ash* menurunkan stabilitas ketika dicampur dengan abu batu karena penggunaan kadar aspal efektif yang tidak optimal untuk abu batu dan kurangnya kecocokan dengan material *filler* pengganti. Nilai *flow* meningkat seiring dengan penambahan *fly ash* dan *bottom ash*. *Fly ash* lebih mudah dipadatkan dan memiliki nilai *VMA* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *bottom ash*. Namun, penyerapan aspal oleh bottom ash lebih tinggi, menyebabkan penurunan nilai *VFA*. *Bottom ash* juga memiliki nilai rongga dalam campuran yang lebih tinggi, menyebabkan penurunan stabilitas. Meskipun demikian, penambahan kadar aspal yang sesuai dapat meminimalkan nilai *marshall quotient*. Kesimpulannya, penggunaan *filler fly ash* lebih disukai daripada *bottom ash*.

Nugraha dan Agustapraja (2024) melakukan penelitian tentang Pengaruh Sekam Padi & Serbuk Kayu Sebagai Substitusi *Filler* pada Campuran Laston *AC-WC*. Dalam penelitian ini, *filler* Semen Portland diganti dengan abu sekam padi (ASP) dan abu serbuk kayu (ASK) sebagai eksperimen. Penggantian *filler* semen 2% dengan 2% ASP, 2% ASK, atau campuran 1% ASP dan 1% ASK sesuai Spesifikasi Umum 2010 (revisi 3) Seksi 6.3 tentang campuran beraspal panas. Hasil uji *marshall* menunjukkan stabilitas tertinggi 938,71 kg dan flow 2,83 mm dengan 2% ASP, lebih baik dari campuran standar 2% semen yang hanya 889,68 kg. Nilai *VIM* 3,57% memenuhi standar, tetapi menunjukkan campuran 2% ASP tidak kedap air. Didapatkan nilai *VMA* tinggi 23,30% menunjukkan banyaknya rongga pada campuran *AC-WC*, menyebabkan kekurangan kelekatan campuran aspal. yang dapat dibuktikan dari nilai *VFA* hanya 52,41%, tidak memenuhi standar karena rongga dapat terisi udara maupun air. Dengan 2% ASP, didapatkan nilai *marshall Quotient* 333,70 kg/mm memenuhi standar minimal 250 kg/mm, lebih baik dari campuran standar 2% semen yang hanya 258,23 kg/mm.

Wenur dkk (2023) melakukan penelitian tentang pengaruh variasi kandungan bahan pengisi *filler fly ash* batu bara pada campuran beraspal panas jenis lataston (*HRS-WC*). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak variasi kandungan *filler fly ash* pada campuran lataston *HRS-WC* melalui uji *Marshall*. dengan menggunakan persentase *fly ash* sebesar 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap berat *filler*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kadar Aspal Optimal (KAO) pada campuran *HRS-WC* didapatkan 7,35%, dengan menggunakan variasi kadar aspal antara 4% sampai 8%. Meskipun stabilitas campuran beraspal Lataston *HRS-WC* tanpa penggantian *fly ash* meningkat secara bertahap, pada kadar aspal 8% stabilitasnya menurun menjadi 1.176,25 kg. penambahan *fly ash* secara berkelanjutan dapat menyebabkan penurunan stabilitas campuran, menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* tidak meningkatkan ketahanan campuran terhadap deformasi. Penambahan *fly ash* juga menyebabkan penurunan nilai *flow* pada campuran Lataston *HRS-WC*. Namun, nilai *VMA* meningkat secara signifikan, karena *fly ash* menyebabkan peningkatan ruang yang tersedia untuk diselimuti oleh aspal, sehingga jarak antar rongga menjadi lebih besar. Namun, nilai *VIM* menurun

dengan penambahan *fly ash*, yang mengakibatkan rongga udara yang lebih besar dan mengurangi keawetan lapisan perkerasan

2.2 Pemanfaatan Limbah *Bottom ash* batu bara Sebagai Bahan Pengganti *Filler*

Semakin meningkatnya pembangunan infrastruktur terutama pembangunan jalan di setiap daerah yang digunakan sebagai akses utama bagi warga Indonesia dalam melakukan aktifitas dan kegiatan sehari-hari, menyebabkan peningkatan kebutuhan material perkerasan salah satunya adalah *filler*. Material yang sering digunakan untuk mengisi *filler* adalah abu batu pecah, kapur, dan *cement Portland*, dikarenakan material tersebut terbatas dan lumayan mahal maka diperlukan alternatif pengganti material *filler*. Salah satu material pengganti *filler* yang dapat dimanfaatkan yaitu *bottom ash* batu bara.

Bottom ash yang dipakai pada penelitian ini berupa residu hasil pembakaran batu bara berupa *fly ash* (abu terbang) dan *bottom ash* (abu dasar). Banyaknya jumlah residu tersebut akan menimbulkan permasalahan baru terhadap lingkungan terutama dalam proses pembuangannya karena dapat mencemari lingkungan sekitar serta memerlukan fasilitas pembuangan yang harganya relatif mahal.

Sugeha dkk (2018) melakukan penelitian tentang pemanfaatan limbah abu batu bara sebagai *filler* pada campuran laston. Perencanaan campuran dilakukan dalam dua tahap produksi. Tahap pertama melibatkan bahan pengisi standar, yaitu Semen *Portland*, untuk pembuatan benda uji. Tahap kedua melibatkan bahan pengisi alternatif, yaitu abu batu bara (*bottom ash*). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perbedaan antara campuran menggunakan *filler* abu batu bara dan semen portland dalam lapisan *AC-WC*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kedua campuran dengan *filler* yang berbeda memberikan hasil yang serupa dan memenuhi standar spesifikasi umum 2010 dari dinas pekerjaan umum direktorat jendral bina marga. Kekuatan campuran tidak dipengaruhi secara signifikan oleh penggunaan *filler* abu batu bara. Kadar aspal optimum yang dihasilkan dengan menggunakan *filler* abu batu bara (6,55%) sedikit lebih rendah daripada *filler* semen *portland* (6,85%).

Yofianti dkk (2023) melakukan penelitian tentang pemanfaatan *bottom ash* pltu air anyir sebagai material pengganti *filler* pada campuran beraspal *HRS-WC*, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi penggunaan *bottom ash* sebagai *filler* pada campuran *HRS-WC*. Variasi kadar aspal yang digunakan adalah 6,5%, 7%. 7,5%, 8%, dan 8,5%. Campuran beraspal HRS-WC yang menggunakan *bottom ash* sebagai bahan pengisi (*filler*) menghasilkan nilai KAO sebesar 7,95% dan nilai stabilitas campuran lebih besar dibandingkan dengan menggunakan *filler* semen. Jadi, *bottom ash* memiliki potensi sebagai alternatif *filler* pada campuran beraspal.

Umboh dkk. (2024) melakukan penelitian terkait pengaruh *bottom ash* batu bara sebagai pengganti *filler* terhadap kriteria *marshall* pada campuran aspal panas jenis lapis aspal beton (*HRS-WC*). Hasil pengujian *marshall* diperoleh nilai tertinggi untuk masing-masing karakteristik subtitusi *bottom ash* sebagai berikut. Nilai stabilitas 977,77 kg dengan kadar 10%, *Flow* 4,14 mm dengan kadar 100%, *VMA* 19,453% dengan kadar 10%, *VIM* 5,61% dengan kadar 10%, *VFB* 100% pada 100%, *marshall Quotients* 254,58 kg/mm dengan kadar 10%. Nilai stabilitas, *VMA*, *VIM* menurun seiring dengan meningkatnya kadar *filler bottom ash*. Sedangkan nilai *VFB* dan *marshall quotient* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kadar *filler bottom ash*. Hasil uji menunjukkan bahwa secara keseluruhan hasil pengujian berdasarkan karakteristik *marshall* terhadap substitusi *bottom ash* mempunyai nilai yang memenuhi syarat spesifikasi Bina Marga 2018, sehingga *bottom ash* dapat digunakan sebagai pengganti bahan pengisi (*filler*). Namun tidak dapat sepenuhnya atau 100% menggantikan bahan pengisi (*filler*) dengan *bottom ash*, dikarenakan berdasarkan pengujian nilai *VIM*, *VMA* dan *MQ* tidak memenuhi persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018.

2.3 Pemanfaatan *Filler* Sebagai Subtitusi Campuran *Stone Matrix Asphalt*

Stone Matrix Asphalt (*SMA*) merupakan campuran beraspal panas yang terdiri dari agregat halus, agregat kasar, dan mortar sebagai bahan pengikat aspal, serta campuran bahan tambahan *filler* mineral dan serat selulosa. Jenis campuran beraspal (*SMA*) dirancang khusus untuk memberikan kinerja yang baik dalam hal daya tahan, ketahanan terhadap retakan, dan ketahanan terhadap deformasi pada

jalan. Selain itu memiliki ketahanan yang tinggi terhadap beban lalu lintas dan cuaca ekstrem seperti hujan deras, banjir, atau salju. Sehingga campuran aspal *SMA* telah banyak digunakan di seluruh dunia untuk memperpanjang masa pakai dan meningkatkan kinerja permukaan jalan.

Tahir dkk (2018) melakukan penelitian tentang karakteristik *draindown* campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) yang menggunakan *filler* abu-batu dan semen. Penelitian ini bertujuan Untuk mengatuhi pengaruh *filler* semen dan abu batu terhadap sifat *draindown*. Variasi kadar *filler* semen yang dipakai untuk campuran yaitu mulai dari 0%, 20%, 40%, 60%, 80% dan 100%. Nilai *draindown* yang dihasilkan untuk setiap kadar *filler* semen berturut-turut adalah 0,136%, 0,236%, 0,784%, 1,455%, 1,066%, dan 1,697%. Hasil penelitian ini juga mendapatkan bahwa kadar maks *filler* semen yang dipakai dalam campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*), dimana nilai *draindown* masih memenuhi syarat spesifikasi adalah maksimum 20%.

Nrushal dan Karthik (2023) melakukan penelitian tentang *Performance Of Stone Matrix Asphalt With Waste Toner Binder and FGD Gypsum As Filler*. Studi ini menyelidiki penggunaan bubuk toner bekas, limbah dari industri percetakan, sebagai pengikat dalam campuran *SMA*, dan gypsum *FGD*, limbah dari desulfurisasi gas buang, sebagai *filler*. Studi tersebut mengevaluasi kinerja campuran *SMA* dalam hal stabilitas *Marshall*, kekuatan tarik tidak langsung, nilai *flow*, dan modulus elastis. Hasil awal menunjukkan bahwa penambahan pengikat toner bekas meningkatkan sifat *rheologis* pengikat dan meningkatkan kekakuan campuran *SMA*. Campuran *SMA* dengan pengikat toner bekas menunjukkan resistensi yang lebih baik terhadap kerusakan akibat kelembaban dibandingkan dengan campuran biasa. Secara kesimpulannya, temuan menunjukkan bahwa penggunaan pengikat toner bekas dan Gypsum *FGD* sebagai *filler* dalam campuran *SMA* menunjukkan potensi untuk meningkatkan kinerja campuran beraspal sambil mempromosikan praktik berkelanjutan dengan memanfaatkan bahan limbah.

Baby dkk (2023) telah melakukan penelitian tentang *Effect Of Coir Fiber On Stone Matrix Asphalt (Sma) With Marble Waste As Filler*. Studi ini menyelidiki

efek serat kelapa pada campuran *SMA*, dengan limbah marmer sebagai *filler*. Uji Stabilitas *marshall* dilakukan pada campuran *SMA* dan kadar aspal optimum diperoleh sebesar 5,84% dari grafik nilai pori udara. Dengan peningkatan nilai bitumen, stabilitas awalnya meningkat hingga mencapai 5,5% dan kemudian secara bertahap menurun dengan peningkatan lebih lanjut pada bitumen. Campuran *SMA* disiapkan dengan 0,2, 0,3, dan 0,4% serat sabut kelapa dari berat agregat dan uji *marshall* dilakukan. Ditemukan bahwa dengan penambahan serat kelapa, stabilitas campuran meningkat hingga 0,3% serat, sebesar 61,12% dibandingkan dengan campuran biasa, dan setelah 0,3%, stabilitas campuran ditemukan mengalami penurunan. Serat kelapa optimum adalah konten serat yang sesuai dengan stabilitas maksimum dan ditemukan sebesar 0,3%. Penambahan serat kelapa mengakibatkan penurunan nilai *flow*. Hal ini disebabkan karena campuran menjadi kurang fleksibel, akibat kekakuan serat dalam campuran. Oleh karena itu, limbah marmer dan serat kelapa merupakan alternatif ekonomis untuk konstruksi *SMA* dan dapat digunakan secara efektif untuk meningkatkan stabilitas campuran *SMA*.

2.4 Persamaan dan Perbandingan Penelitian Terkait Subtitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Perbandingan penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu dengan penelitian yang akan penyusun lakukan dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Persamaan dan perbandingan penelitian Terkait Subsitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Aspek	Peneliti						
	Tahir dkk (2018)	Wenur dkk (2023)	Nrushal dan Karthik (2023)	Umboh dkk (2024)	Gusti dkk (2022)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Peneliti
Judul	Karakteristik *Draindown* Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) Yang Menggunakan *Filler* Abu-Batu dan Semen	Pengaruh Variasi Kandungan Bahan Pengisi *Filler Fly Ash* Batu Bara Pada Campuran Beraspal Panas Jenis Lataston *Hot Rolled Sheet Wearing Course* (*HRS-WC*)	*Performance Of Stone Matrix Asphalt With Waste Toner Binder and FGD Gypsum As Filler*.	Pengaruh *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Pengganti *Filler* Terhadap Kriteria M*arshall* Pada Campuran Beraspal Panas Jenis Lapis Tipis Aspal Beton (*HRS-WC*)	Analasis Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) Dengan Serat Selulosa Serabut Kelapa	Pengaruh Abu Sekam Padi Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	Analisis pemanfaatan limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt*
Jenis Campuran	*Stone Matrix Asphalt*	Lataston *HRS-WC*	*Stone Matrix Asphalt*	*HRS-WC*	*Stone Matrix Asphalt*	*Stone Matrix Asphalt*	*Stone Matrix Asphalt*
Bahan Yang Digunakan	Abu-Batu dan Semen	*Fly Ash* Batu Bara	Limbah toner dan *FGD* Gypsum	*Bottom Ash* Batu Bara	Serat Selulosa Serabut Kelapa	Abu Sekam Padi	*Bottom Ash* Batu Bara
Pengujian	*Marshall* dan Uji *Drain-Down*	*Marshall*	*Marshall*, *ITS*,dan *UPV*	*Marshall*	*Marshall*	*Marshall, IRS, ITS, Poisson Ratio Cantabro Los*	*Marshall, IRS, ITS, TSR, VCA, Draindown*, dan *Cantabro Los*

Sumber : Tahir dkk (2018), Wenur dkk (2023), Nrushal dan Karthik (2023), Umboh dkk (2024), Gusti dkk (2022), Hidayati dan Fauziah (2018)

Lanjutan Tabel 2.1 Persamaan dan perbandingan penelitian Terkait Subsitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Aspek	Peneliti						
	Tahir dkk (2018)	Wenur dkk (2023)	Nrushal dan Karthik (2023)	Umboh dkk (2024)	Gusti dkk (2022)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Peneliti
Hasil	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *filler* abu-batu bersama dengan *filler* semen pada campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) dapat mempengaruhi karakteristik *drain-down* nya. Semakin tinggi kadar semen dalam campuran maka semakin tinggi pula nilai *drain-down* campuran *SMA* tersebut. Nilai *drain-down* yang diperoleh untuk setiap kadar *filler* semen berturut-	Hasil penelitian menunjukan bahwa dengan variasi kadar aspal pada persentase 4%, 5%, 6%, 7%, 8% diperoleh nilai kadar aspal optimal (KAO) pada campuran *HRS -WC* sebesar 7,35%. Sedangkan pengaruh *filler fly ash* terhadap sifat *marshall* menyebabkan nilai stabilitas campuran beraspal Lataston *HRS-WC* tanpa subtitusi *fly ash* terus mengalami peningkatan dan menurun pada kadar aspal 8% dengan nilai	Penelitian ini mengevaluasi kinerja campuran *SMA* dalam hal stabilitas *Marshall*, kekuatan tarik tidak langsung, nilai *flow*, dan modulus elastis. Hasil awal menunjukkan bahwa penambahan pengikat toner bekas meningkatkan sifat *rheologis* pengikat dan meningkatkan kekakuan campuran *SMA*. Campuran *SMA* dengan pengikat toner bekas menunjukkan	Hasil pengujian *Marshall* diperoleh nilai tertinggi untuk masing-masing karakteristik subtitusi *bottom ash* sebagai berikut. Nilai stabilitas 977,77 kg dengan kadar 10%, *Flow* 4,14 mm dengan kadar 100%, *VMA* 19,453% dengan kadar 10%, *VIM* 5,61% dengan kadar 10%, *VFB* 100% pada 100%, *marshall quotients* 254,58 kg/mm dengan kadar 10%. Nilai stabilitas, *VMA*, *VIM* menurun seiring dengan	Dari hasil pengujian di dapatkan nilai KAO sebesar 7,25%, kadar serabut kelapa optimal 0,3%, dimana nilai *marshall* didapatkan sebesar 1154,85 kg (>600 kg), nilai sisa *marshall* yaitu 96,57% (≥ 90%). Sifat *marshall* lainnya sudah memenuhi Spesifikasi Umum kementrian PUPR 2018. Nilai *Cantabro Abration Loss* (CAL) sebesar 2,1% (16%). Nilai *iIndirect Tensile Strength* (*ITS*)	Campuran aspal beton untuk perkerasan membutuhkan *filler* untuk meningkatkan kekuatan. Abu sekam padi (ASP), yang mengandung 86,90-97,30% silika, dieksplorasi sebagai *filler* alternatif. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh ASP sebagai *filler* pengganti pada campuran *SMA* 12,5 mm melalui uji *Marshall*, rendaman, *ITS*, *CL*, dan *Rasio Poisson*. Variasi ASP yang	Hasil pengujian *filler* BABB pada perkerasan *SMA*. Nilai stabilitas meningkat pada kadar 50% sebesar 1020,53 kg lalu menurun pada kadar 100% sebesar 945,34 kg, *Flow* menurun pada titik terendah pada kadar 50% sebesar 2,77 mm lalu mengalami kenaikan pada kadar 100% sebesar 3 mm, nilai *MQ* meningkat pada kadar 50% sebesar 368,88 kg/mm lalu mengalami penurunan pada kadar 100% sebesar 315,11

Sumber : Tahir dkk (2018), Wenur dkk (2023), Nrushal dan Karthik (2023), Umboh dkk (2024), Gusti dkk (2022), Hidayati dan Fauziah (2018)

Lanjutan Tabel 2.1 Persamaan dan perbandingan penelitian Terkait Subsitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Aspek	Peneliti						
	Tahir dkk (2018)	Wenur dkk (2023)	Nrushal dan Karthik (2023)	Umboh dkk (2024)	Gusti dkk (2022)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Peneliti
Hasil	turut adalah 0,136%, 0,236%, 0,784%, 1,455%, 1,066% dan 1,697%. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa kadar maks *filler* semen pada campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*) dimana nilai *drain-down* yang masih memenuhi spesifikasi yaitu sebesar 20%.	1.176,25kg. Namun dengan penambahan kadar *fly ash* pada campuran akan menurunkan stabilitas secara terus menerus. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* pada campuran tidak meningkatkan ketahanan campuran beraspal menahan deformasi . Nilai *flow* mengalami penurunan pada saat penambahan *fly ash* pada campuran lataston *HRS-WC*, nilai *VMA* pada penambahan *fly*	resistensi yang lebih baik terhadap kerusakan akibat kelembaban dibandingkan dengan campuran biasa. Secara kesimpulannya, menunjukkan penggunaan pengikat toner bekas dan Gypsum *FGD* sebagai *filler* dalam campuran *SMA* menunjukkan potensi untuk meningkatkan kinerja campuran beraspal sambil mempromosikan praktik berkelanjutan dengan	meningkatnya kadar *filler bottom ash*. Sedangkan nilai *VFB* dan *marshall quotient* semakin meningkat seiring dengan bertambahnya kadar *filler bottom ash*. Hasil uji menunjukkan bahwa secara keseluruhan hasil pengujian berdasarkan karakteristik *marshall* terhadap substitusi *bottom ash* mempunyai nilai yang memenuhi syarat spesifikasi Bina Marga 2018, sehingga *bottom ash* dapat	sebesar 110,22 kPa. Uji *drain-down* sebesar 0,021% (<0,3%) sedangkan pada benda uji tanpa penambahan serat tercapai nilai sebesar 2,09%.	diuji adalah 0%, 25%, 50%, dan 75%, berdasarkan standar Bina Marga (2010) dan AASHTO. Hasilnya menunjukkan peningkatan stabilitas hingga 49,382% pada ASP 50%, namun menurun pada 75%. Nilai *IRS* ASP 0% tidak memenuhi standar, sementara ASP 25%, 50%, dan 75% memenuhi. *ITS* meningkat pada ASP 25%, tetapi menurun dengan kadar ASP yang lebih tinggi. *Cantabro Loss*	kg/mm, nilai *VITM* meningkat pada kadar 100% sebesar 4,76%, nilai *VMA* meningkat pada kadar 100% sebesar 18,44% , nilai *VFWA* terus menurun sampai kadar 100% sebesar 75,10 %, *Density* terus menurun sampai kadar 100% sebesar 2,22 gr/cc. Lalu nilai *IRS* meningkat pada kadar 50% sebesar 97,01% lalu menurun pada kadar 100% sebesar 96,03 %, nilai *ITS* meningkat pada kadar 100%

Sumber : Tahir dkk (2018), Wenur dkk (2023), Nrushal dan Karthik (2023), Umboh dkk (2024), Gusti dkk (2022), Hidayati dan Fauziah (2018)

Lanjutan Tabel 2.1 Persamaan dan perbandingan penelitian Terkait Subsitusi *Filler* Terhadap Campuran Aspal

Aspek	Peneliti						
	Tahir dkk (2018)	Wenur dkk (2023)	Nrushal dan Karthik (2023)	Umboh dkk (2024)	Gusti dkk (2022)	Hidayati dan Fauziah (2018)	Peneliti
Hasil		*ash* pada campuran lataston *HRS-WC* meningkat signifikan, karena penambahan *fly ash* menyebabkan lebih besar ruang yang tersedia untuk diselimuti aspal sehingga jarak antara rongga menjadi besar, Nilai *VIM* menurun pada saat penambahan *fly ash* sehingga membuat rongga udara menjadi besar yang mengakibatkan berkurangnya keawetan lapisan perkerasan.	memanfaatkan bahan limbah	digunakan sebagai pengganti bahan pengisi (*filler*). Namun tidak dapat sepenuhnya atau 100% menggantikan bahan pengisi (*filler*) dengan *bottom ash*, dikarenakan berdasarkan pengujian nilai *VIM*, *VMA* dan *MQ* tidak memenuhi persyaratan spesifikasi Bina Marga 2018.		memenuhi standar hingga ASP 50%, namun pada ASP 75% melebihi batas. Rasio *Poisson* meningkat dengan kadar ASP yang lebih tinggi.	sebesar 928,07 kpa, nilai *TSR* meningkat pada kadar 100% sebesar 95,62%, nilai *CL* menurun pada kadar 50% sebesar 4,99% lalu naik pada kadar 100% sebesar 5,40%, nilai *Draindown* menurun pada kadar 100% sebesar 0,06. keseluruhan hasil pengujian menunjukkan substitusi *filler* BABB pada campuran *SMA* mempunyai nilai yang memenuhi syarat spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2.

Sumber : Tahir dkk (2018), Wenur dkk (2023), Nrushal dan Karthik (2023), Umboh dkk (2024), Gusti dkk (2022), Hidayati dan Fauziah (2018)

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Lentur Jalan

Perkerasan lentur jalan menurut Sukirman (1999) merupakan jenis konstruksi perkerasan jalan yang dirancang untuk menahan beban lalu lintas dan mendistribusikannya ke struktur dibawahnya dengan cara menyebarkannya. Perkerasan lentur biasanya terdiri dari beberapa lapis material, termasuk agregat, aspal, dan bahan lainnya yang memungkinkannya untuk menyerap tekanan, fleksibel, dan lentur. Struktur pada perkerasan jalan memiliki beberapa lapisan yang bertujuan agar pada setiap lapisan memberikan suatu komposisi yang mempunyai daya dukung dan keawetan yang baik, serta memberikan nilai yang ekonomis.

Menurut Sukirman (1999) jenis perkerasan dibagi menjadi 3 berdasarkan bahan pengikatnya antara lain sebagai berikut :

1. Perkerasan lentur (*flexible pavement*) merupakan jenis perkerasan jalan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat utama. Struktur perkerasan lentur dirancang untuk menopang dan mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar, yang terdiri dari berbagai lapisan.
2. Perkerasan kaku (*rigid pavement*) adalah jenis konstruksi jalan yang terdiri dari lapisan beton yang ditempatkan di atas pondasi yang kokoh. Perkerasan ini disebut "kaku" karena beton memiliki kekakuan yang tinggi, sehingga mampu menahan beban lalu lintas dan mendistribusikannya ke bawah tanah dengan cara yang berbeda dibandingkan perkerasan lentur.
3. Perkerasan komposit (*composite pavement*) adalah jenis perkerasan kaku yang dikombinasikan dengan perkerasan lentur. Perkerasan komposit ini dibentuk dengan menggabungkan karakteristik dan keunggulan dari masing-masing jenis perkerasan untuk menciptakan sebuah struktur yang lebih kuat, tahan lama, dan efisien.

3.2 Limbah *Bottom Ash* Batu bara

Batu bara adalah salah satu jenis bahan bakar fosil yang berasal dari endapan tumbuhan purba yang mengalami transformasi kimia dan fisika selama jutaan tahun. Batu bara terbentuk dari proses pemadatan dan transformasi tumbuhan yang terperangkap di dalam lapisan sedimen bumi. Pengolahan batu bara menghasilkan dua tipe abu antara lain *fly ash* dan *bottom ash* atau biasa dikenal dengan (*FABA*). *Fly ash* merupakan abu sisa yang dihasilkan dari residu pembakaran batu bara yang tersusun dari partikel-partikel halus. Pembakaran batu bara di dalam *boiler* menghasilkan abu sisa yang mengapung dikarenakan berat jenisnya yang begitu ringan atau biasa disebut dengan *fly ash* Indrayanti dkk (2019).

Sedangkan menurut Santoso dkk (2004) *Bottom ash* merupakan limbah hasil pembakaran batubara, dengan ukuran partikel lebih besar dan lebih berat dibandingkan *fly ash*, sehingga *bottom ash* akan jatuh ke dasar tungku pembakaran (*boiler*) lalu terakumulasi pada alat pengumpul debu (*ash hopper*), setelah itu dikeluarkan dengan cara disemprot dengan air untuk kemudian dibuang atau dipakai sebagai bahan tambahan pada perkerasan jalan. Menurut penelitian Wardhono (2018) karakteristik pada limbah *bottom ash* di uji dengan melibatkan analisis kandungan kimia menggunakan metode uji *X-Ray Fluorescence* (*XRF*). Berdasarkan hasil uji tersebut, ditemukan bahwa kandungan kimia terbesar dalam *bottom ash* adalah besi, mencapai 57,71%. Kemudian diikuti oleh kandungan silikon sebesar 19,6%,dan selanjutnya kandungan aluminium sebesar 4,5%. Hasil uji *XRF bottom ash* dapat dilihat pada table 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Hasil Uji *XRF Bottom Ash*

No.	Komponen	Kadar (%)	No.	Komponen	Kadar (%)
1	Al	4,5 +/- 0,1	10	Ni	1,18 +/- 0,02
2	Si	19,6 +/- 0,2	11	Cu	0,21 +/- 0,004
3	K	1,0 +/- 0,01	12	Zn	0,02 +/- 0,01
4	Ca	7,56+/-0,02	13	Rb	0,33 +/- 0,01
5	Ti	1,1 +/- 0,003	14	Sr	0,9 +/- 0,03
6	V	0,06 +/- 0,004	15	Mo	2,9 +/- 0,02
7	Cr	0,28 +/- 0,005	16	Ba	0,37 +/- 0,004
8	Mn	0,51 +/- 0,009	17	Eu	0,5 +/- 0,03
9	Fe	57,71 +/- 0,05	18	Re	0,3 +/- 0,04

Sumber : Wardhono (2018)

Sementara *Coal bottom ash/boiler slag*-material *description* (2000) dalam Kinasti (2017) telah melakukan penelitian tentang sifat fisik penciri dari *bottom ash* yang dapat dilihat pada table 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.2 Sifat Fisik Penciri dari *Bottom Ash*

Sifat Fisik *Bottom Ash*	*Wet*	*Dry*
Bentuk	Angular / bersiku	Berbutir kecil / granular
Warna	Hitam	abu-abu gelap
Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus, sangat berpori
Ukuran (%lolos ayakan)	No. 4 (90-100%)	1,5 sd ¾ in (100%)
	No. 10 (40-60%)	No. 4 (50-90%)
	No. 40 (10%)	No. 10 (10-60%)
	No. 200 (5%)	No. 40 (0-100%)
Specific Gravity	2,3 – 2,9	2,1 – 2,7
Dry Unit Weight	960 -1440 kg/m^3	720 – 1600 kg/m^3
Penyerapan	0,3 -1,1%	0,8 -2,0%

Sumber : *Coal Bottom Ash/Boiler Slag-Material Description* (2000)

3.3 Bahan Penyusun Perkerasan Lentur

Bahan penyusun yang digunakan untuk perkerasan lentur mempunyai karakteristik yang berbeda-beda antara lain adalah aspal, agregat, *filler*, dan bahan tambah lainnya menyesuaikan dengan jenis campuran penelitian. Maka dari itu, sebelum menggunakan material tersebut sebagai bahan dasar penyusun perkerasan lentur, sifat-sifat dari material tersebut harus diketahui terlebih dahulu. Berikut merupakan penjelasan dari setiap bahan yang digunakan untuk perkerasan lentur jalan.

3.3.1 Aspal

Aspal merupakan bahan berbentuk padat atau setengah padat yang mempunyai warna hitam hingga coklat gelap, bersifat perekat (*cementious*) yang akan menjadi lembek dan meleleh apabila dipanasi. sehingga pada saat disemprotkan atau dicampurkan pada perkerasan jalan dapat meresap serta melapisi agregat secara menyeluruh hingga rongga-rongga terkecil dan menjadikan perkerasan jalan dapat menjadi kuat karena agregatnya yang saling mengikat satu sama lain.

Aspal dibuat dari minyak mentah, baik melalui proses penyulingan atau dapat ditemukan di alam bersama dengan bahan material lainnya. Aspal juga sering di gunakan sebagai bahan pengikat pada campuran beraspal, yang terbentuk dari senyawa kompleks seperti *Resins*, *Oils*, dan *Asphaltenese*. Berikut merupakan ketentuan untuk aspal keras dapat dilihat pada table 3.3 dibawah ini.

Tabel 3.3 Ketentuan-Ketentuan Aspal Keras

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe 1 Aspal Pen. 60/70
1	Penetrasi pada 25C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60 - 70
2	Titik Lembek (ºC)	SNI 2434:2011	≥ 48
3	Daktilitas pada 25ºC, (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100
4	Titik Nyala (ºC)	SNI 2433:2011	≥ 232
5	Kelarutan dalam *Trichloroethylene* (%)	AASHTO T44-14	≥ 99
6	Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥ 1,0

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga 2018.

3.3.2 Agregat

Agregat merupakan komponen penting dari struktur perkerasan jalan, yang terdiri dari berbagai jenis bahan padat seperti kerikil, batu pecah, pasir, agregat halus dan material alam lainnya. Agregat berfungsi sebagai bahan pengisi yang memberikan kekuatan, stabilitas, dan volume dalam campuran beton dan aspal, yang nantinya akan mempunyai peranan penting dalam menahan beban lalulintas. Oleh karena itu kualitas perkerasan jalan dapat ditentukan dari pemilihan agregat, sifat agregat, serta hasil pencampuran agregat dengan material yang lain. Agregat dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan ukuran butirannya.

1. Agregat kasar

Agregat kasar adalah agregat yang tertahan pada saringan No.4 (4,75) yang terdiri dari partikel atau batu pecahan yang keras. Agregat kasar digunakan sebagai bahan perkerasan, dikarenakan mampu membuat perkerasan lebih stabil serta mempunyai ketahanan glincir yang tinggi sehingga dapat meningkatkan keamanan dan kenyamanan sewaktu berkendara. Persyaratan agregat kasar yang dipakai pada perkerasan dapat dilihat pada Table 3.4.

Tabel 3.4 Persyaratan Agregat Kasar Pada Campuran *SMA*

No	Pengujian		Standar	Nilai
1	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan natrium atau magnesium sulfat		SNI 3407:2008	Maks.12 %
2	Abrasi dengan mesin *Los Angeles*	Campuran *AC* Modifikasi dan *SMA*	SNI 2417:2008	Maks.30%
3	Semua jenis campuran aspal bergradasi lainnya.		SNI 2417:2008	Maks.40%
4	Kelekatan agregat terhadap aspal		SNI 2439:2011	Min. 95 %
5	Butir Pecah pada Agregat Kasar		SNI 7619:2012	100/90*
6	Material lolos ayakan No.200		SNI ASTM C117:2012	Maks.1 %
7	Partikel pipih dan lonjong		SNI 8287 : 2016 (1:5)	Maks.5 %

Catatan : (*) 100/90 menunjukan bahwa 100% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah satu atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah dua atau lebih.

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga 2018.

2. Agregat Halus

Agregat halus merupakan agregat yang mempunyai ukuran butiran lolos saringan No.4, agregat halus berperan sebagai pengisi ruang di antara agregat kasar dan partikel lain dalam campuran aspal atau beton. Ini membantu menciptakan campuran yang lebih padat dan homogen. Persyaratan agregat halus dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 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 : Direktorat Jendral Bina Marga 2018.

3. Bahan Pengisi (*Filler*)

Filler merupakan butiran halus yang lolos saringan no.200 (0,075 mm) yang berfungsi sebagai bahan pengisi rongga antar material agregat kasar dan halus

dalam rangka mengurangi besarnya rongga, serta meningkatkan kerapatan dan stabilitas dari massa pada campuran. Material *filler* biasanya terdiri dari abu batu, abu batu kapur, semen (*Portland Cement*) atau bahan lainnya.

3.3.3 Gradasi Agregat

Gradasi agregat bisa diartikan sebagai susunan ukuran dari butir agregat yang dikelompokkan berdasarkan ukurannya. Gradasi agregat diperoleh dari hasil pengujian dan analisis satu set saringan, dimana saringan terbesar berada pada bagian atas dan semakin mengecil kebawah. Gradasi agregat yang baik sangat mempengaruhi kekuatan, stabilitas, dan ketahanan pada perkerasan jalan. Persyaratan gradasi agregat bisa dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 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 : Direktorat Jendral Bina Marga 2018.

3.3.4 Bahan Aditif

Bahan adiktif adalah bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam material utama untuk meningkatkan atau memodifikasi sifat fisik, kimia, atau mekanik dari campuran tersebut. Dalam campuran *Stone Matrix Asphalt* (*SMA*), bahan adiktif memiliki peran penting dalam memperbaiki kualitas dan kinerja perkerasan jalan. Fungsi utama dari bahan adiktif ini meliputi peningkatan daya rekat antara agregat dan aspal, sehingga menciptakan ikatan yang lebih kuat dan tahan lama. Selain itu, bahan adiktif juga membantu meningkatkan fleksibilitas campuran, mengurangi kerapuhan, dan mencegah terjadinya retak, terutama pada suhu rendah. Penggunaan

adiktif juga dapat mengurangi permeabilitas campuran, mencegah infiltrasi air yang dapat merusak struktur perkerasan.

Dalam campuran perkerasan *Stone Matrix Asphalt* sering kali menggunakan serat selulosa Viatop^{66} sebagai alternatif bahan aditif tambahan yang fungsinya meliputi peningkatan adhesi antara agregat dan aspal, yang sangat penting untuk memastikan daya rekat yang baik dan mencegah kerusakan akibat pengaruh cuaca dan beban lalu lintas. Selain itu, Serat selulosa Viatop^{66} berfungsi untuk mengurangi kerapuhan campuran, meningkatkan fleksibilitas, serta ketahanan terhadap retak, sehingga perkerasan *SMA* menjadi lebih tahan lama, terutama dalam kondisi suhu yang ekstrem. Pengaruh Viatop^{66} di perkerasan *SMA* sangat signifikan, karena dapat meningkatkan stabilitas campuran terhadap deformasi dan memperpanjang umur layanan perkerasan. Viatop66 terdiri dari *arbocel* dan bahan tambahan lainnya, dikemas dalam bentuk butiran silinder berwarna abu-abu gelap. *Arbocel* adalah serat selulosa yang juga digunakan sebagai aditif dalam campuran aspal panas. Tegalaksana, (1994) menjelaskan persyaratan serat selulosa yang baik, persyaratan serat selulosa dapat dilihat pada Tabel 3.7. berikut karakteristik Viatop^{66} :

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 solvent : baik pada kondisi normal

persyaratan dari serat serulosa bisa dilihat pada tabel 3.7 sebagai berikut.

Tabel 3. 7 Persyaratan Serat Selulosa

Pengujian	Satuan	Persyaratan
Serat :		
Panjang Serat	mm	6,35
Lolos ayakan No. 20	%	85 ± 10
No. 40	%	40 ± 10
No. 140	%	30 ± 10
pH	-	7,5 ± 1,0

Lanjutan Tabel 3. 8 Persyaratan Serat Selulosa

Absorsi 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 : Direktorat Jendral Bina Marga 2018.

3.4 Campuran *Stone Matrix Asphalt*

Stone matrix asphalt (*SMA*) merupakan salah satu jenis campuran beraspal panas yang bisa digunakan untuk lapis permukaan dengan beberapa karateristik lapisan yang dapat memberikan beberapa keuntungan bagi pengemudi dikarenakan mempunyai ketahanan gelincir yang cukup tinggi. Campuran *SMA* memakai gradasi agregat hampir seragam sehingga mempunyai ketahanan yang baik terhadap deformasi, maka dari itu campuran *SMA* lebih cocok untuk menahan beban kendaraan berat. Persyaratan *Stone Matrix Asphalt* dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.9 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 tempratur 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.	90	
Stabilitas dinamis, lintasan/mm	Min.	2500	3000

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga 2018.

3.5 Karakteristik Beton Aspal

Beton aspal merupakan jenis perkerasan jalan yang terbuat dari beberapa campuran agregat dan aspal secara homogen, baik dengan bahan tambahan ataupun

tidak. Bahan material pembentuk beton aspal dicampur di dalam instalasi pencampur dengan suhu yang telah ditentukan, Lalu diangkut ke lokasi untuk dihamparkan, dan dipadatkan (Sukirman, 2016). Berikut merupakan karakteristik campuran yang harus dimiliki oleh beton aspal :

3.5.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas (*Stability*) bisa diartikan sebagai kemampuan suatu perkerasan jalan dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk secara permanen seperti alur, gelombang, dan blending. Kebutuhan stabilitas jalan menyesuaikan dengan kebutuhan jalan, untuk jalan dengan kepadatan lalu lintas tinggi maka diperlukan perkerasan jalan dengan stabilitas yang tinggi, begitu pula sebaliknya. Stabilitas dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti gesekan internal yang terjadi diantara butiran agregat yang saling mengunci dan kohesi merupakan gaya ikat aspal yang berasal dari daya lekatnya, sehingga dapat menjaga kelekatan antar butir agregat.

3.5.2 Keawetan (*Durability*)

Keawetan (*Durability*) merupakan kemampuan beton aspal dalam menahan beban lalu lintas yang berulang seperti beban kendaraan, gesekan antar roda kendaraan dengan muka jalan, dan dapat menahan kerusakan yang disebabkan pengaruh dari kondisi iklim dan cuaca, seperti air, udara, atau perubahan temperatur. keawetan beton aspal dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti banyaknya rongga pada campuran, ketebalan selimut aspal, kepadatan dan kekedapan campuran terhadap air. (Sukirman, 2016).

3.5.3 Kelenturan (*Flexibility*)

Kelenturan (*Flexibility*) merupakan kemampuan beton aspal dalam menahan deformasi atau penyesuaian terhadap beban yang diberikan, termasuk beban lalu lintas dan perubahan suhu. Ini adalah sifat penting dalam perkerasan jalan karena campuran aspal harus mampu menahan deformasi tanpa mengalami kerusakan yang signifikan. Sehingga meminimalkan kerusakan dan mengurangi biaya perawatan. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kelenturan dalam beton aspal yaitu jenis aspal yang digunakan, komposisi campuran, kepadatan campuran, serta suhu

lingkungan. Pemilihan bahan tambah seperti aditif pengembang dan serat juga dapat memengaruhi sifat kelenturan dari campuran aspal.

3.5.4 Kekesatan (*Skid Resistance*)

Kekesatan (*Skid Resistance*) merupakan kemampuan permukaan jalan untuk memberikan daya cengkram yang memadai akibat gaya gesek antara ban kendaraan dan permukaan jalan, terutama saat kondisi jalan basah atau licin. hal ini merupakan faktor penting dalam keamanan berkendara karena mempengaruhi kemampuan pengendara untuk mengontrol kendaraan dan menghindari kecelakaan. Kekesatan ditentukan oleh beberapa faktor yaitu kekasaran permukaan butir agregat, luas bidang antar butir, gradasi agregat, bentuk butir agregat, tebal film aspal, dan kepadatan campuran beraspal. Permukaan jalan dengan tekstur yang kasar dan berpori dapat meningkatkan daya tahanan geser, sedangkan permukaan yang halus dan licin dapat menurunkan daya tahanan geser permukaan jalan.

3.5.5 Ketahanan Terhadap Kelelehan (*Fatigue Resistance*)

Ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) merujuk pada kemampuan beton aspal untuk menahan lendutan berulang akibat beban lalu lintas tanpa mengalami kelelahan seperti terbentuknya alur atau retakan. Untuk mencapai sifat ini, peningkatan kadar aspal menjadi solusi yang dianjurkan (Sukirman, 2016). Dengan kata lain, beton aspal yang memiliki kandungan aspal yang lebih tinggi cenderung memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kelelahan, mengurangi risiko terbentuknya kerusakan seperti alur atau retakan akibat beban lalu lintas yang berulang-ulang.

3.5.6 Kedap Air (*Impermeabilitas*)

Kedap air (*impermeabilitas*), adalah kemampuan beton aspal untuk menahan penetrasi air maupun udara ke dalam struktur beton aspal. Penetrasi air dan udara dapat mempercepat proses penuaan aspal serta menyebabkan pengelupasan film atau lapisan aspal dari permukaan agregat. Jumlah rongga yang tersisa setelah proses pemadatan beton aspal dapat digunakan sebagai indikator tingkat kedapannya. Secara umum, semakin tinggi tingkat kedap air suatu campuran beton

aspal, maka akan semakin rendah tingkat kerentanannya terhadap kerusakan atau penurunan durabilitasnya.

3.5.7 Kemudahan Pelaksanaan (*Workability*)

Kemudahan dalam pelaksanaan atau *workability* merupakan kemampuan campuran beton beraspal untuk dengan mudah dipadatkan dan dihamparkan pada saat proses pembuatan jalan. Tingkat kemudahan dalam pelaksanaan ini memiliki dampak langsung terhadap efisiensi pekerjaan. Beberapa faktor yang memengaruhi tingkat kemudahan dalam proses penghamparan dan pemadatan meliputi viskositas aspal, sensitivitas aspal terhadap perubahan suhu, serta distribusi ukuran dan kondisi agregat. Jika ditemukan kesulitan dalam pelaksanaan, revisi atau penyesuaian terhadap desain campuran dapat dilakukan untuk memperbaiki situasi tersebut. Dengan demikian, *workability* yang baik dari campuran beton aspal dapat meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek konstruksi.

3.6 Parameter Pengujian *Marshall Test*

Pengujian *marshall* merupakan sebuah metode yang digunakan untuk mengevaluasi berbagai karakteristik dari campuran aspal panas menggunakan alat *Marshall*. Beberapa karakteristik yang diukur dalam pengujian ini mencakup stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *VMA* (*Void in Mineral Aggregate*), serta kepadatan (*density*).

3.6.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas adalah kemampuan perkerasan untuk menahan deformasi akibat beban lalu lintas tanpa mengalami perubahan bentuk seperti gelombang atau alur, hingga mencapai titik kelelehan plastis yang diukur dalam satuan kilogram. Tingkat stabilitas dipengaruhi oleh sejumlah faktor termasuk tekstur permukaan agregat, distribusi ukuran agregat, kepadatan campuran, dan jumlah aspal yang digunakan. Dengan demikian, nilai stabilitas mencerminkan kemampuan perkerasan untuk menghadapi beban lalu lintas dengan baik tanpa mengalami kerusakan yang signifikan Chasanah (2023). Nilai stabilitas dapat diperoleh dengan Persamaan 3.1, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai stabilitas dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.

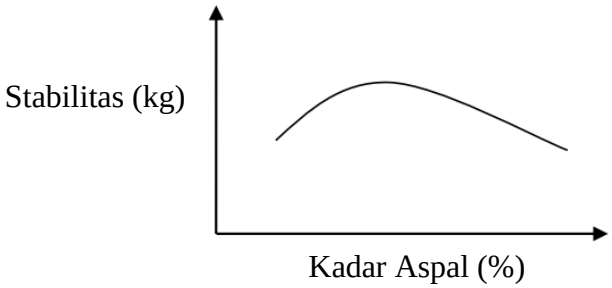
$q = p \; x \; s$ (3.1)

Keterangan :

q = angka stabilitas (kg)

p = pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat, dan

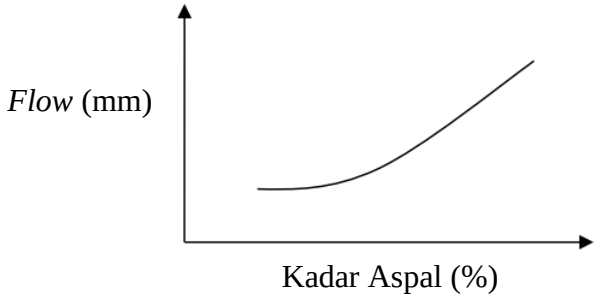
s = angka koreksi tebal benda uji.



Gambar 3.1 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai Stabilitas
(Sumber : Sukirman, 1992)

3.6.2 Kelelahan (*Flow*)

Flow adalah kondisi di mana suatu campuran mengalami perubahan bentuk sebagai respons terhadap beban, hingga mencapai titik kehancuran, yang diukur dalam satuan panjang (milimeter). Kehancuran campuran menunjukkan tingkat elastisitas lapisan perkerasan, dan tingkat kehancuran ini terutama dipengaruhi oleh sifat-sifat aspal, khususnya sifat daktalitasnya. Aspal dengan daktalitas rendah dalam campuran cenderung menghasilkan lapisan perkerasan yang kurang fleksibel Chasanah (2023). grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai kelelehan dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dan Nilai *Flow*
(Sumber : Sukirman, 1992)

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

VMA adalah persentase rongga di antara butiran-butiran agregat dalam campuran, yang juga bisa diartikan sebagai persentase ruang yang dapat diisi oleh aspal dan udara. Nilai *VMA* dipengaruhi oleh distribusi ukuran agregat, intensitas penghancuran butiran, dan kandungan aspal. Tingkat *VMA* memengaruhi sifat kedap air dan ketahanan campuran terhadap pengaruh air dan udara. Semakin tinggi nilai *VMA*, semakin besar kemampuan campuran untuk menahan penetrasi air dan udara, yang pada akhirnya akan meningkatkan keawetannya Chasanah (2023). Nilai *VMA* dapat diperoleh dari Persamaan 3.2 dan 3.3, sedangkan grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *VMA* dapat dilihat pada Gambar 3.3.

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

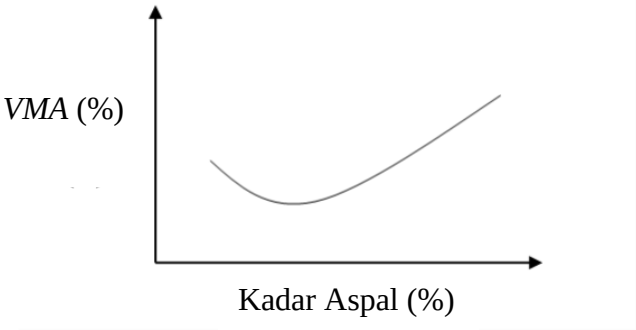
$$j = \frac{(100 - b)\ x\ \mathrm{g}}{BJ\ Agregat} \tag{3.3}$$

Keterangan :

l = nilai *VMA* (%),

b = persentase aspal terhadap campuran (%), dan

g = berat isi sampel (gr/cc).



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

3.6.4 Kepadatan (*Density*)

Kepadatan atau *density* adalah ukuran kepadatan suatu campuran setelah melalui proses pemadatan. Semakin tinggi nilai kepadatan menunjukkan semakin

baiknya kerapatan campuran tersebut. Nilai dari kepadatan dipengaruhi oleh bahan penyusun, kadar aspal, gradasi campuran, temperature pemadatan, dan jumlah pemadatan pada suatu campuran. Nilai *density* dapat diperoleh dari Persamaan 3.4 dan 3.5, grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *density* dapat dilihat pada Gambar 3.4.

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

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

Keterangan :

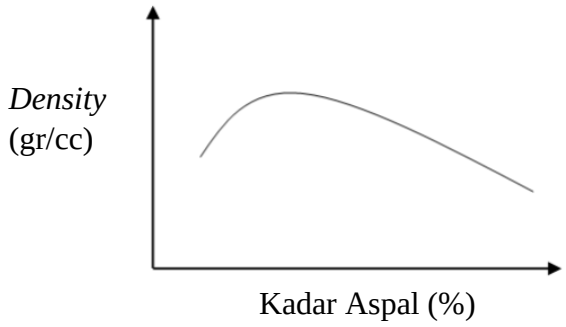
g = nilai *density* (gr/cc),

c = berat benda uji sebelum direndam (gr),

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

e = berat dalam air (gr), dan

f = volume / isi (cm^3).



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

3.6.5 *Marshall Quotient (MQ)*

Marshall Quotient adalah hasil bagi antara stabilitas dan kelelehan (*flow*) dalam pengujian *Marshall*. Nilai *marshall quotient* sering digunakan untuk memperkirakan fleksibilitas suatu lapis perkerasan. Stabilitas yang tinggi dan kelelehan yang rendah cenderung menghasilkan perkerasan yang kaku dan rapuh, sementara stabilitas yang rendah dan kelelehan yang tinggi cenderung membuat

perkerasan lebih rentan terhadap deformasi. Oleh karena itu, nilai *marshall quotient* menjadi indikator penting dalam mengevaluasi karakteristik mekanik dan struktural dari suatu perkerasan. Nilai *MQ* dapat diperoleh dari Persamaan 3.6, sementara grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *MQ* dapat dilihat pada Gambar 3.5.

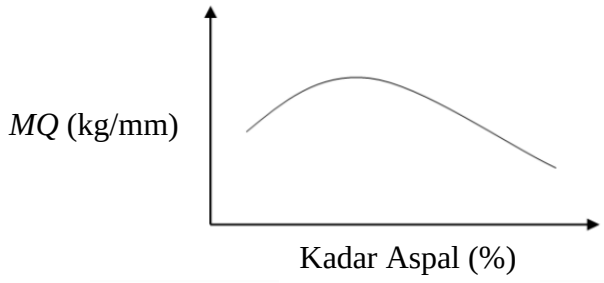
$$MQ = \frac{q}{r} \tag{3.6}$$

Keterangan :

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

q = nilai stabilitas (kg), dan

r = nilai *flow* (mm).



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

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

VITM adalah ukuran persentase rongga yang ada dalam suatu campuran, dibandingkan dengan total volume aspal dan agregat. Campuran dengan nilai *VITM* yang rendah cenderung meningkatkan risiko terjadinya *bleeding*. Pada suhu yang tinggi, aspal dalam campuran dapat mencair, sehingga saat perkerasan menerima beban, aspal dapat mengalir di antara rongga-rongga agregat Chasanah (2023). Nilai *VITM* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.7 dan Persamaan 3.8, sementara grafik yang menunjukan hubungan antara kadar aspal dan nilai *VITM* dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.

$$n = 100 - \left(100 - \frac{g}{h}\right) \quad (3.7)$$

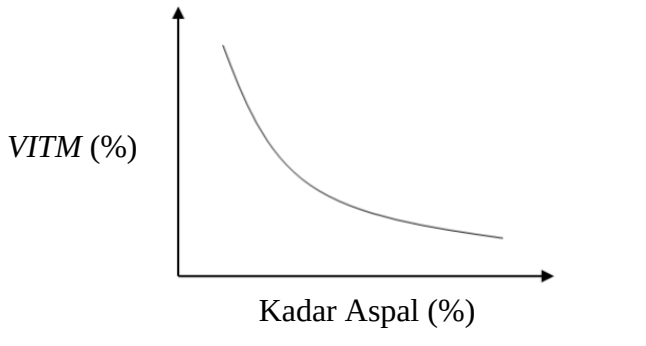
$$h = 100 - \left(\frac{100}{\left(\frac{\%\ Agregat}{BJ\ Agregat} + \frac{\%\ Aspal}{BJ\ Aspal}\right)}\right) \quad (3.8)$$

Keterangan :

n = nilai *VITM* (kg/mm)

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

h = berat jenis maksimum teoritis campuran.



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

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

VFWA merupakan proporsi rongga yang terisi oleh aspal dalam campuran setelah proses pemadatan. Tingkat *VFWA* memengaruhi kemampuan campuran untuk menjadi kedap air, yang memengaruhi masa pakai perkerasan. Faktor-faktor seperti distribusi ukuran agregat, konsentrasi aspal, serta metode dan suhu pemadatan dapat memengaruhi nilai *VFWA* Chasanah (2023). Nilai *VFWA* dapat diperoleh dari persamaan 3.9 sampai 3.13, grafik hubungan antara kadar aspal dan nilai *VFWA* dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.

1. Persentasi aspal terhadap campuran

$$b = \frac{a}{100 + a} \text{ x } 100 \quad (3.9)$$

keterangan :

a = persentasi aspal terhadap batuan, dan

b = persentasi aspal terhadap campuran.

2. Persentasi aspal terhadap agregat

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

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

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

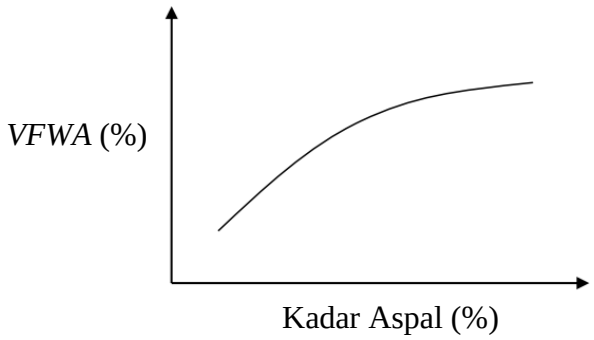
$$j = \left(\frac{(100 - b)\ x\ g}{BJ\ Agregat}\right) \tag{3.13}$$

keterangan :

m = *VFWA* (%),

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

b = persentase aspal terhadap campuran.



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

3.7 Pengujian *Cantabro Loss (CL)*

Pengujian *Cantabro loss* bertujuan untuk mencaritahu ketahanan sebuah benda uji terhadap keausan dengan menggunakan mesin *Los Angeles*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui seberapa tahan campuran tersebut terhadap

dampak beban lalu lintas yang berulang, yang dapat menyebabkan perkerasan menjadi aus dan mengalami penurunan kekuatan. Sebelum dimasukkan ke dalam drum mesin *Los Angeles*, benda uji didiamkan selama 48 jam pada suhu ruang, dengan minimal 6 jam sebelum pengujian untuk menjaga suhu benda uji tetap pada suhu ruang. Sebelum pengujian, berat benda uji ditimbang untuk mendapatkan berat sebelum abrasi (*Mo*). Kemudian, benda uji dimasukkan ke dalam drum mesin *Los Angeles* tanpa bola baja, dan mesin tersebut dijalankan pada kecepatan antara 30-33 rpm selama 300 putaran. Setelah pengujian selesai, benda uji dikeluarkan dan ditimbang untuk mendapatkan berat setelah abrasi (*Mi*). Kehilangan berat dapat dihitung dengan Persamaan 3.14.

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

Dengan :

Mo = berat sebelum diabrasi (gr),

Mi = berat setelah diabrasi (gr), dan

L = bersentase kehilangan berat(%).

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

Menurut Sunarjono (2012) *Indirect Tensile Strength Test* merupakan metode yang digunakan untuk menentukan nilai gaya tarik dari campuran aspal. terkadang gaya tarik ini digunakan untuk mengevaluasi potensi terjadinya retakan (*fatigue*) pada campuran aspal. Sifat pengujian ini adalah kegagalan dalam gaya tarik yang memberikan perkiraan terhadap potensi retakan.

Indirect Tensile Strength adalah suatu metode pengujian yang digunakan untuk menentukan kuat tarik maksimum dari campuran aspal beton, dihitung dari beban puncak yang diperoleh melalui perhitungan menggunakan persamaan rumus tertentu Chasanah (2023). Nilai dari *ITS* dapat dihitung dengan Persamaan 3.15.

$$ITS = \frac{P\ runtuh}{h} \text{ x } A_0 \quad (3.15)$$

keterangan :

ITS = kuat tarik tidak langsung (kg/cm2),

P runtuh = beban puncak (kg),

h = tinggi sampel (cm), dan

A_0 = konstanta.

3.9 Pengujian *Draindown*

Draindown merupakan suatu kondisi dimana aspal dan agregat terpisah dari sampel secara keseluruhan dan mengalir ke bawah dari campuran tersebut. Pengujian *draindown* dilakukan untuk menilai sejauh mana campuran aspal dapat menahan pergerakan atau kebocoran aspal dari permukaan campuran saat terkena panas. Pada saat pengujian campuran aspal, asapal yang dipanaskan memiliki kecenderungan untuk mengalir atau menetes dari campuran tersebut. Jumlah aspal yang mengalir, yang dikenal sebagai *draindown*, kemudian diukur dan dinyatakan dalam persentase (%) dari total berat campuran. Nilai *draindown* dapat dihitung dengan Persamaan 3.16.

$$Draindown = \frac{A-B}{C} \text{ X } 100 \qquad (3.16)$$

keterangan :

Draindowm = 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)

SNI 8129:2015 mengatur nilai *draindown* dari semua jenis campuran *Stone Matrix Asphalt* tidak boleh melebihi 0,3% dari keseluruhan berat campuran tersebut.

3.10 *Void in Coarse Aggregate* (*VCA*)

Pengujian *Void in Coarse Aggregate* (*VCA*) adalah metode untuk mengukur jumlah volume pori yang terdapat di antara butiran kasar atau agregat kasar dalam suatu campuran aspal. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar

ruang kosong yang ada di antara butiran-butiran kasar tersebut. Pengukuran *VCA* penting karena dapat memberikan informasi yang relevan tentang kepadatan dan struktur campuran aspal, yang memengaruhi kinerja dan kekuatan keseluruhan dari lapisan perkerasan. Spesifikasi *AASHTO* mensyaratkan bahwa nilai VCA_{mix} harus lebih kecil dari nilai VCA_{drc}. Nilai dari VCA_{DRC} dapat dihitung dengan Persamaan 3.17, dan nilai VCA_{mix} dapat dihitung dengan persamaan 3.18.

$$VCA_{DRC} = \frac{GCAYw - Ys}{GCAYw} \text{ x } 100 \qquad (3.17)$$

keterangan :

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

GCA = berat jenis bulk dari fraksi campuran agregat kasar,

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

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

$$VCAmix = 100 - (G_{mb}/G_{CA}).\ P_{CA} \qquad (3.18)$$

keterangan :

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

Gmb = berat jenis bulk campuran aspal yang telah dipadatkan,

GCA = berat jenis bulk dari fraksi campuran agregat kasar, dan

PCA = prosentasi fraksi campuran agregat kasar dalam total campuran aspal.

3.11 Pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*)

Immersion test atau *IRS* adalah sebuah metode pengujian yang dipakai untuk mengidentifikasi perubahan karakteristik campuran akibat pengaruh air, suhu, dan cuaca. Tujuan dari pengujian *IRS* ini yaitu untuk mengukur kekuatan campuran terhadap kerusakan yang diakibatkan oleh kondisi alam seperti air, suhu dan cuaca.

Pada pengujian *IRS* benda uji direndam dengan 2 kondisi yang berbeda yaitu dengan pada suhu 60º C selama 24 jam (stabilitas rendaman), dan suhu 60º C selama 30 menit (stabilitas standar). Nilai dari *IRS* dapat dihitung melalui persamaan 3.19 seperti berikut ini.

$$\textit{Index of retained strength} = \frac{S_2}{S_1} \text{ x } 100\% \quad (3.19)$$

keterangan :

S1 = nilai stabilitas *marshall* setelah perendaman selama 30 menit, dan

S2 = nilai stabilitas *marshall* setelah perendaman selama 24 jam.

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

Nilai *TSR* merupakan perbandingan antar nilai daya tahan tarik campuran setelah direndam selama 24 jam dengan nilai daya tahan tarik tanpa rendaman. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui nilai gaya tarik dari campuran yang direndam dengan variasi perendaman tertentu, Nilai *TSR* dapat dihitung dengan persamaan 3.20 sebagai berikut.

$$TSR = (T_2/T_1) \text{ x } 100 \quad (3.20)$$

keterangan :

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

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

3.13 Analisis Statistik *ANOVA*

ANOVA (*Analysis of Variance*) adalah metode statistik yang digunakan untuk menentukan apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata dari dua atau lebih kelompok. Penelitian ini menggunakan analisis statistik, khususnya metode *ANOVA*, untuk memahami pengaruh perubahan campuran yang terjadi akibat subtitusi *filler* abu *bottom ash* batu bara pada campuran *SMA*. Data yang dikumpulkan, seperti karakteristik *Marshall, ITS, IRS, TSR, Draindown, VCA*, dan *CL*, akan dianalisis menggunakan metode *ANOVA* sebagai alat statistik utama untuk memperoleh kesimpulan dari penelitian ini. Secara keseluruhan, analisis statistik *ANOVA* diterapkan untuk melakukan beberapa langkah dalam penelitian ini.

1. Hipotesis nol (H0) dan hipotesis alternatif (H1) dirumuskan untuk menilai pengaruh dari setiap variabel faktor yang ada. Perumusan hipotesis ini dapat dilihat dalam persamaan 3.21 dan 3.22 sebagai berikut.

$$H0 : \mu 1 = \mu 2 = \mu 3 = \ldots\ldots\ldots\ldots \mu k \quad (3.21)$$

$$H1 : \mu 1 \neq \mu 2 \neq \mu 3 \neq \ldots\ldots\ldots\ldots \neq \mu k \quad (3.22)$$

2. Perbandingan dilakukan antara nilai F hitung (Fh) dan nilai F tabel (Ft). Nilai F yang diperoleh dari perhitungan disebut F hitung dan mengikuti distribusi F dengan derajat kebebasan pembilang (m-1) dan penyebut (N-1). Jika Fh lebih kecil atau sama dengan Ft ($Fh \leq Ft$), maka hipotesis nol diterima dan hipotesis alternatif ditolak. Sebaliknya, jika Fh lebih besar dari Ft ($Fh > Ft$), hipotesis nol ditolak dan hipotesis alternatif diterima.
3. Penentuan keputusan terkait hipotesis nol (H0) dan hipotesis alternatif (H1) dilakukan sebagai berikut:
   H0: Tidak terdapat perbedaan yang signifikan.
   H1: Terdapat perbedaan yang signifikan.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental, dimana melibatkan serangkaian pengujian atau observasi untuk mengumpulkan data. Data yang diperoleh kemudian diolah lagi untuk memperoleh hasil penelitian, selanjutnya dibandingkan dan di cocokkan dengan standar spesifikasi yang relevan. Prosedur penelitian dan standar spesifikasi yang digunakan merujuk pada peraturan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

4.2 Metode Pengambilan Sampel

Metode pengambilan data yang dipakai dalam penelitian ini merupakan *non-probability sampling*, di mana sampel dipilih secara tidak acak. Dalam hal ini, jenis *non-probability sampling* yang dipakai yaitu *purposive sampling*, di mana sampel dipilih berdasarkan tujuan penelitian. Pengambilan sampel di pilih berdasarkan kriteria dan syarat tertentu yang sudah ditetapkan sebelumnya sesuai dengan tujuan dari penelitian. Penelitian ini memanfaatkan *filler* limbah *battom ash* yang berasal dari Batang, Jawa Tengah, serta menggunakan jenis aspal Pertamina Pen 60/70.

4.3 Metode Pengambilan Data

Pengambilan data pada penelitian ini dilakukan selama proses pengujian. Untuk mempermudah pengambilan data, benda uji dikelompokkan sehingga data yang diperoleh mencakup nilai-nilai seperti stabilitas, *flow*, *density*, *VMA,VITM, VFWA,MQ, VCA*, nilai *IRS,* nilai *TSR* nilai *ITS, Draindown* dan *Contabro Loss*.

4.4 Tahapan Penelitian

Seluruh penelitian dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Proses penelitian ini meliputi tahapan persiapan alat, pemeriksaan material, pembuatan

benda uji, perencanaan campuran, pembuatan campuran benda uji, pengujian *Marshall*, pengujian *Indirect Tensile Strength* (*ITS*), pengujian *Indeks of Retained Strength* (*IRS*), pengujian *Tensile Strength Rasio* (*TSR*), pengujian *Draindown*, dan pengujian *Cantabro Loss.*

4.4.1 Pemeriksaan Material

Pemeriksaan material pada penelitian ini dilakukan untuk menilai kesesuaian suatu material dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Material yang diperiksa untuk campuran *Stone Matrix Asphalt* meliputi agregat, aspal, dan *filler*. Nilai-nilai spesifikasi yang dipakai mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Adapun pemeriksaan material untuk agregat dan aspal sebagai berikut.

1. Pengujian Agregat
    a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar mengikuti standar SNI 1969:2016.

       Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh data mengenai berbagai parameter, termasuk nilai berat jenis curah, berat jenis semu, berat jenis kering permukaan jenuh atau biasa disebut *Saturated Surface Dry (SSD)*, dan tingkat penyerapan air.
    b. Pengujian berat jenis dan penyerapan air dalam agregat kasar mengikuti standar SNI 1970:2016.

       Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memperoleh data mengenai berbagai parameter, termasuk nilai berat jenis curah, berat jenis semu, berat jenis kering permukaan jenuh (*SSD*), dan tingkat penyerapan air.
    c. Pengujian kelekatan antara agregat terhadap aspal mengikuti ketentuan dalam standar SNI 2439:2011.

       Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk mengevaluasi sejauh mana agregat dapat melekat pada aspal.
    d. Pengujian *Sand Equivalent* merujuk pada standar SNI 03-4428-1997.

       Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui jumlah kadar debu, lumpur, maupun material lempung dalam agregat halus.
    e. Pengujian abrasi dilakukan dengan menggunakan mesin *Los Angeles* sesuai ketentuan standar SNI 2417:2008.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa tahan agregat kasar terhadap abrasi atau keausan yang dihasilkan oleh mesin *Los Angeles*.

f. Pengujian analisis saringan mengikuti standar SNI ASTM C136-2012. Pengujian ini menggunakan satu set alat saringan untuk menentukan gradasi agregat kasar, agregat halus, dan *filler*.

2. Pengujian Aspal

Aspal berfungsi sebagai bahan pengikat antara agregat dalam campuran perkerasan. Dalam penelitian ini menggunakan bahan ikat aspal *AC* 60/70. Berikut adalah pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi kualitas aspal.

a. Pengujian berat jenis aspal mengacu pada SNI 2441:2011

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis aspal yang akan digunakan.

b. Pengujian daktilitas mengacu pada SNI 2432:2011

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kohesi dan kelenturan aspal. Pada pengujian ini dilakukan pada suhu 25°C dengan meletakkan aspal pada dua cetakan berbeda kemudian aspal ditarik dengan kecepatan 50 mm/menit, lalu diukur jarak terpanjang aspal sebelum aspal putus maka kita dapat melakukan pengukuran nilai daktilitasnya.

c. Pengujian penetrasi mengacu pada SNI 2456:2011

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan bitumen dengan menggunakan jarum berukuran 0,1 mm, beban, dan waktu tertentu pada suhu tertentu.

d. Pengujian kelarutan pada *Trichlor Ethylen* (*TCE*) mengacu pada *AASHTO* T44-14.

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

e. Pengujian titik nyala dan bakar mengacu pada SNI 2433:2011

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

f. Pengujian titik lembek mengacu pada SNI 2434:2011

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui titik lembek aspal yang nilainya berkisar di antara 30°C sampai 200°C.

3. Pengujian *Filler*

Filler merupakan agregat yang lolos saringan No. 200 yang mempunyai fungsi sebagai bahan pengisi rongga antar agregat dalam campuran perkerasan, yang nantinya akan berpengaruh pada pembentukan tekstur jalan dan meningkatkan kekuatan struktural jalan. Pengujian *filler* harus memenuhi persyaratan SNI 03-6723-2002.

4.4.2 Persiapan Alat

Peralatan yang digunakan untuk menunjang proses penelitian ini disediakan dari Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Peraltan yang digunakan sebagai berikut.

1. Seperangkat alat pengujian agregat, seperti mesin *Los Angeles, vibrator* , satu set analisa saringan, dan tabung *sand equivalent*.
2. Seperangkat alat pengujian aspal seperti alat uji daktilitas, penetrasi, kelaurtan aspal, titik nyala, titik bakar, dan titik lembek.
3. Cetakan benda uji (*mold*) dengan diameter 10 cm dengan tinggi 7,5 cm.
4. Alat pengujian *Marshall*, sebagai berikut.
   a. Cincin penguji berkapasitas 2500 kg dengan 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 dengan berat 4,536 kg dan tinggi jatuhan beban 45,7 cm bernama *compactor*.
6. Alat untuk mengeluarkan benda uji dari cetakan bernama *ejector*.
7. Timbangan berkapasitas 2 kg dengan ketelitian 0,1 gr dan timbangan berkapasitas 5 kg dengan ketelitian 1 gr yang dilengkapo penggantung.
8. Bak perendam (*waterbath*) yang digunakan untuk merendam benda uji sebelum dilakukan pengujian dilengkapi pengatur suhu minimum 20°C.

9. *Oven* digunakan untuk memanaskan benda uji dengan pengatur suhu sampai (200±3) °C.
10. Alat uji *ITS* dan *TSR* yang meliputi sebagai berikut.
    a. Alat ukur tekan dengan lebar 0,5 inchi.
    b. Arloji stabilitas dan flow dengan ketelitian 0,25 mm
    c. Perlatan penunjangn lain selama proses penelitian seperti kompor, *thermometer*, spatula, wajan, gelas ukur, nampan, bak plastik, kain lap, jangka sorong, dan lainnya.
11. Alat pengujian VCA_{DRC}
    a. Timbangan berkapasitas > 5 kg dengan ketelitian 1 gr.
    b. Silinder takaran dengan diameter 150 mm dengan tinggi 159 mm.
    c. Tamping rod ber diameter 16 mm dengan panjang 600 mm.
    d. Alat penunjang lainnya seperti sendok pengaduk, spatula, nampan, sarung tangan anti panas, dan lain-lain.
    e. *Oven* untuk memanaskan agregat serta *thermometer*.
12. Alat pengujian *draindown*
    a. Timbangan benda uji.
    b. *Oven* untuk memanaskan benda uji.
    c. Keranjang kawat berbentuk silinder berdiameter 108 mm dan 165 mm, ukuran lubang jaring-jaring kawat sebesar 3,65 mm (1/4 inchi).
    d. Piring almunium kecil sebagai alas penampung lelehan *mastic* atau aspal

4.4.3 Perencanaan Campuran

Perencanaan campuran benda uji bergradasi *Stone Matrix Asphalt* 25 mm didasarkan pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 sebagai berikut.

1. Menentukan komposisi agregat.
2. Menentukan variasi kadar aspal pada campuran dengan menggunakan perhitungan Pb.
3. Melakukan pembuatan benda uji dengan 2 x 50 tumbukan menggunakan alat pemadat *Marshall.*

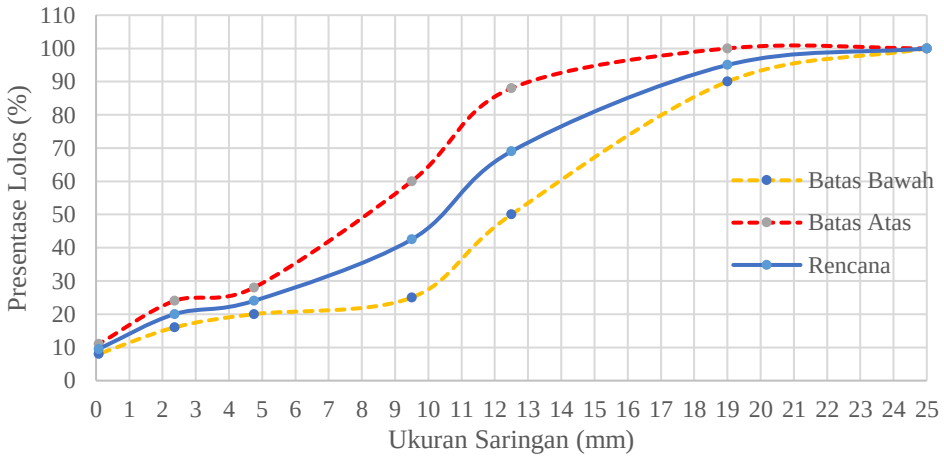
4. Menentukan nilai KAO berdasarkan parameter berikut.
   a. *VITM* dengan syarat minimum 3% dan maksimum 5%,
   b. *VMA* dengan syarat minimum 17%.
   c. Stabilitas *marshall* campuran dengan syarat minimum 600 kg.
   d. *Flow* campuran dengan syarat minimum 2mm dan maksimum 4,5 mm
   e. *Draindown* dengan syarat maksimum 0,3%
   f. *IRS* dengan persyaratan minimum 90%
   g. *VCA* dengan syarat maksimum 1

Perencanaan gradasi agregat dari campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Rencana 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

Berdasarkan Tabel 4.1 maka membentuk sebuah grafik gradasi campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Rencana *Stone Matrix Asphalt* 25 mm

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

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

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 menggunakan nilai konstanta 1.

Menurut hasil dari perhitungan awal (*Pb*), dengan nilai *CA* 76%, *FA* 14,5%, *Filler* 9,5 % Maka dapat dicari kadar aspal optimum rencana dengan menggunakan Persamaan 4.1, didapatkan perhitungan Pb = 0,035 (76) + 0,045 (14,5) + 0,18 (9,5) + 1 = 6,02 % dibulatkan menjadi 6%. Dari perhitungan nilai Pb tersebut dapat digunakan pada saat pengujian untuk mencari nilai kadar aspal optimum (KAO), kadar aspal yang dipakai adalah 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7% dari berat keseluruhan campuran seberat 1200 gr. Kadar serat selulosa yang dicampurkan pada tiap benda uji sebesar 0.3% terhadap berat keseluruhan campuran, sebanyak 3,6 gram. Sedangkan pada kadar subtitusi yang digunakan pada *filler* yaitu memakai variasi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% dari berat total *filler*. Setiap variasi kadar aspal untuk menentukan KAO mempunyai kebutuhan agregat yang berbeda-beda pada setiap kadarnya, yang bisa dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.2 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	57,00	57,00
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	296,40	353,40
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	302,10	655,50
#4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	210,90	866,40
#8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	45,60	912,00
#200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	119,70	1031,70
Pan		0,00	0,00	0,00	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	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,70	56,70
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	294,84	351,54
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	300,51	652,05
#4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	209,79	861,84
#8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	45,36	907,20
#200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	119,07	1026,27
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	107,73	1134,00

Tabel 4.4 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6 %

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,40	56,40
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	293,28	349,68
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	298,92	648,60
#4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	208,68	857,28
#8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	45,12	902,40
#200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	118,44	1020,84
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	107,16	1128,00

Tabel 4. 5 Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6,5 %

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,10	56,10
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	291,72	347,82
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,33	645,15
#4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	207,57	852,72
#8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	44,88	897,60
#200	0,075	8,00	11,00	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	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	55,80	55,80
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	290,16	345,96
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	295,74	641,70
#4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	206,46	848,16
#8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	44,64	892,80
#200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	117,18	1009,98
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	106,02	1116,00

Jumlah benda uji yang digunakan untuk memperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat dilihat pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Jumlah Benda Uji Untuk Memperoleh Nilai KAO

Kadar Aspal (%)	Pengujian		
	Marshall	*IRS*	*Draindown*
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 mendapatkan nilai KAO maka dilakukan pengujian pada setiap nilai yang didapatkan. Total benda uji untuk setiap pengujian KAO dapat dilihat pada Tabel 4.8 sebagai berikut.

Tabel 4. 8 Jumlah Benda Uji Untuk Setiap Pengujian KAO

Pengujian	Kadar *Filler Abu Bottom Ash Batubara* (%)				
	0	25	50	75	100
Marshall	3	3	3	3	3
ITS	3	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3	3
TSR	3	3	3	3	3
Draindown	3	3	3	3	3
Cantabro	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 total benda uji dalam penelitian ini adalah 135 buah.

4.4.4 Pembuatan Campuran Benda Uji

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

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.

2. Memanaskan aspal pada suhu tertentu, pada penelitian ini menggunakan aspal AC 60/70 yang dipanaskan mencapai suhu 160°C.
3. Memanaskan agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan serat selulosa sampai suhu 170°C, kemudian mencampurkan kadar aspal sesuai dengan persentase yang telah direncanakan dan mengaduk sampai homogen.
4. Membersihkan cetakan benda uji dan mengolesi bagian dalam cetekan dengan menggunakan oli.
5. Meletakkan kertas yang telah dicetak sesuai dengan ukuran cetakan pada bagian bawah. Kemudian memasukkan campuran benda uji yang telah tercampur merata sebanyak 1/3 bagian dari volume cetakan dan ditusuk-tusuk menggunakan spatula sebanyak 25 kali. Dengan cara yang sama , benda uji dimasukkan sampai cetakan penuh kemudian meletakkan kertas di bagian atas.
6. Meletakkan cetakan yang telah berisi benda uji diatas mesin pemadat. Setelah itu menyeting mesin pemadat sebanyak 50 kali tumbukan di setiap sisi.
7. Setelah selesai pemadatan, benda uji dikeluarkan dari mesin pemadat dan didiamkan agar tidak terlalu panas.
8. Mengeluarkan benda uji dari cetakan menggunakan *ejector hydarulic pump*, kemudian mendiamkan benda uji tersebut dan mengambil kertas pada kedua sisi.

4.4.5 Pengujian *Marshall*

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

1. Menyiapkan alat dan benda uji yang akan digunakan.
2. Membersihkan benda uji dari kotoran yang masih menempel dari proses pembuatan sampel.
3. Mengukur tinggi benda uji pada tiga sisi dengan menggunakan kaliper kemudian menimbang benda uji dalam keadaan kering udara.

4. Merendam benda uji di dalam air pada suhu ruang selama 20 sampai 24 jam untuk mendapatkan kejenuhan, kemudian menimbang benda uji di dalam air dan mencatat hasilnya.
5. Mengelap benda uji yang telah ditimbang dalam air dengan menggunakan kain lap sampai mencapai kondisi *SSD*, kemudian menimbang benda uji sehingga diperoleh berat dalam keadaan *SSD*.
6. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 30 menit.
7. Memeriksa mesin *marshall Test* beserta dial pelengkapnya dan menyiapkan *breaking head* yang telah diolesi dengan oli.
8. Mengambil benda uji dari *waterbath* dan meletakkannya ke dalam *breaking head*, kemudian memasang dial *flow* dan menaikkan *breaking head* sampai benda uji menyentuh cincin penguji.
9. Mengatur jarum pada dial *stabilitas* dan *flow* pada posisi angka nol.
10. Menghidupkan mesin dan mengamati pembebanan sampai dial stabilitas mencapai angka maksimum.
11. Mencatat hasil pembacaan dari dial *stabilitas* dan dial *flow*.

4.4.6 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*

Langkah-langkah pengujian *ITS* dapat dilakukan dengan cara berikut.

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

4.4.7 Pengujian *Tensile Strength Rasio* (*TSR*)

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

1. Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *Marshall*.

3. Merendam benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam, kemudian mendiamkan benda uji pada suhu ruang selama 24 jam.
4. Meletakkan benda uji mesin *TSR*.
5. Menyalakan mesin uji dan mengamati pembacaan dial dan mencatat hasilnya.

4.4.8 Pengujian *Indeks of Retained Strength (IRS)*

Pengujian *IRS* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

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

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

Pengujian VCA_{DRC} sesuai dengan ketentuan *AASHTO* 19M/T 19-14 sebagai berikut.

1. Benda uji campuran fraksi agregat kasar yang telah dipanaskan (kering), dituang ke dalam silinder takaran hingga mencapai 1/3 tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusuk-nusuk campuran tersebut menggunakan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata di seluruh permukaan lapis pertama tersebut. Penusukan dengan *tamping-rod* agar jangan sampai mengenai dasar silinder takaran.
2. Lapisan kedua dibentuk dengan menuangkan benda uji campuran fraksi agregat kasar yang telah dipanaskan (kering) kedalam silinder takaran hingga mencapai 2/3 tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusuk-nusuk campuran tersebut dengan menggunakan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata diseluruh permukaan lapis pertama tersebut. Pemadatan dengan *tamping-rod* ini agar jangan sampai mengenai permukaan lapisan pertama.
3. Lapisan ketiga dibentuk dengan menuangkan benda uji campuran fraksi agregat kasar yang telah dipanaskan (kering) kedalam silinder takaran hingga sedikit melebihi tinggi wadah. Pemadatan dilakukan dengan menusuk-nusuk campuran tersebut dengan menggunakan *tamping-rod* sebanyak 25 kali secara merata diseluruh permukaan lapis pertama tersebut. Pemadatan dengan *tamping-rod* ini agar jangan sampai mengenai permukaan lapisan kedua.
4. Dilakukan perataan campuran fraksi agregat kasar yang sedikit melebihi tinggi wadah menggunakan *tamping-rod* atau mistar perata, hingga rata dengan tepian permukaan silinder takaran.
5. Benda uji bersama dengan wadah kemudian ditimbang dan dilakukan perhitungan untuk mengetahui VCA_{DRC}.

   Benda uji pada VCA_{DRC} dibuat sama dengan jumlah benda uji pada VCA_{MIX}.

4.4.10 Pengujian *Draindown*

Pengujian *Draindown* sesuai dengan ketentuan *AASHTO T* 305-14 sebagai berikut.

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

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

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

4.4.11 Pengujian *Cantabro Loss*

Pengujian *Cantabro loss* dapat dilakukan sebagai berikut.

1. Mempersiapkan bahan.
2. Menimbang benda uji untuk mendapatkan berat sebelum diabrasi (Mo).
3. Selanjutnya meletakkan benda uji kedalam mesin *Los Angeles* tanpa bola baja.
4. Memutar mesin dengan kecepatan 30-33 rpm sebanyak 300 putaran.
5. Setelah selesai pemutaran, mengeluarkan benda uji dari mesin kemudian ditimbang lagi untuk mendapatkan berat benda uji setelah dilakukan pengujian abrasi (Mi).

4.5 Analisis Data

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

4.5.1 Analisis Karakteristik *Marshall*

Parameter hasil pengujian *marshall* diperoleh data sebagai berikut.

1. Beat 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.

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

   dengan :

   A = berat *piknometer* dengan penutup (gr),

   B = berat *piknometer* berisi air (gr),

   C = berat *piknometer* berisi aspal, dan

   D = berat *piknometer* berisi air dan aspal.

2. Berat jenis agregat

   Berat jenis agregat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.3 berikut.

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

   dengan :

   A = persentase agregat kasar (%),

   B = persentase agregat halus (%),

   F1= berat jenis agregat kasar, dan

   F2= berat jenis agregat halus.

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

7. Nilai *MQ* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.6.
8. Nilai *VITM* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.7 dan 3.8.
9. Nilai *VFWA* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.9 sampai 3.13.

4.5.2 Analisis Pengujian *Cantabro Loss*

Nilai pengujian *Cantabro Loss* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.14.

4.5.3 Analisis Pengujian *ITS*

Nilai pengujian *ITS* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.15.

4.5.4 Analisis Pengujian *Draindown*

Nilai uji *Draindown* bisa didapatkan melalui Persamaan 3.16.

4.5.5 Analisis Pengujian *VCA*

Nilai pengujian *VCA* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.17 dan 3.18.

4.5.6 Analisis Pengujian *IRS*

Nilai pengujian *IRS* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.19.

4.5.7 Analisis Pengujian *TSR*

Nilai pengujian *TSR* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.20.

4.5.8 Analisis Statistik *ANOVA*

Nilai pengujian *ANOVA* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.21 dan 3.22.

4.6 Analisis Statistika Anova

Analisis Anova bertujuan memberikan adanya perubahan yang terjadi akibat pengaruh *filler* terhadap campuran *SMA*.

1. Merumuskan hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) untuk mengetahui pengaruh masing-masing faktor variable. Berikut rumusan hipotesis dapat dilihat pada persamaan 4.4 dan 4.5.

$$H0 : \mu1 = \mu2 = \ldots\ldots = \mu k \quad (4.4)$$

$$H1 : \mu1 \neq \mu2 = \ldots\ldots \neq \mu k \quad (4.5)$$

2. Mengumpulkan data

   Buatlah Variable View sesuai dengan data yang akan diuji dan upload data data yang telah didapat ke Data View

3. Uji Normalitas

   Pada uji normalitas data harus ter distribusi normal karena uji normalitas data merupakan syarat wajib yang harus terpenuhi. Langkah-langkah uji normalitas sebagai berikut :

   a. Pilih menu *Analyze,* setelah itu pilih Descriptive *Statistics* dan *Explore*

   b. Masukan Factor List dan Dependent List

   c. Pilih *Normality* plot with tests pada opsi Plots

   d. 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 terdistribusi secara normal. Nilai Sig. (P value) > 0,05 berkesimpulan data terdistribusi secara 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. Lalu 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 berkesimpulan data homogen.

5. Uji *One Way Anova*

   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. Setelah data Anova diperoleh, bandingkan antara nilai F-hitung dengan nilai F-tabel. Apabila nilai F-hitung > F-tabel,maka H0 ditolak dan H1 diterima. nilai F-hitung < F-tabel : maka H0 diterima dan H1 ditolak

e. Menentukan nilai α atau signikan biasanya digunakan 0,05

   Jika nilai signifikan atau P- Value > 0,05 : maka H0 ditolak dan H1 diterima.

   Jika nilai signifikan atau P- Value < 0,05 : maka H0 diterima dan H1 ditolak

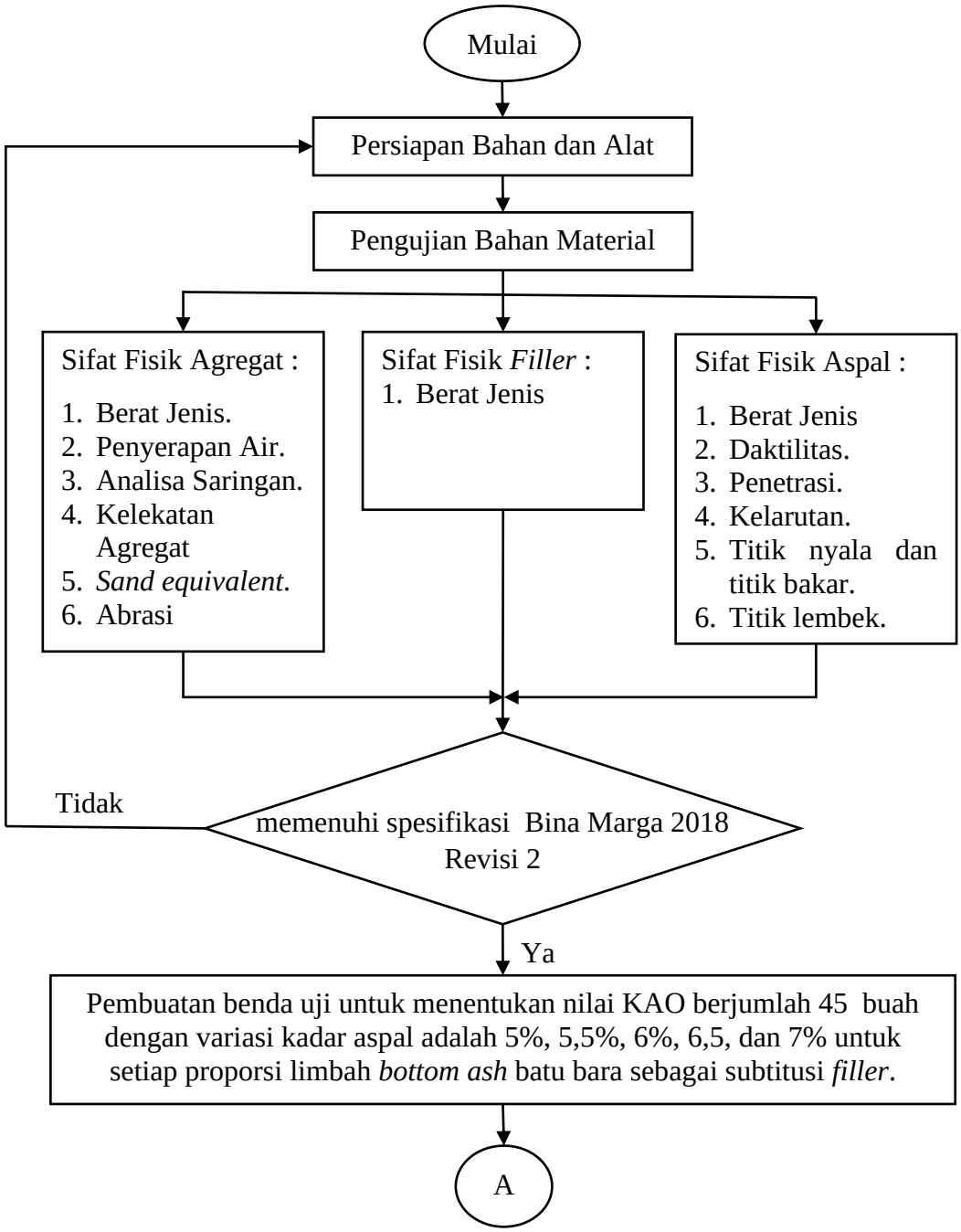
6. Kesimpulan keputusan H_0 dan H_1

   a. H_0 = Tidak terdapat perbedaan signifikan dalam pengaruh *filler* BABB terhadap karakteristik campuran *SMA*

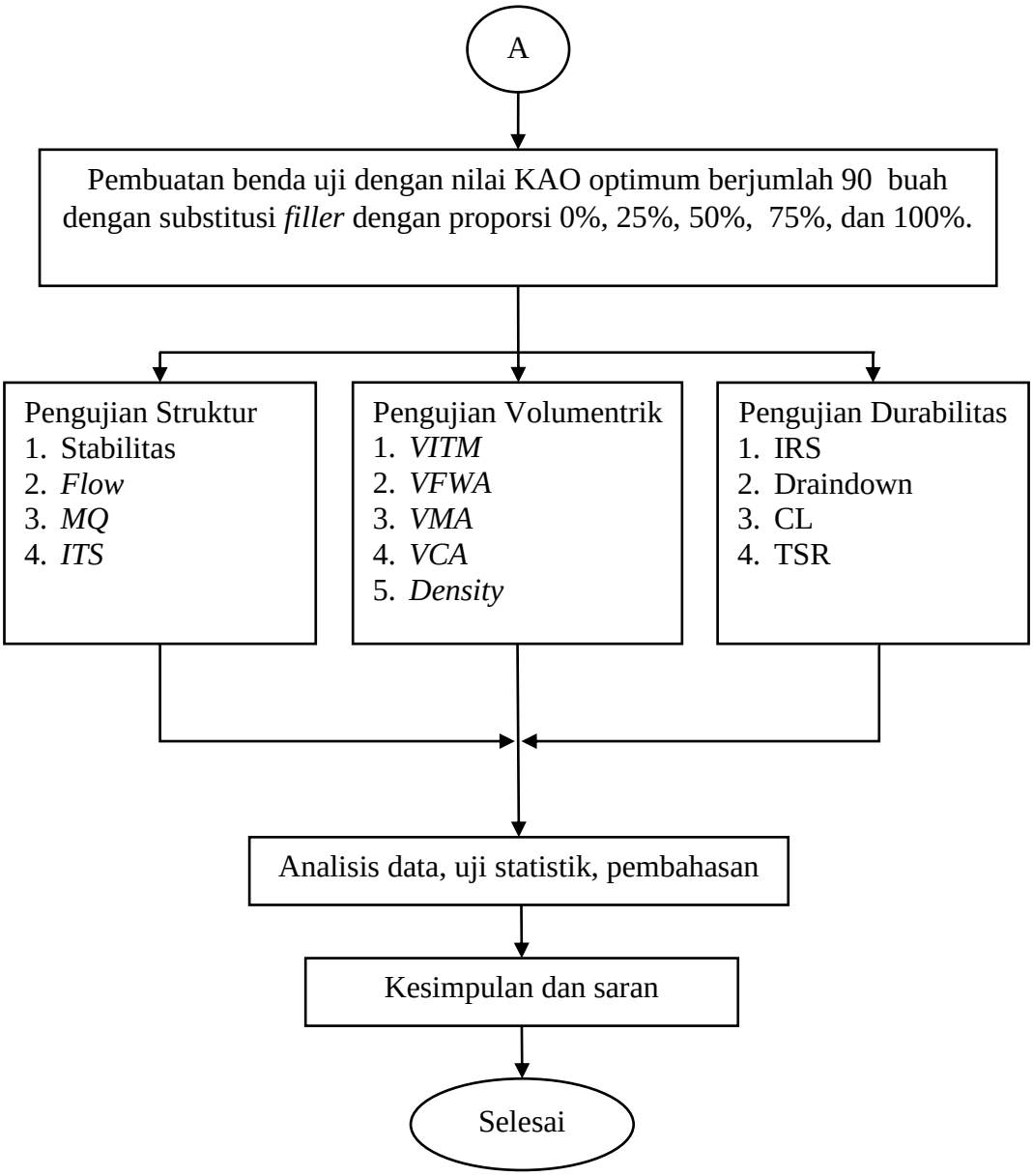
   b. H_1 = Terdapat perbedaan signifikan dalam pengaruh *filler* BABB terhadap karakteristik campuran *SMA*

4.7 Bagan Alir Penelitian

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



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

Setelah melakukan beberapa rangkaian pengujian, didapatkan hasil dari setiap pengujiannya antara lain sebagai berikut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pada pengujian karakteristik aspal ini menggunakan aspal Pen 60/70. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Dari hasil pengujian didapatkan data – data yang telah memenuhi spesifikasi, dan persyaratan. data hasil pengujian ini berpedoman 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	1,040	Memenuhi
2.	Penetrasi (mm)	60-70	66,30	Memenuhi
3.	Daktilitas (cm)	≥ 100	164	Memenuhi
4.	Titik Lembek (ºC)	≥ 48	48,5	Memenuhi
5.	Titik Nyala (ºC)	≥ 232	315	Memenuhi
6.	Titik Bakar (ºC)	≥ 232	320	Memenuhi
7.	Kelarutan Pada *TCE* (%)	≥ 99	99,32	Memenuhi

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian karakteristik agregat dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pengujian ini terdiri dari beberapa pengujian diantaranya pengujian agregat kasar, agregat halus, dan *filler*, yang telah memenuhi persyaratan spesifikasi. Pengujian ini berpedoman pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Rekapitulasi hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.2 sampai Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler*

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis *bottom ash* batu bara		2,506
2	Berat jenis debu batu		2,556

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	≥ 2,5	2,7
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 2	1,42
3	*Sand equivalent* (%)	≥ 50	92,84

Tabel 5. 4 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

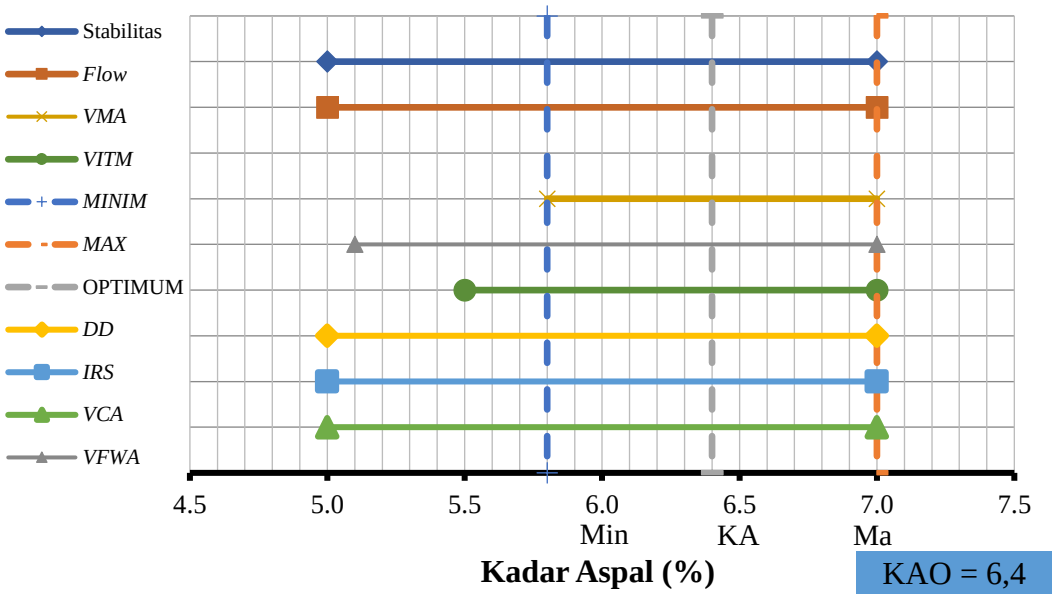
5.1.3 Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai KAO pada campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm yang menggunakan Pen 60/70. Hasil pengujian yang didapatkan adalah berupa data nilai stability, *flow*, *VMA*, *VITM*, *IRS*, *draindown*, dan *VCA*. Rekapitulasi hasil pengujian KAO dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Campuran Untuk Menentukan KAO

Pengujian	5%	5,5%	6%	6,5%	7%	Spesifikasi
Stabilitas (kg)	876,48	891,05	921,52	946,89	893,11	>600
Flow (mm)	2,60	2,82	3,17	3,32	3,43	2–4,5
VITM (%)	5,49	4,96	4,37	4,16	4,02	3-5
VMA (%)	16,29	16,84	17,32	18,12	18,98	>17
Draindown (%)	0,071	0,092	0,121	0,158	0,200	<0,3
IRS (%)	90,22	90,98	91,43	92,53	94,54	>90
VCA	0,935	0,953	0,950	0,959	0,965	<1

KAO ditentukan berdasarkan perhitungan secara grafis, nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5. 1 Penentuan Kadar Aspal Optimum dengan Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (BABB)

Pada Gambar 5.1, maka dapat dilihat bahwa Kadar Aspal Optimum yang digunakan untuk variasi substitusi *filler* adalah 6,4%. Pada penelitian ini menggunakan *filler bottom ash* batu bara sebagai substitusi *filler* debu batu, yang dimana keduanya memiliki berat jenis yang berbeda. Setelah dilakukan pengujian diperoleh nilai berat jenis masing-masing yaitu untuk *bottom ash* batu bara sebesar 2,506 gr/cm3 dan debu batu sebesar 2,556 gr/cm3. Maka untuk mendapatkan perbandingan berat volume yang sama dilakukan pengolahan data. Rekapitulasi hasil untuk perbandingan masing-masing *filler* dapat dilihat pada Tabel 5.6 sebagai berikut.

Tabel 5. 6 Berat Debu Batu dan *Bottom Ash* Batu Bara

Kadar Variasi Subsitusi *Filler* (%)	Berat Debu Batu (gr)	Berat Abu *bottom ash* batu bara (gr)	Kadar Aspal Optimum (%)
0	106,70	0,00	6,4
25	80,03	26,15	

Lanjutan Tabel 5.6 Berat Debu Batu dan *Bottom Ash* Batu Bara

Kadar Variasi Subsitusi *Filler* (%)	Berat Debu Batu (gr)	Berat B*ottom Ash* Batu Bara (gr)	Kadar Aspal Optimum (%)
50	53,35	52,31	6,4
75	26,68	78,46	
100	0,00	104,62	

Berikut merupakan limbah *bottom ash* batu bara yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5. 2 berikut.



Gambar 5. 2 Limbah *Bottom Ash* Batu Bara

5.1.4 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm Dengan KadarAspal Optimum

Hasil pengujian campuran *stone matrix asphalt* 25 mm pada Kadar Aspal Optimum dengan substitusi *bottom ash* batu bara sebagai pengganti *filler* dengan pengujian *marshall*, *VCA, draindown*, *IRS*, *ITS*, *TSR*, dan *CL* dapat dilihat pada Tabel 5.7 sampai Tabel 5.13.

1. *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Marshall*

Tabel 5. 7 Hasil Rekapitulasi Pengujian *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum pada setiap Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara

Kadar Substitusi Agregat Halus (%)	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	*MQ* (kg/mm)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*VMA* (%)	*Density* (gr/cc)
0	950,95	2,97	321,71	3,59	80,67	17,44	2,25
25	1003,80	2,82	356,25	3,99	78,12	17,78	2,24
50	1020,53	2,77	368,88	4,16	76,93	17,93	2,24
75	974,90	2,92	334,39	4,33	76,84	18,08	2,23
100	945,34	3,00	315,11	4,76	75,10	18,44	2,22
Spesifikasi	> 600	2-4,5	> 250	3-5	> 65	> 17	>2

2. *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Void Coarse Aggregate* (*VCA*)

Tabel 5. 8 Rekapitulasi Pengujian Nilai *VCA* pada KAO Setiap Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara

Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)	VCA_{MIX}/VCA_{DRC} (%)
0	0,820
25	0,827
50	0,835
75	0,846
100	0,866

3. *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Draindown*.

Tabel 5. 9 Rekapitulasi Pengujian *Draindown* pada KAO Setiap Kadar Substitusi *Bottom Ash* Batu Bara

Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)	*Draindown* (%)
0	0,15
25	0,13
50	0,12
75	0,09
100	0,06

4. Abu *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*)

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Pengujian *IRS* pada KAO Setiap Kadar Substitusi BABB

Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)	*IRS* (%)
0	94,83
25	96,58
50	97,01
75	96,54
100	96,03

5. *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Index Tensile Strength* (*ITS*)

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Pengujian *ITS* pada KAO Setiap Kadar Substitusi BABB

Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)	*ITS* (kPa)
0	815,84
25	830,42
50	872,24
75	890,74
100	928,07

6. *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*)

Tabel 5. 12 Rekapitulasi Nilai *TSR* pada KAO Setiap Kadar Substitusi BABB

Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)	*TSR* (%)
0	89,13
25	91,25
50	92,58
75	93,33
100	95,62

7. *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Substitusi *Filler* pada Pengujian *CL*

Tabel 5. 13 Rekapitulasi Pengujian *Cantabro Loss* pada KAO Setiap Kadar Substitusi BABB

Kadar Substitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)	Kehilangan Berat (%)
0	6,85
25	5,98
50	4,99
75	5,24
100	5,40

Data hasil karakteristik *Marshall*, *VCA*, *Draindown*, *IRS*, *ITS*, *TSR*, dan *CL* pada campuran *stone matrix asphalt* 25 mm dengan penggunaan BABB sebagai substitusi *filler* dianalisis dengan *ANOVA*. Hasil analisis menggunakan statistik *ANOVA* dapat dilihat pada Tabel 5.14 dan Tabel 5.15 sebagai berikut.

Tabel 5. 14 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* untuk Pengaruh *Filler* BABB Terhadap Karakteristik *Marshall*

Parameter	Nilai Signifikan	Keterangan	Hasil Analisis
Stabilitas	0,464	H_0 diterima	Tidak signifikan
Flow	0,032	H_1 diterima	signifikan
VITM	0,975	H_0 diterima	Tidak signifikan
VFWA	0,974	H_0 diterima	Tidak signifikan
VMA	0,975	H_0 diterima	Tidak signifikan
MQ	0,070	H_0 diterima	Tidak signifikan
Density	0,975	H_0 diterima	Tidak signifikan

Tabel 5. 15 Rekapitulasi Data Uji Statistika *ANOVA* untuk Pengaruh *Filler* BABB Terhadap *IRS, ITS, TSR, Cantabro Loss,* dan *Draindown*

Parameter	Nilai Signifikan	Keterangan	Hasil Analisis
IRS	0,997	H_0 diterima	Tidak signifikan
ITS	0,962	H_0 diterima	Tidak signifikan
TSR	0,988	H_0 diterima	Tidak signifikan
CL	0,067	H_0 diterima	Tidak signifikan
Draindown	0,483	H_0 diterima	Tidak signifikan

Keterangan :

H_0 diterima : Tidak terdapat pengaruh signifikan pada penggunaan *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti campuran *SMA*

H_1 diterima : Terdapat pengaruh signifikan pada penggunaan *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti campuran *SMA*

5.2 Pembahasan

Berikut merupakan pembahasan hasil pengujian yang sudah dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia sebagai berikut.

5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pembahasan untuk pengujian karakteristik aspal adalah sebagai berikut.

1. Berat Jenis Aspal

   Berat jenis aspal merupakan faktor penting dalam perancangan campuran agregat dan aspal. Hasil pengujian menunjukkan berat jenis sebesar 1,040, yang sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu harus lebih dari >1,00.

2. Penetrasi Aspal

   Pengujian ini bertujuan untuk mengukur nilai penetrasi aspal agar mutu dan tingkat kekerasannya dapat diketahui. Dari hasil pengujian pada aspal Pertamina Pen 60/70, diperoleh nilai penetrasi sebesar 66.30 mm, yang memenuhi standar spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu dalam rentang 60 mm hingga 70 mm.

3. Daktilitas Aspal

   Pengujian daktilitas dilakukan untuk mengetahui elastisitas dan sifat kohesi aspal. Dari hasil pengujian, diperoleh nilai daktilitas sebesar 164 cm, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal ≥ 100 cm.

4. Titik Nyala Aspal dan Titik Bakar Aspal

   Pengujian ini bertujuan untuk menentukan suhu saat aspal mulai menyala dan memercikkan api. Dari hasil pengujian, titik nyala aspal tercatat sebesar 315°C, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu ≥

232°C. Titik bakar aspal menunjukkan suhu ketika api mulai terlihat menyala selama sekitar ± 5 detik di permukaan aspal. Hasil pengujian menunjukkan titik bakar sebesar 320°C, yang juga memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu ≥ 232°C.

5. Titik Lembak Aspal

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sensitivitas aspal terhadap suhu. Hasil pengujian menunjukkan nilai sebesar 48,5°C, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal ≥ 48°C.

6. Kelarutan dalam *Trychloroethylene (TCE)*

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan mineral lain yang terdapat dalam aspal, karena mineral tersebut dapat mengganggu ikatan antara aspal dan agregat. Semakin tinggi persentase kelarutan, semakin sedikit kandungan mineral lain dalam aspal. Pada pengujian ini, diperoleh hasil sebesar 99,32%, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal ≥ 99%.

5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kassar

Pengujian karakteristik agregat kasar bertujuan untuk mengidentifikasi sifat fisik dan karakteristik agregat kasar. Agregat yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Clereng, Kulon Progo. Berikut adalah karakteristik agregat kasar tersebut.

1. Berat Jenis Agregat Kasar

   Berat jenis adalah perbandingan antara berat volume agregat dan volume air pada suhu tertentu. Nilai berat jenis agregat dalam campuran mempengaruhi jumlah pori-pori, semakin tinggi berat jenis agregat, semakin kecil pori-porinya, sehingga kebutuhan aspal menjadi lebih sedikit, dan sebaliknya. Hasil pengujian agregat kasar menunjukkan nilai sebesar 2,59, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal ≥ 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Kasar

   Penyerapan air oleh agregat bertujuan untuk mengukur kemampuan agregat dalam menyerap air melalui pori-pori atau rongga yang ada, dari kondisi kering hingga jenuh. Agregat dengan pori-pori besar memiliki tingkat

penyerapan air yang tinggi dan membutuhkan lebih banyak aspal untuk mengisi pori-pori tersebut, demikian pula sebaliknya. Hasil pengujian menunjukkan nilai penyerapan sebesar 1,96%, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu maksimal ≤ 2%.

3. Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

   Pengujian kelekatan agregat terhadap aspal bertujuan untuk mengetahui persentase luas permukaan agregat yang tertutup oleh lapisan aspal. Hasil pengujian agregat kasar menunjukkan persentase sebesar 98%, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal ≥ 95%.

4. Keausan Agregat Kasar dengan Mesin *Los Angeles*

   Pengujian keausan menggunakan mesin *Los Angeles* bertujuan untuk mengukur ketahanan agregat kasar terhadap kerusakan atau degradasi. Hasil pengujian menunjukkan nilai sebesar 19.32%, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu maksimal ≤ 40%.

5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Pengujian karakteristik agregat halus bertujuan untuk mengidentifikasi sifat fisik dan karakteristik agregat halus. Agregat yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Clereng, Kulon Progo. Berikut adalah karakteristik agregat halus tersebut.

1. Berat Jenis Agregat Halus

   Berat jenis merupakan perbandingan antara berat satuan volume material dengan berat air pada volume yang sama pada suhu tertentu. Hasil pengujian berat jenis agregat halus dari Clereng, Kulon Progo menunjukkan nilai sebesar 2,70, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal ≥ 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Halus

   Penyerapan air oleh agregat adalah kemampuan material untuk menyerap air melalui rongga atau pori-pori yang ada. Agregat dengan pori-pori besar akan membutuhkan lebih banyak aspal karena penyerapan airnya lebih tinggi. Hasil pengujian penyerapan agregat halus dari Clereng, Kulon Progo

menunjukkan nilai sebesar 1,42%, yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu maksimal ≤ 2%.

3. *Sand Equivalent*

   Pengujian *sand equivalent* bertujuan untuk mengukur tingkat kebersihan agregat dari debu, lumpur, atau kotoran lainnya. Hasil pengujian sand equivalent pada agregat halus dari Clereng menunjukkan nilai sebesar 92,84%, yang memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal ≥ 50%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat halus dari Clereng cukup bersih dan bebas dari debu, lumpur, atau kotoran lain yang dapat mengganggu kelekatan aspal dengan agregat.

5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*)

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

1. Pengujian Berat Jenis Debu Batu

   Berat jenis merupakan perbandingan antara berat satuan volume suatu material dengan berat air pada volume yang sama pada suhu tertentu. Hasil pengujian berat jenis filler debu batu menunjukkan nilai sebesar 2,556.

2. Pengujian Berat Jenis Abu *Bottom Ash* Batu Bara

   Berat jenis merupakan rasio antara berat satuan volume suatu material dengan berat air pada volume yang sama pada suhu tertentu. Hasil pengujian berat jenis *filler Bottom Ash* Batu Bara menunjukkan nilai sebesar 2,506.

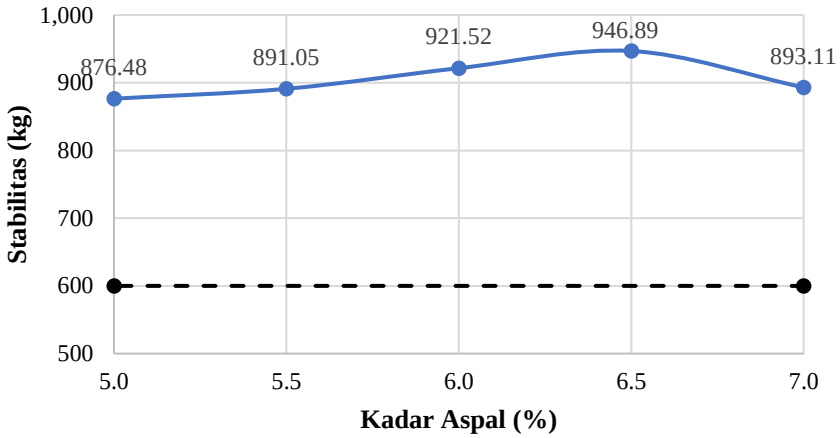
Dalam menentukan berat volume perlu diketahui berat jenis pada masing masing *filler*. Hal ini guna mengetahui perbandingan volume antar *filler* sehingga dapat melingkupi volume yang sama karena berat jenis Abu *Bottom Ash* Batu Bara sebagai *filler* pengganti lebih kecil dari berat jenis *filler* debu batu.

5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

1. Analisis pengaruh nilai stabilitas untuk menentukan kadar aspal optimum

   stabilitas mengacu pada kemampuan lapisan perkerasan jalan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen, seperti terbentuknya

gelombang, alur, atau bleeding. Nilai stabilitas dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut.

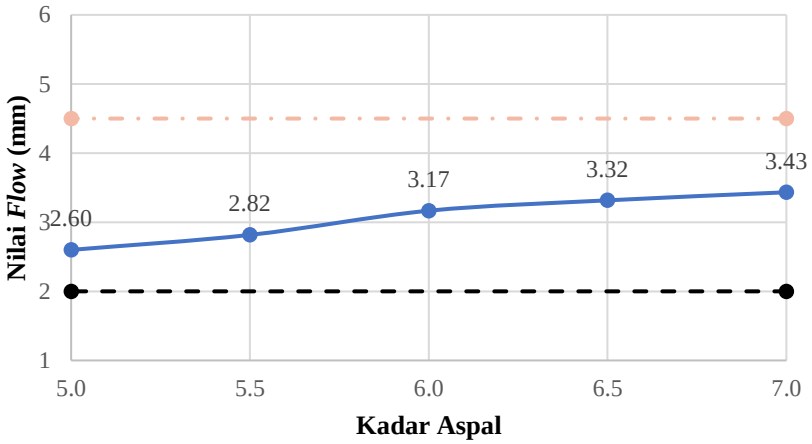


Gambar 5. 3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas

Pada Gambar 5.3, terlihat bahwa nilai stabilitas campuran cenderung naik hingga titik optimum 6,5% selanjutnya menurun seiring dengan bertambahnya presentase kadar aspal akan tetapi masih dalam batas minimum stabilitas pada campuran. Hal itu terjadi karena penambahan kadar aspal paling efektif di kadar 6,5% selanjutnya penambahan kadar aspal sudah tidak efektif lagi. Kadar aspal terlalu tinggi menyebabkan aspal tidak lagi dapat menyelimuti agregat dengan baik, tebalnya selimut aspal mengakibatkan gesekan antar butiran menjadi berkurang dan mengubah aspal dari pengikat menjadi pelicin antara agregat. Menurut spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, batas minimal nilai stabilitas pada campuran *SMA* adalah 600 kg. Dengan demikian nilai stabilitas kadar aspal 5% sampai 7% telah memenuhi batas minimum persyaratan karena nilai stabilitas diatas 600 kg.

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

Beban yang terjadi saat keruntuhan dibaca menggunakan arloji pengukur dari *proving ring*, dan kelelehan yang terjadi pada saat itu merupakan nilai kelelehan (*flow*) yang dapat dibaca pada *flowmeter*. *Flowmeter* berfungsi untuk mengukur besaran kelelehan yang dihasilkan akibat beban tersebut. Nilai *flow* dapat dilihat pada Gambar 5.4 berikut.

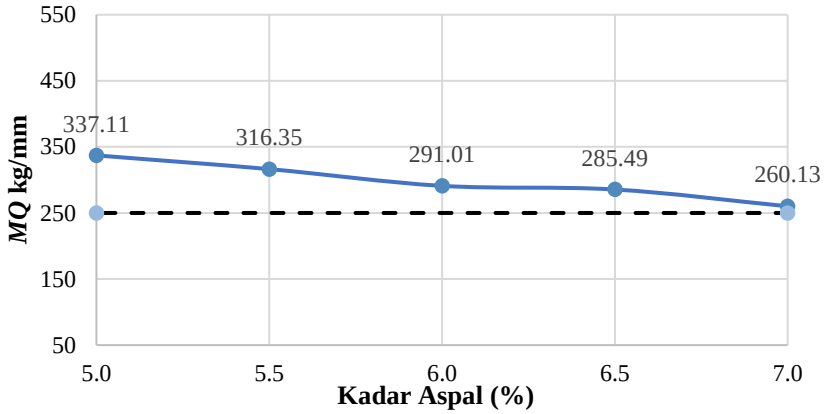


Gambar 5. 4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow*

Pada Gambar 5.4, terlihat bahwa nilai *flow* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal, peningkatan paling tinggi didapat pada penambahan kadar aspal 7%, Hal ini dikarenakan karena banyaknya aspal yang mengisi rongga menjadikan kelelehan aspal semakin besar sehingga bersifat plastis sehingga campuran tidak akan mudah terkena *crack* karena terkena beban. Peningkatan kadar aspal akan menyebabkan nilai *flow* pada campuran meningkat. Nilai *flow* yang lebih tinggi membuat campuran semakin plastis, sehingga akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk ketika diberikan beban. Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* untuk campuran *SMA* berkisar antara 2,0 mm hingga 4,5 mm. Oleh karena itu, nilai *flow* pada kadar aspal 5% sampai 7% telah memenuhi kriteria yang ditetapkan.

3. Analisis Pengaruh Nilai *MQ* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

   Nilai *MQ* merupakan hasil bagi antara stabilitas dengan kelelehan (*flow*). Nilai *MQ* digunakan sebagai pendekatan nilai fleksibilitas dari suatu lapis perkerasan. Stabilitas yang tinggi disertai nilai *flow* yang rendah menyebabkan perkerasan menjadi kaku dan getas dan sebaliknya. maka perkerasan akan mengalami perubahan bentuk (deformasi). Nilai *MQ* dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut.

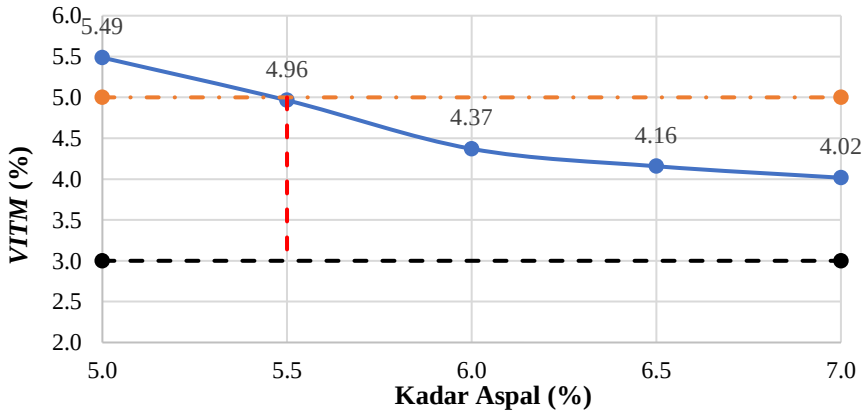


Gambar 5. 5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *MQ*

Berdasarkan Gambar 5.5 bisa dilihat bahwa seiring bertambahnya kadar aspal nilai *MQ* cenderung mengalami penurunan. Pada kadar aspal 5% sampai 7% memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, karena batas minimal nilai *MQ* untuk campuran *SMA* adalah 250 kg/mm. Hal ini terjadi karena kadar aspal yang semakin tinggi akan menghasilkan lapisan yang lebih tebal di sekitar agregat, yang meningkatkan sifat plastis campuran. Sifat plastis ini membuat campuran menjadi fleksibel dan lebih mudah berubah bentuk di bawah beban.

4. Analisis Pengaruh Nilai *VITM* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

VITM adalah persentase antara rongga udara dengan volume total campuran setelah pemadatan. Hasil nilai *VITM* dapat dilihat pada Gambar 5.6 sebagai berikut.

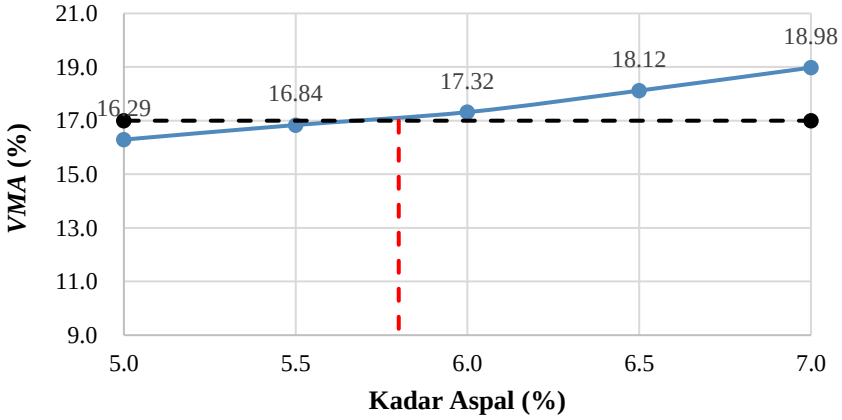


Gambar 5. 6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VITM*

Pada Gambar 5.6, terlihat bahwa nilai *VITM* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kadar aspal, pada penambahan kadar aspal 5% terlihat bahwa nilai *VITM* tidak memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, karena batas minimal nilai *VITM* untuk campuran *SMA* 3% dan batas maksimal 5%, pada kadar ini menyebabkan rongga-rongga campuran menjadi lebih besar. Sedangkan penambahan pada kadar aspal 5,5% sampai 7% telah memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, Hal ini terjadi karena seiring bertambahnya kadar aspal, aspal akan mengisi rongga-rongga dalam campuran dan membuat campuran lebih awet. Sedangkan peningkatan kadar aspal akan mengurangi nilai *VITM* dalam campuran. Kondisi ini menyebabkan campuran menjadi kedap air, sehingga udara tidak dapat masuk ke dalam campuran, yang berpotensi menyebabkan oksidasi dan membuat aspal menjadi rapuh.

5. Analisis Pengaruh Nilai *VMA* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

VMA adalah jumlah pori yang terdapat di antara butir-butir agregat dalam beton aspal padat, yang dinyatakan dalam bentuk persentase. Nilai *VMA* dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut.



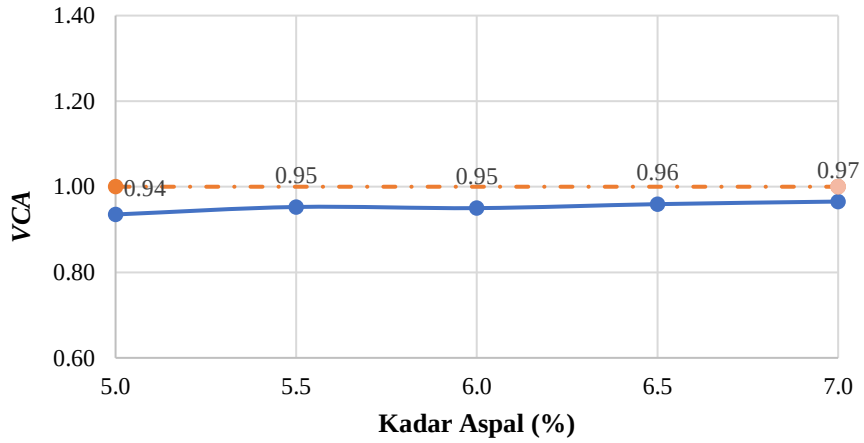
Gambar 5. 7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VMA*

Pada Gambar 5.7, terlihat bahwa nilai *VMA* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal, pada kadar aspal 5% sampai 5,5% nilai *VMA* mengalami peningkatan akan tetapi tidak masuk spek persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, dikarenakan batas minimal nilai *VMA* pada campuran *SMA*

yaitu 17%. sedangkan penambahan kadar aspal 6% sampai 7% mengakibatkan peningkatan nialai *VMA* yang memenuhi standar spek persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2 , hal ini terjadi karena semakin tebal aspal menyelimuti agregat sehingga jarak antara rongga agregat semakin besar menyebabkan campuran perkerasan menjadi lentur, lebih awet dan lebih tahan terhadap deformasi.

6. Analisis Pengaruh Nilai *VCA* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Metode yang digunakan untuk menentukan terjadinya kontak antara batuan adalah metode *VCA* (*Voids in Coarse Aggregate*). Nilai *VCA* dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut.

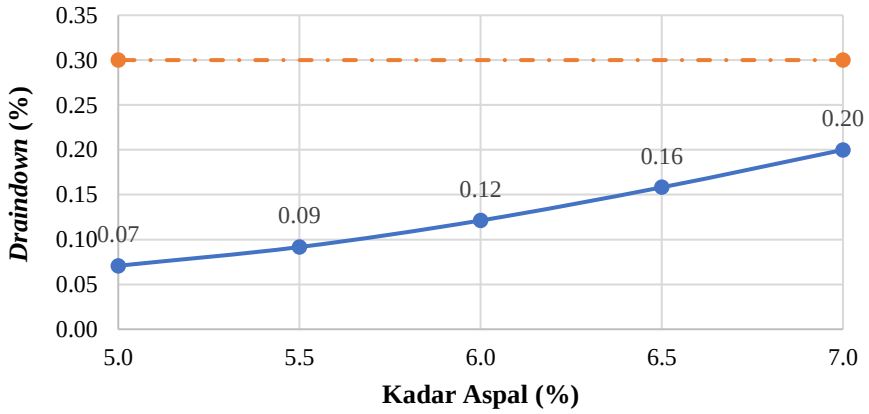


Gambar 5. 8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VCA*

Pada Gambar 5.8 terlihat bahwa pada kadar 5% sampai 7% nilai *VCA* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal, dari grafik diatas dapat disimpulkan semua kadar aspal memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, untuk campuran *SMA* batas nilai *VCA* harus kurang dari 1. hal ini dapat disimpulkan bahwa aspal semakin menyelimuti agregat, yang mengakibatkan rongga di antara agregat menjadi lebih besar. Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VCA* harus kurang dari 1.

7. Analisis Pengaruh Nilai *Draindown* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum.

   Draindown dilakukan untuk mengetahui pengaliran aspal pada campuran. nilai *draindown* ditunjukkan pada Gambar 5.9 sebagai berikut.

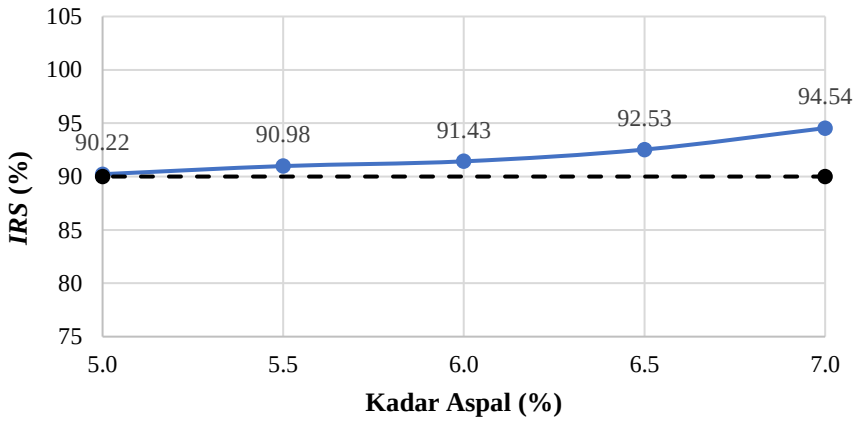


Gambar 5. 9 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Draindown*

Pada Gambar 5.9 terlihat bahwa seiring bertambahnya aspal pada kadar 5% sampai 7% nilai *draindown* cenderung mengalami peningkatan akan tetapi masih memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, untuk campuran SMA batas maksimal nilai *draindown* adalah kurang dari 0,3%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kadar aspal maka tingkat pemisahan aspal dalam campuran semakin membesar dan campuran akan kurang homogen.

8. Analisis Pengaruh Nilai *IRS* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

   Nilai *IRS* adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh air terhadap campuran aspal. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur durabilitas campuran dalam menahan beban. Nilai *IRS* dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.



Gambar 5. 10 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *IRS*

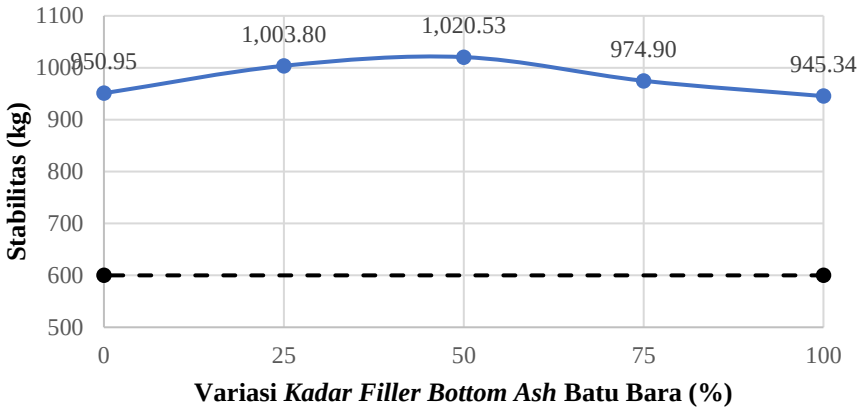
Pada Gambar 5.10 terlihat bahwa seiring bertambahnya aspal pada kadar 5% sampai 7% nilai *IRS* meningkat. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semua kadar aspal memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, dikarenakan batas minimal nilai *IRS* pada untuk campuran *SMA* harus lebih dari 90%. Peningkatan nilai *IRS* disebabkan oleh bertambahnya kadar aspal yang membuat campuran lebih padat dan meningkatkan kekedapan air. Selain itu dapat meningkatkan ikatan antara aspal dengan agregat menjadi semakin kuat, sehingga memberikan durabilitas yang lebih baik.

5.2.6 Karakteristik *Marshall* pada Kadar Aspal Optimum Campuran dengan Substitusi *Filler Bottm Ash* Batu Bara (BABB)

Berdasarkan hasil pengujian *Marshall* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* 25 mm dengan substitusi BABB, berdasarkan pengujian nilai berat jenis BABB lebih rendah dibandingkan dengan berat jenis debu batu Clereng. Hal ini akan mempengaruhi campuran aspal. Berikut adalah hasil pengujian yang menunjukkan pengaruh penggunaan BABB sebagai substitusi *filler* dengan nilai KAO sebesar 6,4% sebagai berikut.

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

   Grafik yang menunjukkan nilai stabilitas campuran terhadap substitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut.



Gambar 5. 11 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Stabilitas

Berdasarkan Gambar 5.11 Grafik menunjukkan penambahan *filler bottom ash* batu bara pada campuran menyebabkan nilai stabilitas meningkat hingga mencapai titik maksimum pada 50%. Setelah mencapai titik optimum nilai stabilitas mulai menurun pada kadar 75% dan 100%. Pencapaian nilai stabilitas maksimum pada 50% menunjukkan bahwa proporsi kadar *filler* BABB yang paling efektif untuk digunakan sebagai campuran. Dikarenkan *filler* BABB mempunyai sifat pozzolan yang berarti dapat bereaksi dengan air dan bahan pengikat seperti aspal untuk membentuk ikatan tambahan pada kadar *filler* yang tepat (sekitar 50%), *filler* berfungsi dengan baik untuk meningkatkan interaksi antara aspal dan agregat, serta meningkatkan kepadatan campuran. Ketika kadar *filler* BABB pada campuran meningkat di atas 50%, efek negatif dari sifat *pozzolan* mulai mendominasi. Penambahan *filler* yang terlalu banyak menyebabkan campuran menjadi kurang fleksibel dan rentan terhadap retak, karena *filler* berlebihan mengurangi fleksibilitas campuran. *Bottom ash* yang berlebih juga cenderung menyerap lebih banyak aspal, sehingga aspal yang tersedia untuk mengikat agregat menjadi lebih sedikit. Hal ini menyebabkan penurunan stabilitas campuran.

Nilai signifikansi analisis *ANOVA* sebesar 0,464 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,464 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh

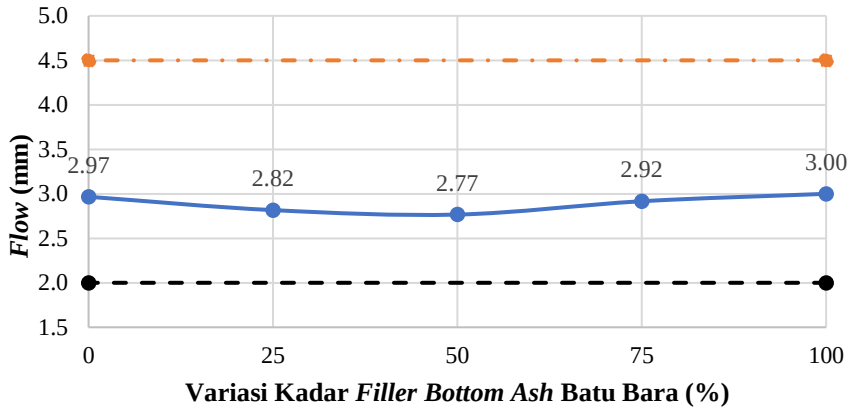
terhadap nilai stabilitas. Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai stabilitas campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Zulfhazli dkk (2016) dalam penelitiannya menunjukan bahwa penambahan abu batu bara menghasilkan nilai stabilitas yang semakin menurun. Nilai stabilitas mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar abu batu bara dalam campuran. Hal ini disebabkan oleh menurunnya penggunaan butiran abu batu yang mengakibatkan *film* aspal menjadi tebal, sehingga fungsi aspal sebagai pengikat berubah menjadi pelicin dan akan menurunya nilai stabilitas. Hasil ini sejalan juga dengan Hidayat dan Kushari (2019) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa pengisi *filler* abu ampas tebu menghasilkan kenaikan lalu mengalami penurunan lagi pada nilai stabilitas seiring dengan penambahan *filler*. Peningkatan nilai stabilitas terjadi pada kadar *filler* pengganti AAT 25%, namun mulai menurun pada kadar *filler* pengganti AAT 50% dan 75%. Peningkatan nilai stabilitas disebabkan oleh daya serap *filler* AAT yang menambah kohesi campuran, meningkatkan kerapatan serta memperluas bidang kontak dan *interlocking* antar agregat, sehingga meningkatkan stabilitas. Namun, penurunan stabilitas pada kadar *filler* pengganti AAT 50% dan 75% disebabkan oleh butiran AAT yang lebih halus, yang mudah bercampur dengan aspal dan membentuk mastik dengan *viskositas* lebih rendah. Seiring bertambahnya abu ampas tebu, awalnya stabilitas meningkat, tetapi karena mastik yang terbentuk menjadi berlebih, ikatan antar butiran melemah, sehingga stabilitas menurun.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai stabilitas minimum untuk campuran *SMA* harus lebih dari 600 kg. Dengan demikian, nilai stabilitas pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* BABB telah memenuhi persyaratan tersebut.

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

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



Gambar 5. 12 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Flow*

Berdasarkan Gambar 5.12 bisa dilihat bahwa seiring bertambahnya kadar *filler* BABB nilai *flow* yang di dapat semakin menurun. Penurunan ini terjadi karena sifat kasar *bottom ash* membuat pengisian *void* oleh aspal kurang efisien pada kadar 50%. Hal ini menghasilkan lebih banyak *void* yang tersisa di dalam campuran hal ini dapat dilihat pada nilai *VITM* dan *VMA* yang mengalami kenaikan, yang membuat aspal tidak mampu sepenuhnya mengisi ruang antar agregat, sehingga campuran kehilangan kelenturannya. Hal ini menyebabkan campuran mudah terkena deformasi akibat terkena beban. Pada kadar *filler* 50% penambahan *filler* BABB yang bersifat kasar juga dapat menyebabkan penurunan elastisitas campuran. Partikel kasar cenderung tidak saling mengunci dengan baik, yang mengurangi fleksibilitas. Akibatnya, campuran menjadi lebih keras dan sulit untuk berubah bentuk saat terkena beban, yang menyebabkan penurunan nilai *flow*.

Seiring bertambahnya kadar *filler* BABB pada 75% dan 100%, nilai *flow* mengalami kenaikan. peningkatan *filler* BABB menyebabkan campuran menjadi lebih fleksibel, dikarenakan distribusi *filler* yang lebih baik dan pengurangan penyerapan aspal berlebihan membantu meningkatkan elastisitas campuran. Hal ini menyebabkan nilai *flow* kembali meningkat. Kadar *filler* yang tinggi juga dapat menciptakan keseimbangan baru dalam komposisi campuran, di mana *bottom ash* berfungsi sebagai pengisi yang

memperbaiki karakteristik fisik campuran. Dengan kata lain, penambahan *filler* pada kadar yang lebih tinggi dapat meningkatkan sifat pengikat aspal, yang pada akhirnya meningkatkan *flow*.

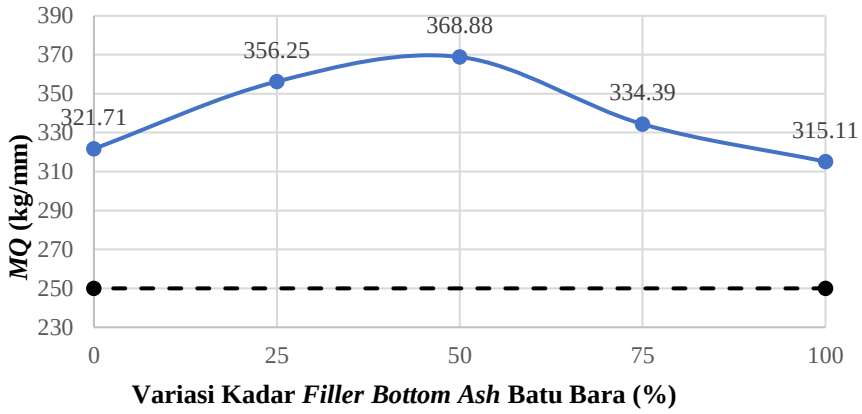
Nilai signifikansi analisis *ANOVA* sebesar 0,032 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,032 < 0,05 (signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB berpengaruh terhadap nilai *flow*. Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB dapat mempengaruhi nilai *flow* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Hidayat dan Kushari (2019) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa pengisi *filler* abu ampas tebu menghasilkan penurunan lalu mengalami kenaikan lagi pada nilai *flow* dengan penambahan *filler*. Terlihat bahwa nilai *flow* cenderung meningkat seiring dengan penambahan kadar *filler* pengganti AAT. Peningkatan ini diduga terjadi karena penambahan AAT membuat campuran menjadi lebih plastis dan kurang tahan terhadap beban yang tinggi. Hasil ini sejalan juga dengan Umboh dkk (2024) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa pengisi *filler Bottom Ash* Batu Bara menghasilkan peningkatan nilai *flow* seiring bertambahnya kadar *Bottom Ash* dari kadar 10% sampai 100%. Hal ini disebabkan karena *filler bottom ash* membuat campuran kurang rapat sehingga menambah kelenturan atau deformasi namun peningkatan didapat tidak signifikan.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* untuk campuran *stone matrix asphalt* berkisar antara 2,0 mm hingga 4,5 mm. Oleh karena itu, nilai *flow* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* BABB telah memenuhi kriteria yang ditetapkan.

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

   Grafik hasil nilai *MQ* akibat pengaruh dari subtitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5. 13 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *MQ*

Berdasarkan Gambar 5.13 bisa dilihat bahwa seiring bertambahnya *filler* BABB nilai *MQ* mengalami peningkatan hingga titik maksimum di kadar *filler* 50% dan mengalami penurunan Kembali seiring bertambahnya *filler* BABB hingga kadar 100%. Pada kadar *filler* 50% penambahan BABB sebagai *filler* membantu mengisi ruang kosong (*void*) di antara agregat dengan efektif. Pengisian yang optimal ini meningkatkan stabilitas campuran, yang menjadikan nilai *MQ* naik. Kadar *filler* yang optimal membantu menjaga stabilitas campuran, mencegah deformasi permanen, dan meningkatkan daya tahan terhadap beban. Kenaikan nilai *MQ* mencerminkan bahwa campuran memiliki karakteristik ketahanan yang baik, mampu menahan tekanan tanpa mengalami kerusakan.

Ketika kadar *filler* meningkat menjadi 75% dan 100%, *filler* BABB yang kasar dapat menyebabkan elastisitas menurun dan meningkatkan kekerasan pada campuran. Hal ini terjadi karena partikel kasar tidak saling mengunci dengan baik, sehingga mengurangi fleksibilitas. Akibatnya, campuran menjadi lebih sulit untuk menyesuaikan diri dengan deformasi, yang menyebabkan penurunan nilai *MQ*. *Filler* BABB yang berlebihan dapat menyerap lebih banyak aspal, mengurangi jumlah aspal yang tersedia untuk melapisi dan mengikat agregat. Ini berakibat pada penurunan daya ikat antara aspal dan agregat, yang mengurangi nilai *MQ*. Ketidakmampuan aspal untuk

melapisi agregat secara merata menyebabkan penurunan kekuatan dan stabilitas campuran.

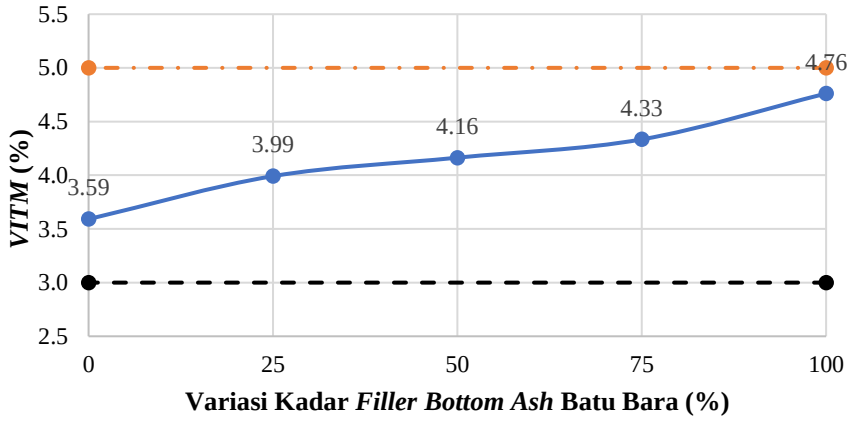
Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,07 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,07 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *MQ*. Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *MQ* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Hidayati dan Fauziah (2018) dalam penelitiannya menerangkan bahwa seiring penambahan kadar *filler* abu sekam padi sampai kadar *filler* 50% lalu mengalami penurunan kembali pada kadar 75%. menghasilkan nilai *MQ* yang semakin meningkat. Kenaikan nilai *MQ* pada campuran *SMA* 12,5 mm menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan kadar *filler* pengganti ASP, campuran menjadi cenderung kurang stabil. Nilai *MQ* mencerminkan tingkat fleksibilitas perkerasan dalam menahan beban lalu lintas. Hasil ini sejalan juga dengan Lizar dkk (2021) didalam penelitiannya menerangkan bahwa seiring penambahan *Filler Spent Bleaching Earth* sampai kadar filler 50% berkontribusi untuk meningkatkan nilai *MQ*, lalu mengalami penurunan kembali pada kadar 75% hingga 100% dikarenakan campuran kurang fleksibel, dan Nilai *Marshall* dapat dipengaruhi oleh stabilitas dan *flow*.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *MQ* harus lebih dari 250 kg/mm. Dengan demikian, nilai *MQ* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* BABB telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

4. Analisis Dampak Variasi Substitusi *Filler* Terhadap *Nilai Void in The Mix* (*VITM*)

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



Gambar 5. 14 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VITM*

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5.14 dapat dilihat bahwa dengan substitusi *filler* BABB nilai *VITM* semakin meningkat, Hal ini disebabkan karena *filler* BABB memiliki tekstur yang lebih kasar daripada *filler* abu batu yang membuat aspal menjadi tidak plastis dan mengurangi kemampuan aspal dalam mengisi rongga dalam campuran, sehingga membuat campuran memiliki rongga udara yang besar. Campuran dengan rongga udara yang besar akan mengakibatkan ketidak kedapan terhadap air dan udara, menyebabkan campuran lebih rentan terhadap oksidasi dan deformasi yang pada akhirnya mempengaruhi keawetan campuran.

Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,975 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,975 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *VITM*. Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *VITM* campuran.

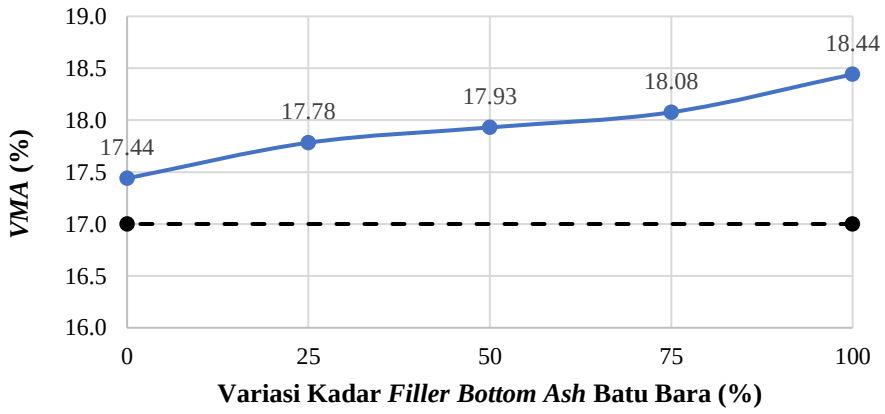
Penelitian ini sejalan dengan Hawari dan Lizar (2021) dalam penelitiannya bahwa penggantian *filler* abu sawit *fly ash* dan *bottom ash* menghasilkan nilai *VITM* yang semakin naik dikarnakan penambahan *fly ash* dan *bottom ash* didalam campuran aspal, maka semakin besar pula rongga dalam campuran yang dihasilkan hal tersebut disebabkan oleh sifat *pozzoland*. Sifat *pozzoland*

yang dimiliki *fly ash* dan *bottom ash* menyebabkan *filler* menggumpal sehingga pemadatan lebih sulit untuk dilakukan.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VITM* untuk Campuran *SMA* memiliki nilai antara 3% sampai 5%, sehingga nilai *VITM* pada campuran *SMA* dengan variasi campuran *filler* BABB telah memenuhi persyaratan.

5. Analisis Dampak Variasi Substitusi Agregat Halus Terhadap Nilai *Void Mineral Aggregate* (*VMA*)

Grafik hasil nilai *VMA* akibat pengaruh substitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5. 15 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VMA*

Berdasarkan Gambar 5.15 bisa dilihat bahwa semakin tinggi persentase substitusi *filler* BABB dalam campuran maka nilai *VMA* mengalami peningkatan. Hal ini dikarenakan sifat *filler* BABB yang cenderung memiliki tekstur permukaan lebih kasar dan berpori besar menyebabkan workability campuran berkurang, sehingga ketika campuran dipadatkan menjadi kurang maksimal dan menghasilkan void yang besar. Hal ini terjadi karena *filler* tidak dapat mengisi ruang kosong di antara agregat dengan efisien. Tekstur yang kasar membuat partikel abu sulit untuk saling mengunci dengan agregat lain, sehingga menciptakan lebih banyak ruang antar partikel atau *void*. Akibatnya, volume void dalam agregat mineral (*VMA*) meningkat karena ruang kosong

di antara agregat lebih banyak. Peningkatan nilai *VMA* akan menyebabkan jarak antar agregat menjadi lebih besar. Nilai *VMA* berfungsi sebagai indikator ketahanan dan daya tahan campuran.

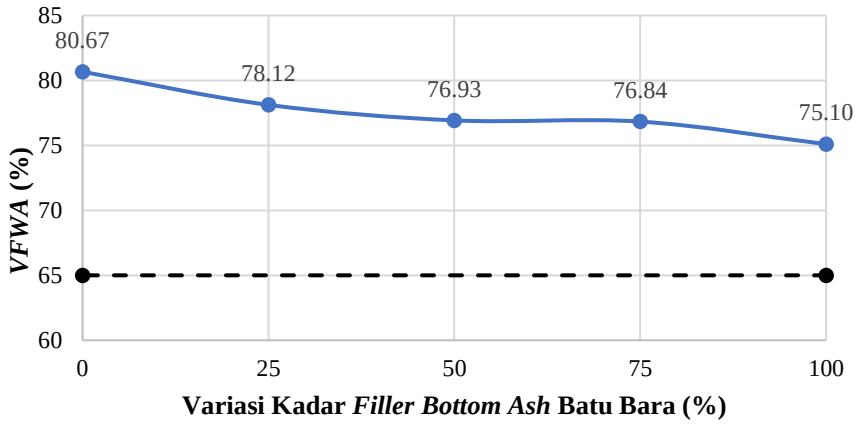
Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,975 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,975 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *VMA*. Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *VMA* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Hawari dan Lizar (2021) dalam penelitiannya menjelaskan penggantian *filler* abu sawit *fly ash* dan *bottom ash* menghasilkan nilai *VMA* yang mengalami kenaikan seiring penambahan *filler*. Peningkatan nilai *VMA* pada benda uji yang menggunakan *filler fly ash* dan *bottom ash* disebabkan oleh sifat *pozzolan* yang dimiliki oleh kedua material tersebut. Sifat *pozzolan* pada *fly ash* dan *bottom ash* menyebabkan *filler* cenderung menggumpal, sehingga proses pemadatan menjadi lebih sulit. Hasil ini sejalan juga dengan Wenur dkk (2023) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa pengisi *filler fly ash* batu bara menghasilkan peningkatan nilai *VMA* seiring dengan penambahan *filler*. Ini menunjukkan peningkatan nilai *VMA* menyebabkan lebih besar ruang yang tersedia untuk diselimuti *fly ash* sehingga jarak antara rongga menjadi besar sehingga mempengaruhi daya tahan (*durability*) campuran tersebut serta sifat kekedapan terhadap air.

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VMA* harus lebih dari 17%. Nilai *VMA* yang didapatkan pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi *filler* BABB telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

6. Analisis Dampak Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai *Void Filled With Asphalt* (*VFWA*)

Grafik hasil nilai *VFWA* akibat pengaruh substitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut.



Gambar 5. 16 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *VFWA*

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh pada Gambar 5.16 dapat disimpulkan bahwa dengan subtitusi *filler* BABB nilai *VFWA* mengalami penurunan. Maka dapat diindikasikan Penurunan nilai *VFWA* disebabkan karena semakin banyaknya BABB, tidak diimbangi dengan kenaikan kadar aspal yang digunakan menyebabkan presentase rongga yang tidak terisi menjadi semakin banyak. Hal ini berkaitan dengan sifat kasar dan porus abu *bottom ash* menyebabkan ikatan antara aspal dan agregat menjadi kurang efektif. Agregat yang kasar menciptakan lebih banyak *void*, sementara sifat porus menyerap aspal, membuat campuran menjadi kurang padat dan sulit untuk memastikan aspal mengisi ruang di antara agregat secara maksimal. Akibatnya, semakin tinggi kadar BABB, aspal tidak dapat mendistribusikan dirinya secara merata di seluruh campuran, sehingga mengurangi efektivitasnya dalam mengisi *void*. Hal ini yang menyebabkan penurunan nilai *VFWA*.

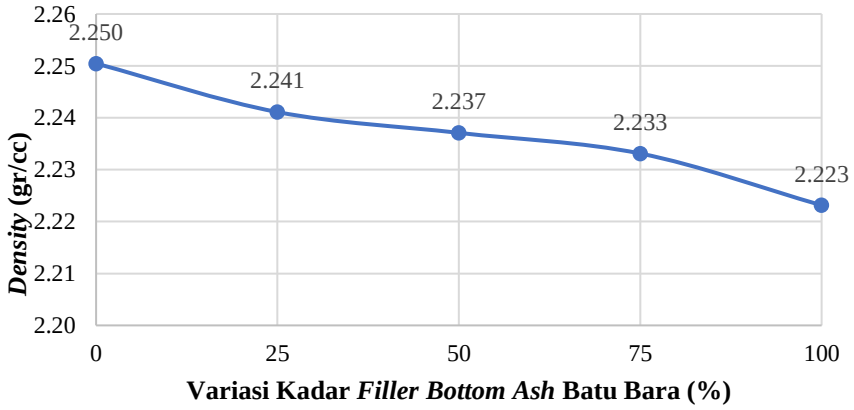
Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,974 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,974 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *VFWA*. Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *VFWA* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Banafsaj dan Fauziah (2018) dalam penelitiannya menunjukan bahwa penambahan abu sekam padi menghasilkan nilai *VFWA* yang semakin menurun. Penurunan nilai *VFWA* terjadi akibat bertambahnya jumlah ASP yang tidak diikuti dengan peningkatan kadar aspal, sehingga persentase rongga yang tidak terisi menjadi lebih besar. Hal ini berhubungan dengan tekstur permukaan ASP yang kasar dan sangat berpori, yang menyebabkan tingginya penyerapan aspal oleh ASP, sehingga menghasilkan lapisan aspal yang tipis. Hasil ini sejalan juga dengan Chasanah dan Sukmo (2023) dalam penelitiannya menerangkan bahwa pemakaian *filler* bubuk talk menghasilkan nilai *VFWA* yang semakin menurun seiring penambahan kadar *filler*. Penurunan nilai *VFWA* dapat mengurangi ketahanan terhadap air dan menyebabkan campuran menjadi lebih cepat mengeras serta kurang tahan lama.

Berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *VFWA* harus lebih dari 65%. Dengan demikian, nilai *VFWA* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* BABB telah memenuhi kriteria yang ditetapkan.

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

Grafik yang menunjukkan hasil nilai *density* akibat pengaruh substitusi *filler* ABA dapat dilihat pada Gambar 5.17 di bawah ini.



Gambar 5. 17 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Density*

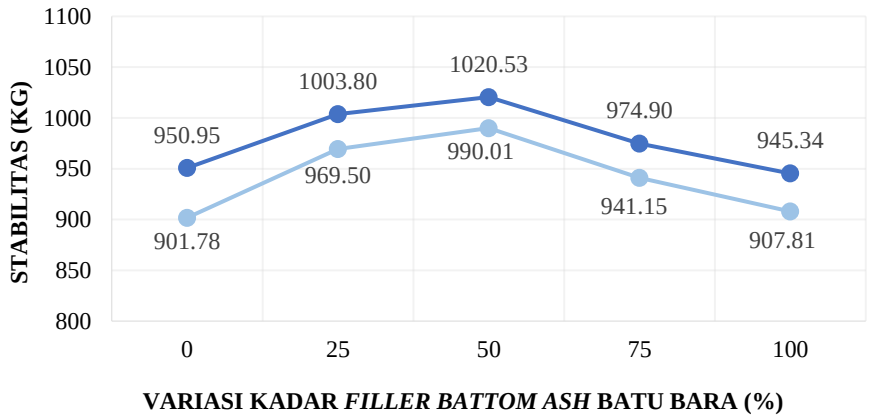
Berdasarkan Gambar 5.17 Grafik menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya persentase penambahan *filler* BABB nilai densitas campuran mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan adanya hubungan negatif antara proporsi *filler* dan densitas campuran. Dikarenakan BABB merupakan material dengan berat jenis yang lebih rendah dibandingkan abu batu, Sehingga dengan berat jenis yang lebih kecil menyebabkan volume yang lebih besar pada berat yang sama. Karakteristik ini menyebabkan penurunan densitas campuran pada saat *filler* ditambahkan. Struktur berpori dari abu *bottom ash* memungkinkan lebih banyak ruang kosong dalam campuran, yang mengurangi kepadatan keseluruhan. Penambahan BABB dapat menyebabkan aspal terikat dengan cara yang kurang efektif. *Filler* BABB dapat menyerap aspal, namun, karena sifatnya yang lebih ringan dan berpori, hasilnya adalah aspal tidak terdistribusi merata dan tidak mampu mengikat agregat dengan baik. Hal ini membuat kerapatan pada campuran dengan substitusi *filler* BABB lebih rendah dibandingkan tanpa substitusi.

Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,975 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,975 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *Density*. Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *Density* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Banafsaj dan Fauziah (2018) dalam penelitiannya menunjukan bahwa penambahan abu sekam padi menghasilkan nilai *Densitas* yang semakin menurun. Hal ini dikarenakan aspal yang terserap juga semakin besar, mengakibatkan jumlah rongga-rongga antar butiran semakin banyak, sehingga kepadatan campuran semakin berkurang. Hasil yang di dapat berbeda dengan penelitian Chasanah dan Sukmo (2023) dalam penelitiannya menerangkan bahwa pemakaian *filler* bubuk talk menghasilkan nilai *Densitas* semakin meningkat seiring penambahan kadar *filler*. walaupun hanya meningkat sedikit.

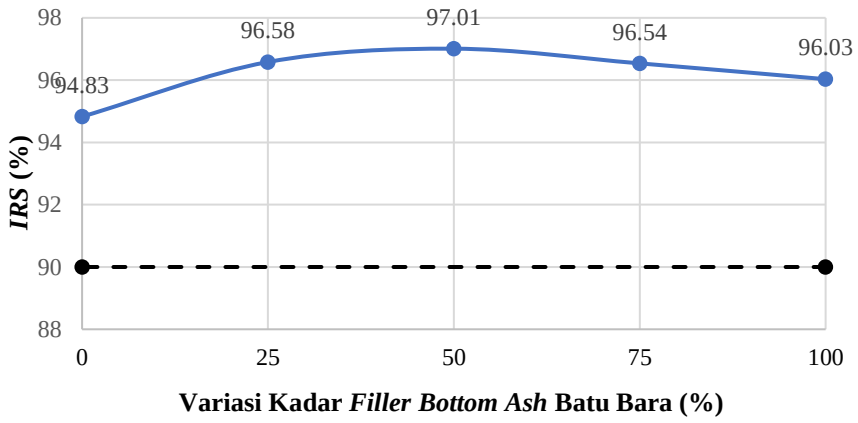
5.2.7 Karakteristik Pengujian *Index of Retained Strength* (*IRS*) pada KAO Campuran dengan Substitusi *Filler* BABB

Pengujian *IRS* adalah parameter yang digunakan untuk mengukur kemampuan suatu campuran aspal dalam mempertahankan kekuatannya setelah mengalami pengujian yang melibatkan pengaruh rendaman air. Serta untuk mengetahui nilai Indeks durabilitas dengan membandingkan nilai stabilitas benda uji yang direndam dengan air selama 0,5 jam terhadap perendaman 24 jam serta perendaman 0,5 jam terhadap 48 jam pada suhu 60°C. Nilai stabilitas rendaman 0,5 jam dan rendaman 24 jam dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut.



Gambar 5. 18 Grafik Hubungan antara Rendaman dan Stabilitas

Berdasarkan Gambar 5.18, terlihat bahwa stabilitas setelah rendaman 24 jam lebih rendah dibandingkan dengan rendaman selama 0,5 jam. Hal ini disebabkan oleh proses perendaman selama 24 jam yang memungkinkan air masuk ke dalam pori-pori campuran, mengurangi ikatan adhesi antara aspal dan agregat. Grafik yang menunjukkan nilai *IRS* berdasarkan variasi substitusi *BABB* dapat dilihat pada Gambar 5.19.



Gambar 5. 19 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *IRS*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.19, terlihat bahwa nilai *IRS* mengalami peningkatan seiring penambahan *filler* BABB pada campuran. Peningkatan tertinggi berada di kadar 50 % Dikarenakan ketika kadar *filler* berada pada level optimal (50%), campuran menunjukkan kombinasi terbaik antara kekuatan dan elastisitas. Hal ini berkontribusi pada peningkatan nilai *IRS* setelah perendaman karena campuran mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang beragam. Kadar *filler* yang moderat meningkatkan kemampuan campuran untuk menahan pengaruh air. Pada kadar 50%, campuran mampu mengurangi kerusakan akibat perendaman, sehingga nilai *IRS* meningkat karena campuran menunjukkan daya tahan yang lebih baik terhadap kelembaban.

Namun, setelah mencapai kadar 50%, penambahan *filler* lebih lanjut (75% dan 100%) dapat menyebabkan pengikatan yang berlebihan di antara partikel agregat. Ini mengurangi durabilitas campuran dan meningkatkan kerentanan terhadap keretakan setelah perendaman. Kadar *filler* yang terlalu tinggi dapat membatasi ruang untuk ekspansi dan penyesuaian, yang berpotensi menyebabkan deformasi dan kerusakan. Hal ini berkontribusi pada penurunan nilai *IRS* karena campuran menjadi lebih rentan terhadap pengaruh air.

Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,997 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,997 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *IRS*.

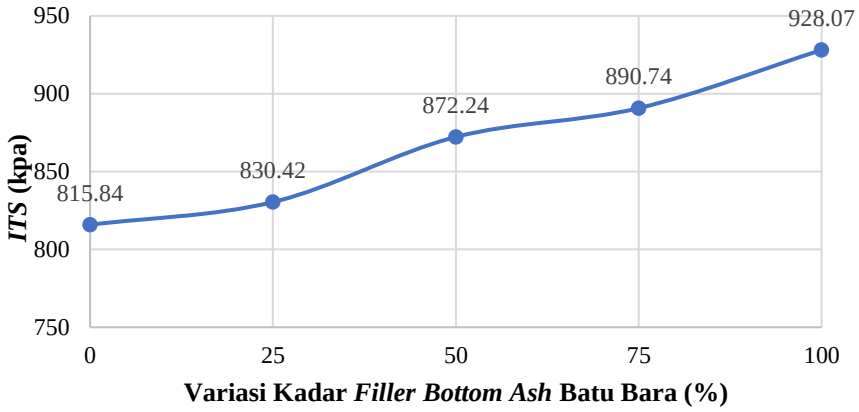
Hal ini mengindikasikan campuran sma 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *IRS* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Hidayati dan Fauziah (2018) dalam penelitiannya menerangkan bahwa pemakaian *filler* abu sekam padi menghasilkan nilai *IRS* yang semakin meningkat. Pada kadar ASP 25%, 50% dan 75% memenuhi syarat spesifikasi Bina Marga 2010 yaitu minimum 90%. Pada kadar *filler* pengganti abu sekam 0% sebesar 86,997% memiliki nilai *IRS* dibawah syarat spesifikasi yang ditentukan, namun nilai IRS pada kadar tersebut masih berada di atas batas minimum yang direkomendasikan oleh Asphalt Institute >75%. Hal ini dikarenakan volume rongga yang semakin sedikit karena *filler* mampu menutupi rongga kosong, mengakibatkan campuran menjadi mampat dan kedap terhadap air, yang pada akhirnya akan meningkatkan keawetan campuran. Hal ini sejalan juga dengan Hidayat dan Kushari (2019) Dalam penelitiannya, penggunaan abu ampas tebu menunjukkan nilai *IRS* mengalami peningkatan hingga mencapai kadar 50%. Hal ini disebabkan oleh kandungan silika dalam abu ampas tebu, yang dapat meningkatkan durabilitas campuran.

Menurut spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *IRS* harus lebih dari 90%. Dengan demikian, nilai *IRS* pada campuran *SMA* yang menggunakan variasi *filler* BABB telah memenuhi persyaratan yang ditentukan.

5.2.8 Karakteristik Pengujian *Index Tensile Strength* (*ITS*) pada KAO Campuran dengan Substitusi BABB

ITS merupakan metode pengujian yang digunakan untuk menentukan nilai gaya tarik tidak langsung pada campuran aspal yang disebabkan oleh beban lalu lintas. Grafik yang menunjukkan hasil nilai *ITS* terkait pengaruh substitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.20 di bawah ini.



Gambar 5. 20 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *ITS*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.20 terlihat bahwa nilai *ITS* meningkat dengan adanya substitusi *filler* BABB. Hasil analisis *ANOVA* menunjukkan bahwa *filler* BABB tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai *ITS*. Hal ini mengindikasikan campuran dengan *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh. Peningkatan nilai *ITS* sejalan dengan penurunan nilai *CL* menunjukkan bahwa penambahan *filler* BABB berkontribusi terhadap ikatan yang lebih kuat antara agregat dan aspal. Hal ini diakibatkan BABB dapat meningkatkan kohesi antara partikel-partikel agregat dalam campuran aspal. Ketika kadar *filler* ini ditambahkan, *filler* BABB membantu mengikat partikel agregat dengan lebih kuat, sehingga meningkatkan kekuatan tarik campuran. Pada kadar tertentu, *filler* abu *bottom ash* dapat berfungsi sebagai penguat dalam campuran, meningkatkan efisiensi material. Namun, penting untuk mengatur kadar yang tepat agar efek positif ini tetap terjaga.

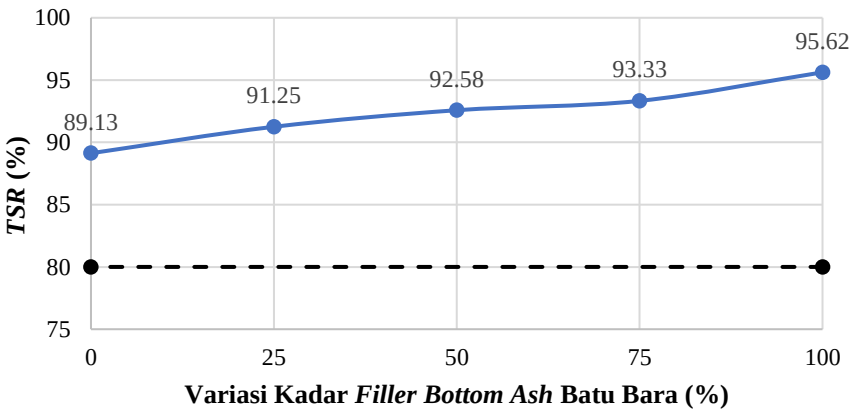
Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,962 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,962 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *ITS*. Hal ini mengindikasikan campuran *SMA* 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *ITS* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Yuniarti (2019) dalam penelitiannya menemukan bahwa penggunaan *filler* limbah kaca meningkatkan nilai *ITS* atau

beban maksimum yang dapat ditanggung oleh campuran hingga mencapai batas keruntuhan pada kadar 75% *filler* limbah kaca. Peningkatan ini juga sejalan dengan peningkatan nilai cantabro loss, yang menghasilkan campuran dengan ketahanan yang baik terhadap disintegrasi. Hasil ini sejalan juga dengan Chasanah dan Sukmo (2023) dalam penelitian mereka menunjukkan bahwa penggunaan *filler* bubuk talk meningkatkan nilai *ITS* hingga mencapai kadar 50%. Tingginya nilai *ITS* ini mengindikasikan bahwa keretakan yang terjadi pada campuran semakin berkurang.

5.2.9 Karakteristik Pengujian *Tensile Strength Ratio* (*TSR*) pada KAO Campuran dengan Substitusi BABB.

Nilai *TSR* diperoleh dari perbandingan kekuatan daya tahan tarik bahan uji yang direndam selama 24 jam dalam waterbath pada suhu 60ºC dengan bahan uji yang tidak direndam. Nilai ini dihitung dari perbandingan hasil daya tahan tarik yang kemudian dikonversi ke dalam bentuk persen. Grafik yang menunjukkan hasil nilai *TSR* terkait pengaruh substitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.21 di bawah ini.



Gambar 5. 21 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *TSR*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.21 bisa disimpulkan bahwa seiring bertambahnya substitusi *filler* BABB nilai *TSR* mengalami peningkatan. Hal ini dikarenakan *filler* BABB dapat meningkatkan ketahanan campuran aspal terhadap perendaman dalam air. Sifat fisik *filler* BABB membantu mengikat agregat dengan lebih baik, sehingga mengurangi kemungkinan

kerusakan akibat kelembaban. Selain itu penambahan *filler* BABB dapat membantu menciptakan struktur campuran yang lebih stabil, sehingga meningkatkan kemampuan campuran untuk menahan beban dan tekanan dari lalu lintas, sekaligus mengurangi kerentanan terhadap deformasi.

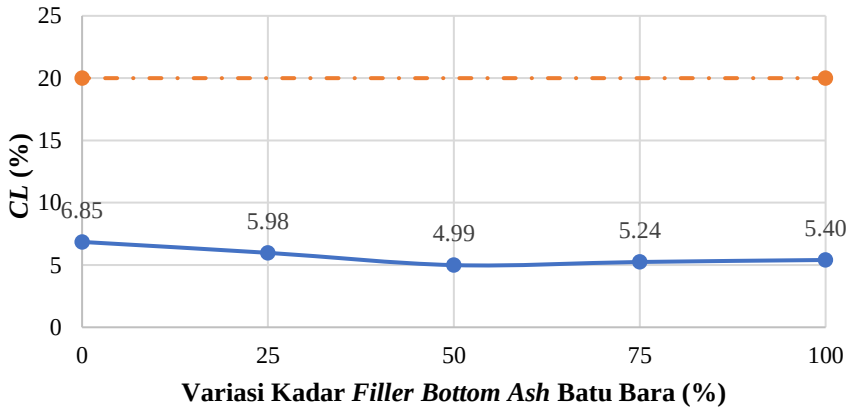
Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,988 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,988 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *TSR*. Hal ini mengindikasikan campuran *SMA* 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *TSR* campuran.

Penelitian ini sejalan dengan Fauziah, dkk (2012) *fly ash* dapat mengisi rongga dalam campuran, yang menyebabkan peningkatan *viskositas* dan kohesi aspal. Hal ini memberikan efek signifikan dalam menjaga stabilitas campuran terhadap gangguan air, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap air dan keawetan.

Sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *TSR* harus lebih dari 80%. Dengan demikian, nilai *TSR* pada campuran *SMA* yang menggunakan variasi *filler* BABB telah memenuhi persyaratan yang ditentukan.

5.2.10 Karakteristik Pengujian *Cantabro Loss* pada KAO Campuran dengan Substitusi BABB

Nilai *CL* menunjukkan sejauh mana ketahanan benda uji terhadap keausan dengan menggunakan mesin *Los Angeles*. Dalam pengujian ini, benda uji dimasukkan ke dalam mesin *Los Angeles* untuk mengevaluasi tingkat keausannya. *CL* memberikan informasi tentang kemampuan perkerasan aspal dalam menahan gesekan antara roda kendaraan dan permukaan jalan. Grafik yang menunjukkan hasil nilai *CL* sebagai dampak dari substitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.22 berikut.



Gambar 5. 22 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Cantabro Loss*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.22 terlihat bahwa nilai *CL* mengalami penurunan dengan adanya substitusi *filler* BABB. Penurunan nilai CL seiring dengan penambahan *filler* hingga mencapai titik terendah pada kadar 50% menunjukkan bahwa *filler* berkontribusi positif terhadap stabilitas campuran aspal. Hal ini dikarenakan *bottom ash* memiliki sifat fisik dan kimia yang mampu mengikat agregat dengan lebih baik menunjukkan bahwa campuran aspal menjadi lebih stabil dan memiliki ikatan yang lebih baik, sehingga mengurangi risiko kerusakan akibat abrasi. Dengan kadar *filler* yang optimal, yaitu 50%, campuran menjadi lebih kohesif dan tahan terhadap pelapukan, sehingga nilai *CL* menurun.

Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,067 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,067 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *CL*. Hal ini mengindikasikan campuran *SMA* 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *CL* campuran.

Namun, seiring penambahan kadar *filler* menjadi 75% dan 100%, nilai *CL* kembali mengalami kenaikan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, peningkatan proporsi *filler* mengurangi jumlah aspal dalam campuran, yang dapat mengurangi daya rekat dan elastisitas campuran. Kedua, jika *filler* yang digunakan tidak memiliki karakteristik yang sesuai, dapat menyebabkan segregasi

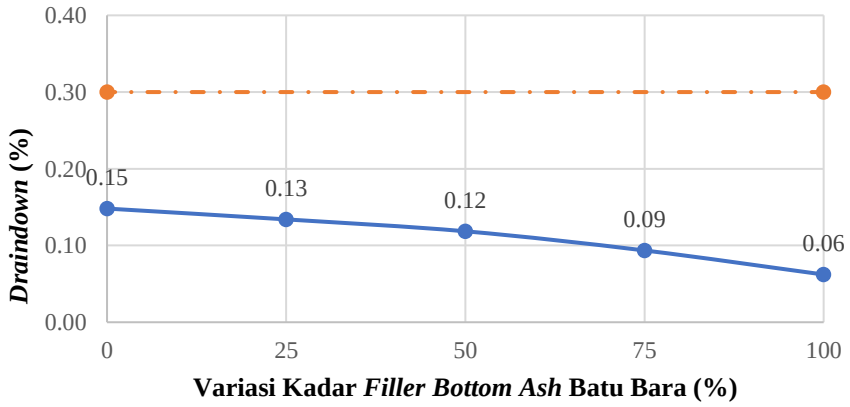
dan mengurangi kualitas campuran secara keseluruhan. Akibatnya, campuran menjadi lebih rentan rusak, yang tercermin dalam peningkatan nilai *CL*.

Penelitian ini sejalan dengan Yuniarti (2019) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa penambahan *filler* limbah kaca berpengaruh terhadap penurunan nilai *CL* hingga kadar substitusi 75%. Semakin rendah nilai *CL*, campuran yang dihasilkan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap disintegrasi.

Menurut ASSHTO 2020, nilai *CL* harus berada dibawah 25% Dengan demikian, nilai *CL* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* BABB telah memenuhi kriteria yang ditetapkan.

5.2.11 Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *filler* Terhadap Nilai *Draindown*

Draindown adalah kondisi dimana di mana 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. Grafik hasil nilai *draindown* akibat pengaruh substitusi *filler* BABB dapat dilihat pada Gambar 5.23 berikut.



Gambar 5. 23 Grafik Pengaruh BABB Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap *Draindown*

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.23 menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya penambahan *filler bottom ash* batu bara, nilai *draindown* pada campuran *SMA* mengalami penurunan. Penurunan *draindown* akibat penambahan *filler* BABB menunjukkan bahwa campuran

menjadi lebih stabil dan memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap pemisahan aspal. Hal ini mengindikasikan bahwa Penambahan *filler* BABB mampu untuk meningkatkan kekompakan campuran. *Filler* ini dapat menyerap aspal dengan baik dan membantu mengikat agregat secara lebih efektif, sehingga meminimalkan potensi *draindown*. Semakin banyak *filler* yang ditambahkan, semakin banyak rongga yang terisi, yang berkontribusi pada pengurangan pengaliran aspal pada campuran.

Nilai signifikan analisis *ANOVA* sebesar 0,483 pada tingkat signifikansi 0,05. Hasil signifikansi didapatkan 0,483 > 0,05 (tidak signifikan) sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa *filler* pengganti BABB tidak berpengaruh terhadap nilai *Draindown*. Hal ini mengindikasikan campuran *SMA* 25 mm dengan penggunaan *filler* pengganti BABB tidak mempengaruhi nilai *Draindown* campuran.

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

Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *draindown* harus kurang dari 0,3%. Dengan demikian, nilai *draindown* pada campuran *SMA* dengan variasi *filler* BABB telah memenuhi kriteria yang ditetapkan.

5.2.12 Analisa Pengaruh Variasi Subtitusi *Filler* Terhadap Nilai *VCA*

Pengujian *VCA* menunjukkan bahwa gradasi yang digunakan menghasilkan rasio VCA_{mix}/VCA_{drc} berkisar 0,8 (<1,0). Kesimpulannya, campuran *SMA* dengan ukuran 25 mm menunjukkan kontak antar agregat kasar yang baik.

5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler Bottom Ash* Batu Bara

Rekapitulasi hasil pengujian pada campuran dengan menggunakan *filler* BABB dapat dilihat pada Tabel 5.18.

Tabel 5. 16 Rekapitulasi Hasil Pengujian pada Campuran dengan Menggunakan *Filler* BABB

Tinjauan	Parameter	Subtitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	Stabilitas (kg)	950,95	1003,80	1020,53	974,90	945,34	Semakin besar kadar subtitusi *filler* BABB maka nilai stabilitas campuran meningkat tidak signifikan hingga mencapai titik maksimum pada 50%, Setelah mencapai titik optimum nilai stabilitas mulai menurun tidak signifikan pada kadar 75% dan 100%. Sehingga Campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap deformasi pada kadar *filler* 0% sampai 50 % dan pada kadar 75% dan 100% ketahanan campuran terhadap deformasi mulai menurun
	Flow (mm)	2,97	2,82	2,77	2,92	3,00	Semakin besar kadar subtitusi *filler* BABB maka nilai *Flow* pada campuran mengalami penurunan yang tidak signifikan hingga mencapai titik terendah pada kadar *filler* 50%, Setelah mencapai titik terendah nilai *Flow* mulai kembali naik tidak signifikan pada kadar 75% dan 100%. Sehingga pada kadar *filler* 0% sampai 50 % campuran menjadi kurang elastis Ketika terkena beban. pada kadar 75% dan 100% campuran sedikit lebih elastis Ketika terkena beban atupun deformasi.
	MQ (kg/mm)	321,71	356,25	368,88	334,39	315,11	Semakin besar kadar subtitusi *filler* BABB maka nilai *MQ* mengalami peningkatan tidak signifikan hingga mencapai titik maksimum pada 50% Sehingga fleksibilitas menjadi baik dan tidak mudah terkena deformasi. Setelah mencapai titik optimum nilai stabilitas mulai menurun tidak signifikan pada kadar *filler* 75% dan 100%. Sehingga menyebabkan campuran kurang fleksibel jika terkena beban.
	ITS (kPa)	815,84	830,42	872,24	890,74	928,07	Semakin besar substitusi *filler* BABB maka nilai *ITS* mengalami peningkatan yang tidak signifikan. Sehingga campuran memiliki ketahanan terhadap fatigue crack.

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

Tinjauan	Parameter	Subtitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumentrik	*VITM* (%)	3,59	3,99	4,16	4,33	4,76	Semakin besar substitusi *filler* BABB maka nilai *VITM* mengalami peningkatan namun tidak signifikan. Sehingga menyebabkan campuran memiliki rongga udara yang lumayan besar.
	VFWA (%)	80,67	78,12	76,93	76,84	75,10	Semakin besar substitusi *filler* BABB menyebabkan nilai *VFWA* mengalami penurunan tetapi tidak signifikan. Sehingga menyebabkan aspal tidak dapat mendistribusikan dirinya secara merata di seluruh campuran dikarenakan aspal banyak terserap oleh *filler* yang mengakibatkan lapisan selimut aspal menjadi tipis, dan mengurangi efektivitasnya dalam mengisi *void*, sehingga menyebabkan campuran kurang tahan terhadap deformasi permanen
	VMA	17,44	17,78	17,93	18,08	18,44	Semakin besar substitusi *filler* BABB maka nilai *VMA* mengalami peningkatan namun tidak signifikan. Sehingga campuran memiliki rongga yang semakin besar dan jarak antar agregat semakin menjauh.
	VCA	0,820	0,827	0,835	0,846	0,866	Semakin besar substitusi *filler* BABB maka nilai *VCA* mengalami peningkatan yang tidak signifikan. Nilai *VCA*
	Density (gr/cc)	2,250	2,241	2,237	2,233	2,223	Semakin besar substitusi *filler* BABB maka nilai *density* mengalami penurunan tetapi tidak signifikan. Sehingga campuran memiliki kerapatan lebih rendah dibandingkan tanpa substitusi.

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

Tinjauan	Parameter	Subtitusi *Filler Bottom Ash* Batu Bara (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas	*IRS* (%)	94,83	96,58	97,01	96,54	96,03	Semakin besar substitusi *filler* BABB maka nilai *IRS* cenderung mengalami peningkatan tetapi tidak signifikan. Hal ini terjadi karena campuran mempunyau kemampuan untuk mempertahankan ikatan antar aspal dan agregat. Sehingga menghasilkan campuran menjadi awet.
	Draindown (%)	0,15	0,13	0,12	0,09	0,06	Semakin besar substitusi *filler* BABB maka nilai *draindown* mengalami penurunan tetapi tidak signifikan. Sehingga pemisahan aspal terhadap campuran semakin kecil dan campuran bersifat homogen.
	CL (%)	6,85	5,98	4,99	5,24	5,40	Semakin besar kadar subtitusi *filler* BABB maka nilai *CL* pada campuran cenderung mengalami penurunan yang tidak signifikan hingga mencapai titik terendah pada kadar *filler* 50%, sehingga pada kadar *filler* 0% sampai 50 % campuran menjadi lebih tahan terhadap benturan yang diteerima. Setelah mencapai titik terendah nilai *CL* mulai kembali naik tidak signifikan pada kadar 75% dan 100%. pada kadar 75% dan 100% yang menyebabkan campuran menjadi lebih rentan terhadap kerusakan.
	TSR (%)	89,13	91,25	92,58	93,33	95,62	Semakin tinggi substitusi *filler* BABB, nilai *TSR* mengalami peningkatan meskipun tidak signifikan, sehingga menghasilkan campuran yang kuat dalam mempertahankan kekuatan tariknya yang diuji dalam perendaman.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis perhitungan terkait karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan variasi substitusi *filler* menggunakan BABB sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Pengaruh penggunaan limbah BABB sebagai variasi subtitusi *filler* berpengaruh terhadap kekuatan struktur, penambahan BABB sebagai *filler* dalam campuran *SMA* 25 mm menunjukkan peningkatan nilai stabilitas dan *MQ* yang menunjukan campuran mempunyai daya tahan yang baik terhadap deformasi pada kadar *filler* 50% . Sedangkan nilai *flow* mengalami penurunan terendah 50% Sementara nilai *ITS* cenderung naik seiring penambahan kadar *filler* Sehingga membuat campuran memiliki ketahanan *fatigue crack.*
2. Pengaruh penggunaan limbah BABB sebagai substitusi *filler* mempengaruhi karakteristik volumetrik campuran, di mana seiring penambahan kadar *filler* BABB nilai *VMA* dan *VITM* semakin meningkat menghasilkan campuran yang memiliki rongga. Sedangkan seiring penambahan kadar *filler* BABB menjadikan nilai *VFWA* dan *density* menjadi menurun sehingga menjadikan campuran kurang padat dan aspal kurang maksimal dalam mengisi ruang antar agregat.
3. Pengaruh penggunaan limbah BABB sebagai variasi substitusi *filler* memiliki perngaruh terhadap durabilitas terhadap campuran, dimana pada penambahan BABB sebagai *filler* dalam campuran *SMA* 25 mm menunjukkan peningkatan nilai terbaik *IRS* di kadar 50% yang menunjukan campuran mampu beradaptasi pada lingkungan yang beragam, nilai *TSR* cenderung mengalami peningkatan hal ini menunjukan campuran dapat lebih kuat dan tahan terhadap kerusakan akibat kelembapan, nilai *draindown* mengalami penurunan dari seiring bertambahnya *filler* hal ini menunjukan campuran hal

ini menunjukan campuran menjadi memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap pemisahan aspal. Nilai terbaik campuran pada pengujian *CL* didapat pada kadar 50%, hal ini menunjukan campuran lebih tahan terhadap kerusakan akibat abrasi.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil dari penelitian mengenai penggunaan limbah BABB sebagai variasi substitusi *filler*, penulis memberikan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya. Adapun saran dari peneliti adalah sebagai berikut.

1. Karena penelitian ini belum meneliti sifat senyawa, dan kandungan kimia yang ada dalam limbah *battom ash* batu bara, maka dari itu diperlukan pengujian lebih lanjut guna mengetahui dampaknya terhadap campuran *Stone Matrix Asphalt.*
2. Penggunaan limbah bottom ash batu bara sebagai *filler* pengganti pada campuran *Stone Matrix Asphalt* direkomendasikan hingga 50%, untuk menghasilkan campuran dengan kekuatan struktur yang optimal serta durabilitas yang baik.
3. Perlu dilakukan pengujian lebih lanjut lagi dengan menggunakan bahan *filler* yang sama dengan kadar optimum di 50% pada campuran yang berbeda, misalnya jenis campuran, HRS, HRA dan lain sebagainya agar diperoleh suatu campuran yang lebih baik dan sempurna.

DAFTAR PUSTAKA

Anshar, N., Saleh, S. M., dan Fisaini, J. 2023. Karakteristik Campuran Aspal Beton Menggunakan *Coal Bottom Ash* dengan Persentase 0%, 5%, dan 10% Sebagai Substitusi Agregat Halus. *Journal of The Civil Engineering Student*, *5*(1), 85-91.

Baby, B., Baby, B. T., Xavier, J. P., Hafis, M., dan Vipinan, D. 2018. *Effect of coir fiber on stone matrix asphalt* (*SMA*) *with marble waste as filler. International Research Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 1899-1902.

Banafsaj,H.H dan Fauziah, M. 2019. Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt* 12,5 mm Dengan *Filler* Abu Sekam Padi Akibat Lama Rendaman Air Laut. (Tesis doktoral, Universitas Islam Indonesia).

Chasanah, F., dan Sukmo, T. A. 2023. Pengaruh bubuk talk sebagai bahan filler pengganti pada campuran AC-WC. *AJIE - Asian Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 7.

Dahlan Pratama, M., dan Firdaus. 2022. Pengaruh variasi campuran antara *bottom ash* dan *fly ash* sebagai *filler* terhadap karakteristik *Marshall* aspal beton lapis *AC-WC*. Dalam Bina Darma *Conference on Engineering Science.*

Direktorat Jenderal Bina Marga. 2020. Spesifikasi umum 2018 revisi 2 divisi 6. Penerbit Bina Marga.

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_*Studi Eksperimental*.

Gazalie, R., Fauzi, M., Hawinuti, R., dan Helmi, M. 2023. Pemanfaatan Limbah Abu Batu Bara Sebagai *Filler* pada Lataston Lapis Aus (*HRS-WC*). Jurnal Gradasi Teknik Sipil, 7(1), 71-85.

Gusti, I., Purbanto, R., Nyoman, I., Thanaya, A., Sri, N. K., dan Dewi, S. 2022. Analisis karakteristik campuran *stone matrix asphalt* (SMA) dengan serat selulosa serabut kelapa. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 26(1), 1-10.

Hartono, D., Widjayanti, A., dan Rifai, F. H. 2023. Pedoman Perbaikan Peraturan Kebijakan Pemanfaatan *FABA* (*Fly Ash Bottom Ash*) di Perusahaan Listrik Negara (PT PLN). *Management Studies and Entrepreneurship Journal (MSEJ)*, *4*(6), 8315-8322.

Hawari, F., dan Lizar, L. 2021. Analisis Pengaruh Penggantian *Filler* Abu Sawit *Fly Ash* Dan *Bottom Ash* Terhadap Karakteristik Perkerasan Lentur (*Ac-Wc*). Jurnal *Tekla*, 3(1), 1-6.

Hidayat, R. dan Kushari, B. 2019. Analisis karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan abu ampas tebu sebagai *filler* pengganti *(The analysis of Stone Matrix Asphalt mixes using bagasse ash as substitute filler)* (Tesis doktoral, Universitas Islam Indonesia).

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

Indriyati, T. S., Malik, A., dan Alwinda, Y. 2019. Kajian pengaruh pemanfaatan limbah *FABA* (*Fly Ash* dan *Bottom Ash*) pada konstruksi lapisan *base* perkerasan jalan. Jurnal Teknik, *13*(2), 112-119.

Kinasti, Rr. M. A. dan Notodisuryo, D. N. 2017. Pemanfaatan limbah pembakaran batubara (*bottom ash*) pada PLTU Suralaya sebagai media tanam dalam upaya mengurangi pencemaran lingkungan. Kilat, 6(2), 129-138.

Kurniawan, W., Lizar, L., dan Pribadi, J. A. 2021. Karakteristik *Marshall* Campuran Aspal *AC-WC* Menggunakan *filler Spent Bleaching Earth* Sebagai Pengganti Abu Batu. Jurnal Teknik Sipil Terapan, 3(2), 80-89.

Nrushal, B. R., dan Karthik, M. 2023. *Performance of stone matrix asphalt with waste toner binder and FGD gypsum as filler*. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*.

Nugraha, D. C., dan Agustapraja, H. R. 2024. Pengaruh Sekam Padi dan Serbuk Kayu Sebagai Substitusi *Filler* pada Campuran Laston *AC-WC*. Jurnal Talenta Sipil, 7(1), 42-49.

Sombo, A. T., Alpius, dan Bestari, S. 2022. Pemanfaatan limbah serat tebu pada campuran *stone matrix asphalt* yang menggunakan batu sungai. *Paulus Civil Engineering Journal (PCEJ)*.

Sugeha, A. L. R., Sulandari, E., dan Suyono, R. S. 2018. Pemanfaatan Limbah Abu Batu bara sebagai *filler* pada campuran Laston. *JeLAST:* Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, dan Tambang, 5(3).

Sukirman, S. 2016. Beton aspal campuran panas. Penerbit Institut Teknologi Nasional. Bandung.

Sukirman, S. 1999. Perkerasan lentur jalan raya. Penerbit Nova. Bandung.

Sunarjono, S., dan Samantha, R. 2012. Analisis Kekuatan Tarik Material Campuran *SMA* (*Split Mastic Asphalt*) *Grading* 0/11 Menggunakan Sistem Pengujian *Indirect Tensile Strength.*

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*.

Tahir, A., dan Arifin, S. 2018. Karakteristik *Draindown* Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Yang Menggunakan *Filler* Abu-Batu Dan Semen. *In Pros*. Forum Studi Transp. Antar Perguru. Tinggi (pp. 570-584).

Tokede, B. B., dan Wardhono, A. 2018. Pengaruh Penggunaan *Bottom Ash* Batu Bara dan Limbah Karbit sebagai Substitusi Semen pada Campuran *Paving Block*. Jurnal Rekayasa Teknik Sipil, 1, 186-194.

Umboh, D. N., Palenewen, S. C. N., dan Manoppo, M. R. 2024. Pengaruh *Bottom Ash* Batu Bara Sebagai Pengganti *Filler* Terhadap Kriteria *Marshall* Pada Campuran Beraspal Panas Jenis Lapis Tipis Aspal Beton (*HRS-WC*). TEKNO, 22(87), 155-165.

Wenur, K. R., Palenewen, S. C. N., dan Waani, J. E. 2023. Pengaruh Variasi Kandungan Bahan Pengisi *Filler Fly Ash* Batu Bara Pada Campuran Beraspal Panas Jenis Lataston *Hot Rolled Sheet Wearing Course* (*HRS-WC*). TEKNO, 21(85), 805-814.

Yofianti, D., dan Aswadi, M. 2023, *August*. Campuran beraspal *HRS-WC* menggunakan *bottom ash* PLTU Air Anyir sebagai *filler*. *In* Berkala Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi (Vol. 1, No. 1, pp. 169-177).

Yuniarti, R., Hasyim, H., Hariyadi, H., dan Handayani, T. 2019. Penggunaan Limbah Kaca Sebagai Filler Pada Campuran Perkerasan Aspal Panas. *Jurnal Teknik Sipil*, *26*(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 : 2024

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, 2024

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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

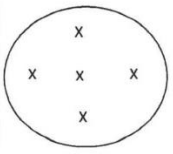
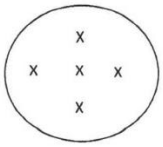
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

1 Sumber Material : Pertamina
2 Jenis Material : Aspal Pertamina Pen 60/70
3 Diuji Pada : 2024

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				

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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	310 ^{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, 2024

Dinilaikan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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, 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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, 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Keterangan	Pembacaan	
			Wakktu	Suhu
1	Persiapan	Mulai	13.20 WIB	28 ^{o}C
		Selesai	13.30 WIB	28 ^{o}C
2	Penimbangan	Mulai	13.30 WIB	28 ^{o}C
3	Pelarutan	Mulai	13.40 WIB	28 ^{o}C
4	Penyaringan	Mulai	13.45 WIB	28 ^{o}C
		Selesai	14.15 WIB	28 ^{o}C
5	Di Oven	Mulai	14.15 WIB	130 ^{o}C
6	Peminbangan	Mulai	14.30 WIB	28 ^{o}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, 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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, 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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, 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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		
7	12.5 mm (0.5")	09.5 mm (3/8")	2500,00		
8	09.5 mm (3/8")	06.3 mm (1/4")			
9	06.3 mm (1/4")	04.75 mm (4")			
10	04.75 mm (No.4)	02.36 mm (No.8)			
11	JUMLAH BENDA UJI (A)		5000,00	4595,00	
12	JUMLAH TERTAHAN DI SIEVE 12(B)		4595,00	3649,00	
13	KEAUSAN 100x = $\frac{(A-B)}{A} \times 100\%$		8,100	20,588	
17	Rata-rata Keausan (%)		14,34		

Yogyakarta, 2024

Disahkan Oleh
Ketua Program Studi Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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, 2024

Disahkan Oleh
Managgal Laboratorium/Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

No.	Keterangan		Benda uji 1	Benda uji 2	Rata-rata
1	Persiapan, dan perendaman benda uji dalam larutan $CaCl_2$ selama (± 10.1 menit).	Mulai	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, 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

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 : 2024

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, 2024

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Bottom Ash*

PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER BOTTOM ASH*

RUJUKAN : SNI 2441-2011

1 Jenis Material : *Filler Bottom Ash*
2 Sumber Material : Clereng
3 Diuji Pada : 2024

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	20,21	23,78	22,00
2	Berat Vicnometer + Air gr	42,95	46,40	44,68
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,74	22,62	22,68
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	34,85	38,23	36,54
5	Berat *Filler* (4-1) gr	14,640	14,450	14,55
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	51,750	55,080	53,42
7	Berat Aquadest (6-4) gr	16,900	16,850	16,88
8	Volume *Filler* (3-7) gr	5,840	5,770	5,81
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	2,507	2,504	2,506

Yogyakarta, 2024

Diperiksa Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 14 Hasil Pengujian Marshall

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

Tanggal Pengujian : AGUSTUS 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt*

Sampel	t (cm)	a (%)	b (%)	c (gram)	d (gram)	e (gram)	f (gram)	g	h	i	j	k	l VMA (%)	n VITM (%)	o	p	Koreksi Tebal	q Stab. (kg)	r *Flow* (mm)
5,0%	71,94	5,26	5,00	1165,29	1170,61	658,28	512,33	2,274	2,379	10,935	84,690	4,375	15,31	4,38	52	998,62	0,8233	822,11	2,50
5,0%	71,11	5,26	5,00	1170,45	1179,97	659,65	520,32	2,249	2,379	10,815	83,759	5,427	16,24	5,43	54	1037,03	0,8416	872,76	2,60
5,0%	70,03	5,26	5,00	1178,70	1193,81	662,91	530,90	2,220	2,379	10,674	82,668	6,658	17,33	6,66	55	1056,23	0,8848	934,55	2,70
								2,248					**16,29**	**5,49**				**876,48**	**2,60**
5,5%	70,21	5,82	5,50	1190,14	1197,20	673,87	523,33	2,274	2,363	12,027	84,232	3,741	15,77	3,74	50	960,21	0,8776	842,68	2,80
5,5%	71,50	5,82	5,50	1198,80	1208,26	673,54	534,72	2,242	2,363	11,856	83,038	5,106	16,96	5,11	56	1075,44	0,8288	891,27	2,95
5,5%	69,92	5,82	5,50	1199,56	1215,60	675,19	540,41	2,220	2,363	11,739	82,215	6,046	17,78	6,05	55	1056,23	0,8892	939,20	2,70
								2,245					**16,84**	**4,96**				**891,05**	**2,82**
6,0%	71,62	6,38	6,00	1182,99	1196,38	670,45	525,93	2,249	2,347	12,977	82,871	4,152	17,13	4,15	54	1037,03	0,8273	857,88	3,10
6,0%	72,66	6,38	6,00	1189,25	1199,47	669,89	529,58	2,246	2,347	12,956	82,736	4,309	17,26	4,31	57	1094,64	0,8143	891,31	3,15
6,0%	70,12	6,38	6,00	1188,29	1197,52	666,47	531,05	2,238	2,347	12,909	82,440	4,651	17,56	4,65	60	1152,25	0,8812	1015,36	3,25
								2,244					**17,32**	**4,37**				**921,52**	**3,17**
6,5%	71,07	6,95	6,50	1160,15	1178,28	657,75	520,53	2,229	2,331	13,930	81,678	4,392	18,32	4,39	57	1094,64	0,843	923,00	3,45
6,5%	71,18	6,95	6,50	1184,00	1196,94	665,23	531,71	2,227	2,331	13,917	81,604	4,479	18,40	4,48	57	1094,64	0,839	918,18	3,25
6,5%	70,82	6,95	6,50	1187,22	1200,28	671,98	528,30	2,247	2,331	14,045	82,354	3,601	17,65	3,60	61	1171,46	0,853	999,49	3,25
								2,234					**18,12**	**4,16**				**946,89**	**3,32**
7,0%	73,28	7,53	7,00	1177,99	1196,87	665,41	531,46	2,217	2,316	14,919	80,794	4,288	19,21	4,29	56	1075,44	0,8048	865,46	3,45
7,0%	70,35	7,53	7,00	1178,19	1190,67	658,12	532,55	2,212	2,316	14,891	80,642	4,467	19,36	4,47	55	1056,23	0,8720	921,03	3,50
7,0%	70,22	7,53	7,00	1168,39	1179,11	657,39	521,72	2,239	2,316	15,074	81,631	3,295	18,37	3,30	53	1017,82	0,8772	892,83	3,35
								2,223					**18,98**	**4,02**				**893,11**	**3,43**

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng. IPU. ASEAN.Eng.
NIK 001 511 0161

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 15 Hasil Pengujian *VCA*

PENGUJIAN VCA

Kadar Aspal	Benda Uji	Berat (gram)			Volume Silinder (cm^3)	V (cm^3)	γ_s (gram/cm^3)	γ_w (gram/cm^3)	G_{CA} (gram/cm^3)	VCA_{DRC} (%)	Gmb	GCA	PCA (%)	VCAMIX (%)	VCAMIX/ VCADRC	Spesifikasi
		Wadah + Camp. Agg	Wadah	B. Wadah + Air												
5,00%	1	4992	3424	4391	1178,1	969,4	1,618	0,9975	2,55	36,446	2,27	2,55	76	32,248179	0,885	OK
	2	4975	3424	4369	1178,1	947,3	1,637	0,9975	2,55	35,672	2,25	2,55	76	32,993167	0,925	OK
	3	4978	3424	4347	1178,1	925,3	1,679	0,9975	2,55	34,011	2,22	2,55	76	33,865618	0,996	OK
	Rata-Rata									35,376	Rata-Rata			33,035655	0,935	OK
5,50%	1	4976	3424	4376	1178,1	954,3	1,626	0,9975	2,55	36,103	2,27	2,55	76	32,257821	0,893	OK
	2	4987	3424	4356	1178,1	934,3	1,673	0,9975	2,55	34,270	2,24	2,55	76	33,218365	0,969	OK
	3	4989	3424	4354	1178,1	932,3	1,679	0,9975	2,55	34,044	2,22	2,55	76	33,87962	0,995	OK
	Rata-Rata									34,806	Rata-Rata			33,118602	0,953	OK
6,00%	1	4964	3424	4351	1178,1	929,3	1,657	0,9975	2,55	34,888	2,25	2,55	76	32,997675	0,946	OK
	2	4978	3424	4348	1178,1	926,3	1,678	0,9975	2,55	34,082	2,25	2,55	76	33,107361	0,971	OK
	3	4937	3424	4347	1178,1	925,3	1,635	0,9975	2,55	35,752	2,24	2,55	76	33,346375	0,933	OK
	Rata-Rata									34,907	Rata-Rata			33,150471	0,950	OK
6,50%	1	4988	3424	4357	1178,1	935,3	1,672	0,9975	2,55	34,298	2,23	2,55	76	33,610	0,980	OK
	2	4955	3424	4342	1178,1	920,3	1,664	0,9975	2,55	34,633	2,23	2,55	76	33,669	0,972	OK
	3	4938	3424	4347	1178,1	925,3	1,636	0,9975	2,55	35,709	2,25	2,55	76	33,060	0,926	OK
	Rata-Rata									34,880	Rata-Rata			33,446274	0,959	OK
7,00%	1	4988	3424	4356	1178,1	934,3	1,674	0,9975	2,55	34,228	2,22	2,55	76	33,975098	0,993	OK
	2	4939	3424	4340	1178,1	918,3	1,650	0,9975	2,55	35,175	2,21	2,55	76	34,099048	0,969	OK
	3	4932	3424	4347	1178,1	925,3	1,630	0,9975	2,55	35,964	2,24	2,55	76	33,290592	0,926	OK
	Rata-Rata									35,122	Rata-Rata			33,788246	0,963	OK

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bonian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK 301 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 16 Hasil Pengujian *IRS*

PENGUJIAN *IRS*

Persen Aspal		Tebal Sampel (mm)	koreksi	Arloji Stability			Flow (mm)		Stability (kg)			Angka Koreksi			
				Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	awal	rata2	MIN	Tebal Sampel MIN	Tebal Sampel MAX	Koreksi MIN	Koreksi MAX
5,0%	1	71,56	0,83	49	19,20	941,01	240	2,47	779,15	790,79	600	71,4	73	0,83	0,81
	2	70,48	0,87	49	19,20	941,01	250		815,66			69,9	71,4	0,89	0,83
	3	74,71	0,78	52	19,20	998,62	250		777,55			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	810,71	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	49	19,20	941,01	390		769,39			71,4	73	0,83	0,81
6,0%	1	73,42	0,80	53	19,20	1017,82	425	4,22	816,42	842,51	600	73	74,6	0,81	0,78
	2	71,50	0,83	55	19,20	1056,23	410		875,35			71,4	73	0,83	0,81
	3	72,11	0,82	53	19,20	1017,82	430		835,76			71,4	73	0,83	0,81
6,5%	1	69,92	0,89	55	19,20	1056,23	250	2,50	939,20	876,17	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	72,02	0,82	51	19,20	979,41	240		805,32			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	844,36	600	69,9	71,4	0,89	0,83
	2	69,96	0,89	51	19,20	979,41	465		869,33			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, 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Dr. Ing. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 51 1 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 17 Hasil Pengujian *DRAINDOWN KAO*

PENGUJIAN DRAINDOWN UNTUK KAO

Kadar Aspal (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
5,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	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	346,79	345,81	348,02
	5	Draindown	0,066%	0,06%	0,09%
	6	Rata-Rata Draindown	0,07		
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	346,02	347,18
	5	Draindown	0,107%	0,07%	0,10%
	6	Rata-Rata Draindown	0,092		
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	306,03
	5	Draindown	0,12%	0,14%	0,10%
	6	Rata-Rata Draindown	0,121		
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	360,39	360,35	360,38
	5	Draindown	0,14%	0,16%	0,17%
	6	Rata-Rata Draindown	0,158		
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	244,09	247,02	247,87
	5	Draindown	0,20%	0,20%	0,20%
	6	Rata-Rata Draindown	0,200		

Yogyakarta, 2024

Diketahui Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

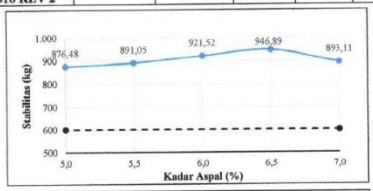
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

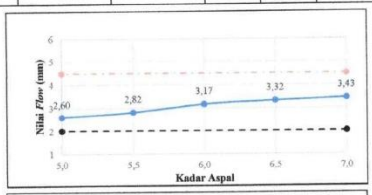
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

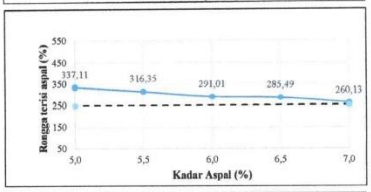
Lampiran 18 Rekapitulasi Perhitungan KAO

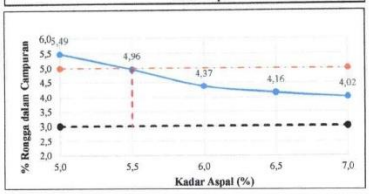
REKAPITULASI PERHITUNGAN KAO

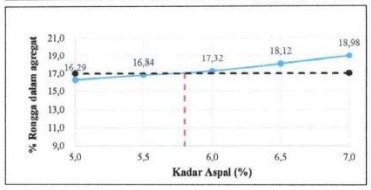
SPESIFIKASI *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	Kadar Aspal (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	*Flow* (mm)	VITM (%)	VMA (%)	Draindown (%)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)	*VCA*	MQ
	5	876,48	2,60	5,49	16,29	0,07	790,79	90,22	0,935	337,11
	5,5	891,05	2,82	4,96	16,84	0,09	810,71	90,98	0,953	316,35
	6	921,52	3,17	4,37	17,32	0,12	842,51	91,43	0,950	291,01
	6,5	946,89	3,32	4,16	18,12	0,16	876,17	92,53	0,959	285,49
	7	893,11	3,43	4,02	18,98	0,20	844,36	94,54	0,963	260,13
BINA MARGA 2018 REV 2		**> 600**	**2-4,5**	**3 - 5**	**> 17**	**<0,3**	> 600	**>90**	<1	>250

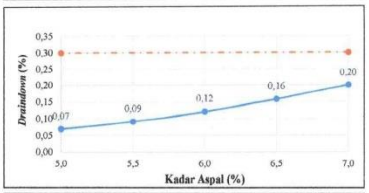


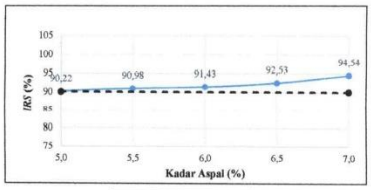


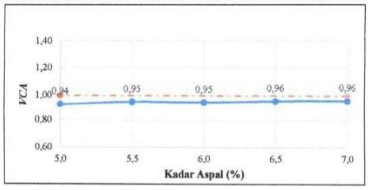


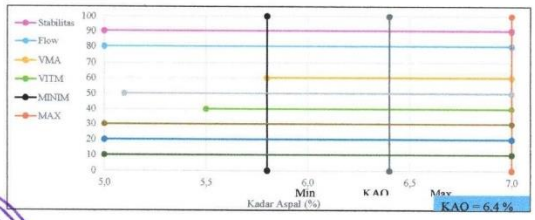












Yogyakarta, 2024

Disetujui Oleh
Manajemen Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 19 Hasil Pengujian Marshall

HASIL PENGUJIAN MARSHALL PADA FILLER BOTTOM ASH

Tanggal Pengujian : Agustus 2024
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%	69,43	6,84	6,40	1190,35	1204,80	663,24	541,56	2,198	2,334	13,526	80,636	5,838	19,36	69,851	5,84	60	1152,25	0,8900	1025,50	2,90	353,62
0%	71,02	6,84	6,40	1191,05	1204,44	670,63	533,81	2,231	2,334	13,731	81,854	4,415	18,15	75,669	4,41	58	1113,84	0,8439	939,94	2,85	329,80
0%	70,53	6,84	6,40	1192,25	1182,39	668,96	513,43	2,322	2,334	14,290	85,189	0,521	14,81	96,484	0,52	54	1037,03	0,8557	887,42	3,15	281,72
								2,250					**17,44**	**80,67**	**3,59**				**950,95**	**2,97**	**321,71**
2S	69,73	6,84	6,40	1162,57	1175,49	653,47	522,02	2,227	2,334	13,705	81,702	4,593	18,30	74,897	4,59	62	1190,66	0,8868	1055,88	2,90	364,10
2S	71,48	6,84	6,40	1186,17	1198,36	660,36	538,00	2,205	2,334	13,568	80,884	5,548	19,12	70,977	5,55	60	1152,25	0,8368	964,20	2,75	350,62
2S	69,76	6,84	6,40	1190,47	1182,59	663,07	519,52	2,291	2,334	14,101	84,065	1,834	15,94	88,493	1,83	58	1113,84	0,8900	991,32	2,80	354,04
								2,241					**17,78**	**78,12**	**3,99**				**1003,80**	**2,82**	**356,25**
5O	70,72	6,84	6,40	1184,97	1196,62	661,08	535,54	2,213	2,334	13,616	81,174	5,210	18,83	72,326	5,21	63	1209,86	0,8487	1026,77	2,80	366,70
5O	68,76	6,84	6,40	1186,55	1190,32	660,25	530,07	2,238	2,334	13,775	82,121	4,104	17,88	77,045	4,10	58	1113,84	0,8900	991,32	2,75	360,48
5O	70,21	6,84	6,40	1192,36	1186,30	658,74	527,56	2,260	2,334	13,909	82,915	3,176	17,08	81,409	3,18	62	1190,66	0,8764	1043,49	2,75	379,45
								2,237					**17,93**	**76,93**	**4,16**				**1020,53**	**2,77**	**368,88**
7S	71,02	6,84	6,40	1192,24	1190,20	656,86	533,34	2,235	2,334	13,756	82,008	4,235	17,99	76,461	4,24	59	1133,05	0,857	971,25	2,9	334,91
7S	71,99	6,84	6,40	1182,91	1194,02	650,34	543,68	2,176	2,334	13,389	79,819	6,792	20,18	66,346	6,79	58	1113,84	0,823	916,79	2,95	310,77
7S	69,87	6,84	6,40	1192,44	1178,65	657,52	521,13	2,288	2,334	14,081	83,944	1,975	16,06	87,700	1,97	61	1171,46	0,885	1036,66	2,9	357,47
								2,233					**18,08**	**76,84**	**4,33**				**974,90**	**2,92**	**334,39**
10O	69,32	6,84	6,40	1191,03	1206,56	662,10	544,46	2,188	2,334	13,462	80,252	6,286	19,75	68,168	6,29	60	1152,25	0,8900	1025,50	3,00	341,83
10O	70,63	6,84	6,40	1185,26	1198,47	657,29	541,18	2,190	2,334	13,478	80,347	6,175	19,65	68,580	6,17	55	1056,23	0,8727	921,74	3,05	302,21
10O	69,58	6,84	6,40	1192,03	1173,40	653,26	520,14	2,292	2,334	14,103	84,075	1,822	15,93	88,558	1,82	52	998,62	0,8900	888,77	2,95	301,28
								2,223					**18,44**	**75,10**	**4,76**				**945,34**	**3,00**	**315,11**

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernha Yasheri, M.Eng, IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 010[illegible]

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 20 Hasil Pengujian *IRS*

HASIL PENGUJIAN IRS

Kadar Aspal	Substitusi		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (inchi)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi Tebal				Angka Koreksi Diameter				ITS 0 JAM		
																			Tebal Sampel		Koreksi		Tebal Sampel		Koreksi		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
6,4%	0,0%	1	68,75	69,93	69,66	69,45	0,89	4,07	4,07	4,07	4,07	0,16	44	19,89	874,95	353,22	366,60	600	68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,164	0,16	804,04	815,84	600
		2	69,39	69,80	69,89	69,69	0,89	4,04	4,05	4,05	4,05	0,16	51	19,89	1014,15	409,41			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,16	0,156	911,00		
		3	69,56	69,77	69,94	69,76	0,89	4,01	4,06	4,04	4,04	0,15	42	19,89	835,18	337,16			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	732,49		
	25,0%	1	72,55	72,86	73,14	72,85	0,81	3,98	3,97	3,98	3,98	0,16	36	19,89	715,87	263,63	389,38	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	556,93	830,42	600
		2	72,55	72,67	72,86	72,69	0,81	3,98	3,92	3,99	3,96	0,16	59	19,89	1173,23	433,10			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	920,04		
		3	70,25	70,38	70,49	70,37	0,87	4,07	4,03	4,02	4,04	0,15	60	19,89	1193,11	471,42			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	1014,30		
	50,0%	1	70,40	70,80	69,85	70,35	0,87	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	53	19,89	1053,92	416,86	457,29	600	69,9	71,4	0,89	0,83	3,9	4	0,16	0,156	906,52	872,24	600
		2	72,30	72,34	71,57	72,07	0,82	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	39	19,89	775,52	289,03			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	613,52		
		3	69,87	69,63	70,04	69,85	0,89	3,98	3,99	3,96	3,98	0,16	62	19,89	1232,88	497,72			68,3	69,9	0,89	0,89	3,9	4	0,16	0,156	1096,67		
	75,0%	1	72,78	72,92	72,45	72,72	0,81	3,98	3,97	3,97	3,97	0,16	39	19,89	775,52	286,19	414,62	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	606,20	890,74	600
		2	70,43	70,44	70,23	70,37	0,87	4,04	4,03	4,01	4,03	0,15	52	19,89	1034,03	408,69			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	882,45		
		3	70,67	70,33	70,24	70,41	0,87	4,02	4,02	4,05	4,03	0,15	70	19,89	1391,96	548,98			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	1183,56		
	100,0%	1	70,21	70,85	70,63	70,56	0,86	4,04	4,06	4,02	4,04	0,15	57	19,89	1133,46	443,94	431,23	600	69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	952,60	928,07	600
		2	71,02	70,74	70,81	70,86	0,85	4,02	4,05	4,03	4,03	0,15	50	19,89	994,26	384,13			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	822,27		
		3	69,94	70,21	69,03	69,73	0,89	4,06	4,04	4,04	4,05	0,15	58	19,89	1153,34	465,61			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	1009,34		

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Ridho Bayuaji, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 21 511 1307

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 21 Hasil Pengujian *TSR*

HASIL PENGUJIAN TSR

Kadar Aspal	Substitusi		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				A0	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
6,4%	0,0%	1	72,20	72,23	72,02	72,15	0,83	3,98	3,97	3,98	3,98	0,157	46	19,89	914,72	343,47	336,66	600	65,1	66,7	0,96	0,93	3,9	4	0,1600	0,156	732,64	727,14	600
		2	68,31	68,41	68,12	68,28	0,89	4,06	4,05	4,08	4,06	0,15	43	19,89	855,06	345,39			66,7	68,3	0,93	0,89	4	4,1	0,156	0,152	761,28		
		3	71,35	71,57	71,08	71,33	0,89	4,02	4,00	4,00	4,01	0,16	40	19,89	795,41	321,11			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	687,48		
	25,0%	1	69,57	69,20	69,68	69,48	0,85	3,98	3,96	3,98	3,97	0,157	50	19,89	994,26	385,13	349,82	600	71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,160	0,156	853,76	757,77	600
		2	71,48	71,78	71,13	71,46	0,89	4,04	4,05	4,04	4,04	0,154	45	19,89	894,83	361,25			68,3	69,9	0,89	0,89	4	4,1	0,156	0,152	765,07		
		3	70,56	70,89	70,35	70,60	0,84	4,01	4,00	4,03	4,01	0,155	40	19,89	795,41	303,07			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	654,48		
	50,0%	1	73,71	73,84	73,20	73,58	0,80	3,98	3,98	3,98	3,98	0,16	50	19,89	994,26	360,37	397,61	600	73	74,6	0,81	0,78	3,9	4	0,16	0,156	753,08	807,52	600
		2	71,65	71,28	71,68	71,54	0,83	3,98	3,98	3,99	3,98	0,16	46	19,89	914,72	343,67			71,4	73	0,83	0,81	3,9	4	0,16	0,156	738,10		
		3	71,22	71,56	71,13	71,30	0,83	4,02	4,00	4,00	4,01	0,16	58	19,89	1153,34	434,85			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	931,39		
	75,0%	1	70,61	70,09	70,52	70,41	0,88	4,05	4,06	4,05	4,05	0,15	56	19,89	1113,57	446,35	386,65	600	66,7	69,9	0,93	0,89	4	4,1	0,156	0,152	956,60	831,34	600
		2	71,28	71,41	70,82	71,17	0,87	4,00	4,00	4,00	4,00	0,16	42	19,89	835,18	331,15			66,7	69,9	0,93	0,89	3,9	4	0,16	0,156	711,83		
		3	69,95	70,04	69,89	69,96	0,85	4,05	4,03	4,07	4,05	0,15	50	19,89	994,26	382,44			71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	825,58		
	100,0%	1	71,26	71,41	71,12	71,26	0,83	4,01	4,00	4,03	4,01	0,16	55	19,89	1093,69	412,61	412,74	600	71,4	73	0,83	0,81	4	4,1	0,156	0,152	882,73	887,44	600
		2	70,85	70,63	70,54	70,67	0,86	4,01	4,02	4,02	4,02	0,16	54	19,89	1073,80	418,43			69,9	71,4	0,89	0,83	4	4,1	0,156	0,152	901,89		
		3	71,36	71,44	71,21	71,34	0,82	3,95	3,99	4,00	3,98	0,16	55	19,89	1093,69	407,19			74,6	76,2	0,78	0,76	3,9	4	0,16	0,156	877,71		

Yogyakarta, November 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernadeta Tuty Ekaputri, IPM, ASEAN Eng.
NIK : 21 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

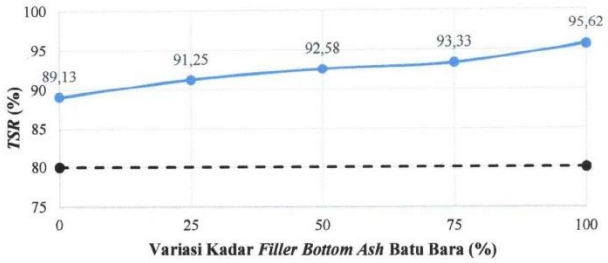
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 22 Rekap Hasil Pengujian *ITS & IRS*

REKAP HASIL PENELITIAN *ITS & IRS*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	ITS	ITS 24 Jam	TSR (%)
0	6,4	815,842	727,137	89,127
25		830,422	757,769	91,251
50		872,237	807,523	92,581
75		890,738	831,337	93,331
100		928,072	887,445	95,622





Yogyakarta, November 2024

Disahkan Oleh	Mengetahui	Peneliti
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Kalab. Jalan Raya	
Ir. Bernias Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Wiji Rahayu
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

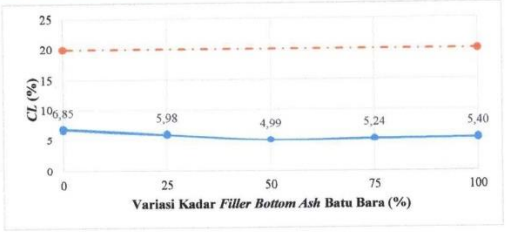
Lampiran 23 Hasil & Rekap Pengujian *Cantabro Loss*

HASIL PENGUJIAN *CANTABRO LOSS*

Substitusi	No.	Keterangan	1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi	1190,84	1173,67	1182,66
	2	Berat Sesudah Abrasi	1105,93	1095,66	1102,45
	3	Persentase Kehilangan Berat	7,13	6,65	6,78
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	6,85		
25%	1	Berat Sebelum Abrasi	1177,52	1163,68	1168,32
	2	Berat Sesudah Abrasi	1129,34	1080,96	1089,67
	3	Persentase Kehilangan Berat	4,09	7,11	6,73
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	5,98		
50%	1	Berat Sebelum Abrasi	1176,77	1186,27	1179,48
	2	Berat Sesudah Abrasi	1127,31	1117,57	1120,78
	3	Persentase Kehilangan Berat	4,20	5,79	4,98
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	4,99		
75%	1	Berat Sebelum Abrasi	1152,46	1193,85	1192,54
	2	Berat Sesudah Abrasi	1104,08	1124,85	1123,96
	3	Persentase Kehilangan Berat	4,20	5,78	5,75
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	5,24		
100%	1	Berat Sebelum Abrasi	1182,32	1185,42	1188,68
	2	Berat Sesudah Abrasi	1126,96	1129,84	1107,37
	3	Persentase Kehilangan Berat	4,68	4,69	6,84
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler	5,40		

REKAP *CANTABRO LOSS*

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL
0	6,4	6,85
25		5,98
50		4,99
75		5,24
100		5,40



Yogyakarta, November 2024

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

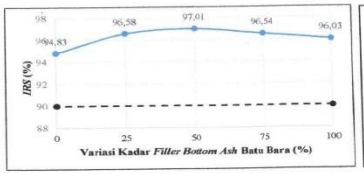
Lampiran 24 Hasil & Rekap Pengujian *IRS*

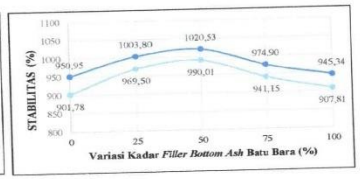
HASIL PENGUJIAN IRS

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

REKAP IRS

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





Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Hj. Anita Widianti, M.Eng. IPM. ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

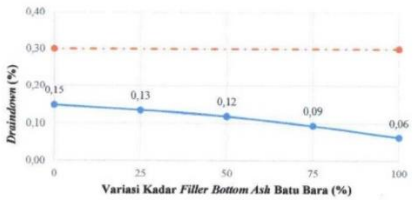
Lampiran 25 Hasil & Rekap Pengujian *DRAINDOWN Setelah KAO*

HASIL PENGUJIAN DRAINDOWN SETELAH KAO

Kadar Filler (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
0,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1409,16	1455,32	1421,26
	2	Berat Benda Uji	1166,36	1200,31	1161,14
	3	Berat Awal Piring Penampung	242,80	255,01	260,12
	4	Berat Akhir Piring Penampung	243,18	257,97	262,04
	5	Draindown	0,033%	0,25%	0,17%
	6	Rata-Rata Draindown	0,15		
25,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1365,12	1320,32	1338,96
	2	Berat Benda Uji	1173,55	1140,67	1153,69
	3	Berat Awal Piring Penampung	191,57	179,65	185,27
	4	Berat Akhir Piring Penampung	193,71	181,05	186,39
	5	Draindown	0,182%	0,12%	0,10%
	6	Rata-Rata Draindown	0,134		
50,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1529,94	1520,63	1519,32
	2	Berat Benda Uji	1183,81	1175,22	1172,06
	3	Berat Awal Piring Penampung	346,13	345,41	347,26
	4	Berat Akhir Piring Penampung	348,06	346,29	348,64
	5	Draindown	0,16%	0,07%	0,12%
	6	Rata-Rata Draindown	0,119		
75,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1427,13	1430,67	1420,84
	2	Berat Benda Uji	1155,17	1160,65	1148,06
	3	Berat Awal Piring Penampung	271,96	270,02	272,78
	4	Berat Akhir Piring Penampung	272,58	271,21	274,21
	5	Draindown	0,05%	0,10%	0,12%
	6	Rata-Rata Draindown	0,094		
100,0%	1	Berat Piring + Benda Uji	1436,23	1421,03	1427,23
	2	Berat Benda Uji	1091,01	1074,14	1077,67
	3	Berat Awal Piring Penampung	345,22	346,89	349,56
	4	Berat Akhir Piring Penampung	346,18	347,44	350,07
	5	Draindown	0,09%	0,05%	0,05%
	6	Rata-Rata Draindown	0,062		

REKAPITULASI DRAINDOWN

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	*DRAINDOWN*
0	6,4	0,15
25		0,13
50		0,12
75		0,09
100		0,06



Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

Mengetahui
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernadi Adestian, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01511 0101

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

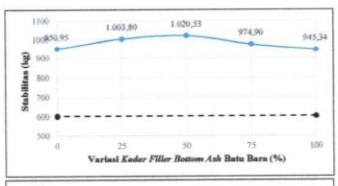
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

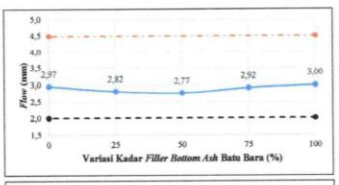
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

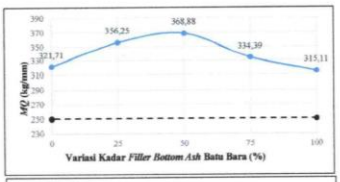
Lampiran 26 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Filler Bottom Ash*

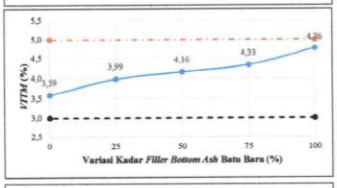
REKAPITULASI PENGUJIAN *FILLER BOTTOM ASH*

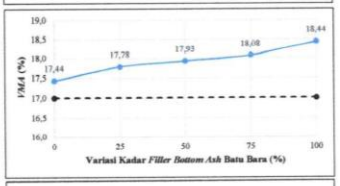
SPESIFIKASI *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	Kadar Filler (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	*Flow* (mm)	VITM (%)	VMA (%)	Draindown (%)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)	*VCA*	MQ (kg/mm)	VFWA (%)	Density	ITS	TSR	CL
	0	950,95	2,97	3,59	17,44	0,15	901,78	94,83	0,931	321,71	80,67	2,250	815,84	89,13	6,85
	25	1003,80	2,82	3,99	17,78	0,13	969,50	96,58	0,955	356,25	78,12	2,241	830,42	91,25	5,98
	50	1020,53	2,77	4,16	17,93	0,12	990,01	97,01	0,956	368,88	76,93	2,237	872,24	92,58	4,99
	75	974,90	2,92	4,33	18,08	0,09	941,15	96,54	0,961	334,39	76,84	2,233	890,74	93,33	5,24
	100	945,34	3,00	4,76	18,44	0,06	907,81	96,03	0,966	315,11	75,10	2,223	928,07	95,62	5,40
BINA MARGA 2018		**> 600**	**2-4,5**	**3 - 5**	**> 17**	**<0,3**	> 600	**>90**	<1	>250	>65	>2		**>80**	<20

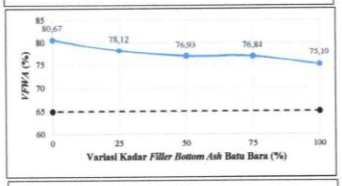


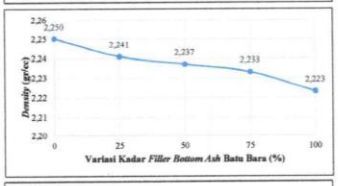


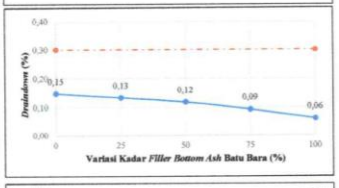


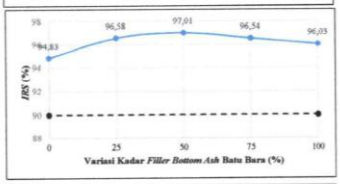


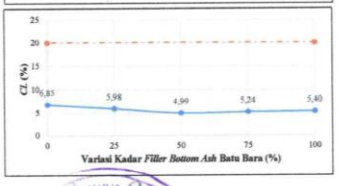


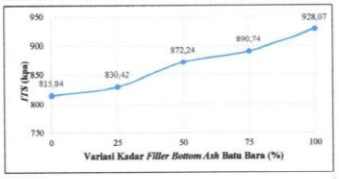


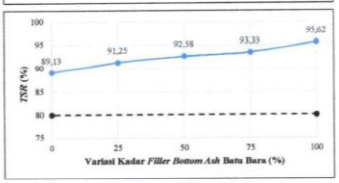












Mengetahui
Ketua Laboratorium Bahan Teknik Sipil

Ir. Bernha Kurnia Arifa, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 015 100 0301

Mengesahkan
Kaprodi Jalan Raya

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

Yogyakarta, November 2024
Peneliti

Wiji Rahayu
NIM : 20 511 193

Lampiran 27. Hasil Analisis *ANOVA* Terhadap Karakteristik *Marshall*

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	PENGUJIAN	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
STABILITAS	0%	.229	3	.	.981	3	.738
	25%	.271	3	.	.947	3	.558
	50%	.259	3	.	.959	3	.610
	75%	.191	3	.	.997	3	.899
	100%	.296	3	.	.918	3	.445
FLOW	0%	.328	3	.	.871	3	.298
	25%	.253	3	.	.964	3	.637
	50%	.292	3	.	.923	3	.463
	75%	.253	3	.	.964	3	.637
	100%	.292	3	.	.923	3	.463
VITM	0%	.284	3	.	.933	3	.502
	25%	.289	3	.	.928	3	.480
	50%	.192	3	.	.997	3	.897
	75%	.182	3	.	.999	3	.936
	100%	.339	3	.	.850	3	.242
VFWA	0%	.306	3	.	.904	3	.400
	25%	.304	3	.	.908	3	.411
	50%	.178	3	.	.999	3	.956
	75%	.181	3	.	.999	3	.942
	100%	.371	3	.	.785	3	.078
VMA	0%	.285	3	.	.932	3	.496
	25%	.289	3	.	.927	3	.479
	50%	.189	3	.	.998	3	.906
	75%	.183	3	.	.999	3	.930
	100%	.317	3	.	.889	3	.351
DENSITY	0%	.292	3	.	.923	3	.463
	25%	.253	3	.	.964	3	.637
	50%	.219	3	.	.987	3	.780
	75%	.191	3	.	.997	3	.900
	100%	.341	3	.	.847	3	.232
MQ	0%	.254	3	.	.963	3	.633
	25%	.291	3	.	.925	3	.471
	50%	.256	3	.	.962	3	.625
	75%	.177	3	.	1.000	3	.963
	100%	.354	3	.	.821	3	.165

a. Lilliefors Significance Correction

Tests of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
STABILITAS	Based on Mean	.762	4	10	.574
	Based on Median	.301	4	10	.871
	Based on Median and with adjusted df	.301	4	7.500	.869
	Based on trimmed mean	.723	4	10	.596
FLOW	Based on Mean	1.188	4	10	.374
	Based on Median	.183	4	10	.942
	Based on Median and with adjusted df	.183	4	6.036	.939
	Based on trimmed mean	1.057	4	10	.426
VITM	Based on Mean	.967	4	10	.467
	Based on Median	.223	4	10	.919
	Based on Median and with adjusted df	.223	4	7.033	.917
	Based on trimmed mean	.889	4	10	.505
VFWA	Based on Mean	1.180	4	10	.377
	Based on Median	.210	4	10	.927
	Based on Median and with adjusted df	.210	4	6.846	.925
	Based on trimmed mean	1.064	4	10	.423
VMA	Based on Mean	.820	4	10	.541
	Based on Median	.231	4	10	.915
	Based on Median and with adjusted df	.231	4	7.720	.913
	Based on trimmed mean	.762	4	10	.573
DENSITY	Based on Mean	10.290	4	10	.001
	Based on Median	1.145	4	10	.390
	Based on Median and with adjusted df	1.145	4	2.136	.509
	Based on trimmed mean	8.739	4	10	.003
MQ	Based on Mean	2.085	4	10	.158
	Based on Median	.751	4	10	.579
	Based on Median and with adjusted df	.751	4	5.677	.594
	Based on trimmed mean	1.970	4	10	.175

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
STABILITAS	Between Groups	12829.030	4	3207.258	.973	.464
	Within Groups	32959.495	10	3295.949		
	Total	45788.525	14			
FLOW	Between Groups	.118	4	.029	4.105	.032
	Within Groups	.072	10	.007		
	Total	.189	14			
VITM	Between Groups	2.229	4	.557	.113	.975
	Within Groups	49.248	10	4.925		
	Total	51.477	14			
VFWA	Between Groups	50.825	4	12.706	.115	.974
	Within Groups	1102.338	10	110.234		
	Total	1153.163	14			
VMA	Between Groups	1.635	4	.409	.113	.975
	Within Groups	36.115	10	3.612		
	Total	37.750	14			
DENSITY	Between Groups	.001	4	.000	.113	.975
	Within Groups	.027	10	.003		
	Total	.028	14			
MQ	Between Groups	6242.973	4	1560.743	3.042	.070
	Within Groups	5130.817	10	513.082		
	Total	11373.790	14			

Lampiran 28. Hasil Analisis *ANOVA* Terhadap *IRS*, *ITS*, *TSR*, *Cantabro Loss*, dan *Draindown*

Tests of Normality

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Variasi Filler	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
TSR	0%	.285	3	.	.932	3	.496
	25%	.310	3	.	.899	3	.383
	50%	.369	3	.	.787	3	.084
	75%	.344	3	.	.841	3	.218
	100%	.292	3	.	.924	3	.466
ITS	0%	.219	3	.	.987	3	.782
	25%	.311	3	.	.897	3	.375
	50%	.223	3	.	.985	3	.766
	75%	.178	3	.	.999	3	.953
	100%	.268	3	.	.951	3	.573
IRS	0%	.210	3	.	.991	3	.821
	25%	.195	3	.	.996	3	.881
	50%	.207	3	.	.992	3	.832
	75%	.239	3	.	.975	3	.697
	100%	.348	3	.	.833	3	.197
CL	0%	.278	3	.	.939	3	.525
	25%	.344	3	.	.842	3	.219
	50%	.177	3	.	1.000	3	.972
	75%	.361	3	.	.807	3	.131
	100%	.368	3	.	.790	3	.091
DRAINDOWN	0%	.238	3	.	.976	3	.702
	25%	.292	3	.	.923	3	.463
	50%	.196	3	.	.996	3	.878
	75%	.276	3	.	.942	3	.537
	100%	.292	3	.	.923	3	.463

a. Lilliefors Significance Correction

Tests of Homogeneity of Variances

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
TSR	Based on Mean	5.018	4	10	.018
	Based on Median	.638	4	10	.647
	Based on Median and with adjusted df	.638	4	5.096	.658
	Based on trimmed mean	4.314	4	10	.028
ITS	Based on Mean	1.168	4	10	.381
	Based on Median	.599	4	10	.672
	Based on Median and with adjusted df	.599	4	6.734	.676
	Based on trimmed mean	1.128	4	10	.397
IRS	Based on Mean	1.288	4	10	.338
	Based on Median	.667	4	10	.629
	Based on Median and with adjusted df	.667	4	6.401	.637
	Based on trimmed mean	1.244	4	10	.353
CL	Based on Mean	6.596	4	10	.007
	Based on Median	1.036	4	10	.435
	Based on Median and with adjusted df	1.036	4	2.565	.522
	Based on trimmed mean	5.849	4	10	.011
DRAINDOWN	Based on Mean	2.349	4	10	.125
	Based on Median	1.087	4	10	.413
	Based on Median and with adjusted df	1.087	4	4.225	.464
	Based on trimmed mean	2.251	4	10	.136

ANOVA

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
TSR	Between Groups	303.529	4	75.882	.074	.988
	Within Groups	10206.220	10	1020.622		
	Total	10509.749	14			
ITS	Between Groups	24824.222	4	6206.056	.142	.962
	Within Groups	436432.237	10	43643.224		
	Total	461256.459	14			
IRS	Between Groups	5.480	4	1.370	.037	.997
	Within Groups	375.045	10	37.505		
	Total	380.525	14			
CL	Between Groups	8.541	4	2.135	3.100	.067
	Within Groups	6.889	10	.689		
	Total	15.430	14			
DRAINDOWN	Between Groups	.000	4	.000	.934	.483
	Within Groups	.000	10	.000		
	Total	.000	14			