TUGAS AKHIR

PENGARUH SUBSTITUSI *FILLER* ABU BAUKSIT TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT (SMA)* DENGAN METODE PENCAMPURAN BERTAHAP
(THE EFFECT OF BAUXITE ASH FILLER SUBSTITUTION ON THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT MIXTURE USING SEQUENTIAL MIXING METHOD)

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

Ibnu Kholid
20511318

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

2025

TUGAS AKHIR

PENGARUH SUBSTITUSI *FILLER* ABU BAUKSIT TERHADAP KARAKTERISTIK CAMPURAN *STONE MATRIX ASPHALT (SMA)* DENGAN METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

(THE EFFECT OF BAUXITE ASH FILLER SUBSTITUTION ON THE CHARACTERISTICS OF STONE MATRIX ASPHALT MIXTURE USING SEQUENTIAL MIXING METHOD)

Disusun Oleh

Ibnu Kholid
20511318

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 21 Maret 2025
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.	**Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc.**	**Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.**
NIK: 955110103	**NIK: 205111303**	**NIK: 215111307**

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
YOGYAKARTA

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D (Eng)., IPM.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

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

Yogyakarta, 21 Maret 2025

Yang membuat pernyataan,



Ibnu Kholid

(205 113 18)

Dipindai dengan CamScanner

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur atas kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul *Pengaruh Substitusi Filler Abu Bauksit Terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) dengan Metode Pencampuran Bertahap*. Tugas akhir in merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama penyusunan Tugas Akhir ini tak luput dari banyaknya hambatan yang dihadapi penulis. Namun berkat saran, kritik, arahan, serta dorongan semangat dari berbagai pihak sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan masukan, arahan, bimbingan, dan nasihat serta memberikan motivasi yang membangkitkan semangat penulis selama penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc., dan Bapak Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran, masukan, serta arahan untuk menjadikan tugas akhir ini semakin baik.
3. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng.)., IPM. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T. selaku Kepala Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Bapak Kamad bin Jaanin dan Ibu Ino Susilawati selaku orang tua penulis yang telah memberikan doa dan dukungan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini,
6. Kakak Ali Jakaria, S.Kom, dan Adik Annisa Akmalia yang selalu memberikan do'a, semangat, dan dukungan kepada penulis.
7. A.I, S. Pd. selaku sosok yang selalu menyemangati dan menemani penulis

selama penyusunan Tugas Akhir ini.

8. Bapak Sukamto HM, S.T., Bapak Pranoto, dan Giri Widhiatmoko, S.T. selaku laboran di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia yang telah membantu selama penelitian Tugas Akhir.
9. Dan teman-teman penulis yang telah memberikan dukungan.

Akhirnya dengan selesainya Tugas Akhir ini penulis menyadari adanya kekurangan pada laporan ini, untuk itu penyusun sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar dapat menjadi lebih baik pada waktu yang akan datang. Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 21 Maret 2025

Penulis,



Ibnu Kholid

(20511318)

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	xvi
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xviii
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 Umum	6
2.2 Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	6
2.3 Kinerja Campuran Aspal dengan Metode Pencampuran	8
2.4 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu	10

BAB III LANDASAN TEORI 18

3.1 Perkerasan Jalan 18

3.2 Perkerasan Lentur *(Flexible Pavement)* 18

3.3 Karakteristik Perkerasan Lentur 19

3.4 Material Penyusun Campuran 21

3.4.1 Aspal 21

3.4.2 Agregat 23

3.5 Gradasi Agregat 25

3.6 Bauksit 25

3.7 Bahan Aditif 26

3.8 Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 26

3.9 Metode Pencampuran Bertahap 27

3.10 Karakteristik Pengujian *Marshall* 28

3.10.1 Stabilitas (*Stability*) 29

3.10.2 Kelelehan (*Flow*) 29

3.10.3 Kepadatan (*Density*) 30

3.10.4 *Voids in Total Mix* (*VITM*) 31

3.10.5 *Voids in Mineral Aggregate* (*VMA*) 32

3.10.6 *Voids in Filled with Asphalt* (*VFWA*) 33

3.10.7 *Marshall Quotient* (*MQ*) 34

3.11 *Voids in Coarse Aggregate (VCA)* 35

3.12 Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)* 36

3.13 Indeks Durabilitas Pertama (IDP) 37

3.14 Indeks Durabilitas Kedua (IDK) 37

3.15 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* 38

3.16 Pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)* 38
3.17 Pengujian *Cantabro Loss* 39
3.18 Pengujian *Draindown* 39
3.19 Pengujian *Index of Cantabro Loss (ICL)* 40
BAB IV METODE PENELITIAN 41
4.1 Metode Penelitian 41
4.2 Metode Pengambilan Sampel 41
4.3 Metode Pengambilan Data 41
4.4 Tahapan Penelitian 42
4.4.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material 42
4.4.2 Persiapan Alat 44
4.4.3 Perencanaan Campuran 45
4.4.4 Pembuatan Campuran Benda Uji 52
4.4.5 Pengujian *Marshall* 53
4.4.6 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* 54
4.4.7 Pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)* 54
4.4.8 Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)* 54
4.4.9 Pengujian *Cantabro Loss* 55
4.4.10 Pengujian *Draindown* 55
4.4.11 Pengujian *Voids in Coarse Aggregate (VCA)* 55
4.5 Analisis Data 56
4.5.1 Analisis Karakteristik *Marshall* 56
4.5.2 Analisis Pengujian *VCA* 57
4.5.3 Analisis Pengujian *IRS* 57
4.5.4 Analisis nilai IDP 57

4.5.5 Analisis nilai IDK 57
4.5.6 Analisis Pengujian *ITS* 57
4.5.7 Analisis Pengujian *TSR* 57
4.5.8 Analisis Pengujian *Cantabro* 57
4.5.9 Analisis Pengujian *Draindown* 57
4.5.10 Analisis Pengujian *ICL* 57
4.6 Bagan Alir Penelitian 58
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 61
5.1 Hasil Pengujian 61
5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 61
5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat 61
5.1.3 Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) Menggunakan Metode Pencampuran Bertahap 62
5.1.4 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* pada Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan Metode Pencampuran Bertahap 64
5.2 Pembahasan 66
5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal 66
5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar 68
5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus 69
5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*) 70
5.2.5 Pembahasan Karakteristik *Marshall* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan Metode Pencampuran Bertahap 70
5.2.6 Pembahasan Pengaruh Karakteristik *Index of Retained Strength*

(*IRS*) untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum dengan Metode Pencampuran Bertahap (KAO) 76

5.2.7 Pembahasan Pengaruh Karakteristik *Draindown* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum dengan Metode Pencampuran Bertahap (KAO) 77

5.2.8 Pembahasan Karakteristik Volumetrik Campuran *SMA* dengan Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap 78

5.2.9 Pembahasan Karakteristik Mekanik Campuran *SMA* dengan Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap 84

5.2.10 Pembahasan Durabilitas Campuran *SMA* dengan Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap 94

5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap 104

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 118

6.1 Kesimpulan 118

6.2 Saran 119

DAFTAR PUSTAKA 120

LAMPIRAN 122

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu 11
Tabel 3. 1 Ketentuan untuk Aspal Keras 22
Tabel 3. 2 Ketentuan Agregat Kasar 24
Tabel 3. 3 Ketentuan Agregat Halus 24
Tabel 3. 4 Gradasi Agregat Campuran *SMA* 25
Tabel 3. 5 Unsur Kimia dalam Bauksit 26
Tabel 3. 6 Persyaratan Campuran *SMA* 27
Tabel 3. 7 Kepadatan Air (**γw**) 36
Tabel 4. 1 Gradasi Agregat Gabungan Campuran *SMA* 25 mm 46
Tabel 4. 2 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5,5 % 48
Tabel 4. 3 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6 % 48
Tabel 4. 4 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6,5 % 49
Tabel 4. 5 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7 % 49
Tabel 4. 6 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7,5 % 50
Tabel 4. 7 Jumlah Benda Uji untuk Mencari Nilai KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap 51
Tabel 4. 8 Jumlah Benda Uji Setiap Pengujian Menggunakan Substitusi *Filler* Abu bauksit dengan Metode Pencampuran Bertahap 51
Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70 61
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Agregat Kasar 62
Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus 62
Tabel 5. 4 Pengujian Berat Jenis *Filler* 62
Tabel 5. 5 Hasil Pengujian untuk Memperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan Metode Pencampuran Bertahap 63
Tabel 5. 6 *Marshall Test* dengan Metode Pencampuran Bertahap 64
Tabel 5. 7 *Voids in Coarse Aggregate (VCA)* dengan Metode Pencampuran Bertahap 65

Tabel 5. 8 *Index of Retained Strength (IRS),* Indeks Durabilitas Pertama dan Indeks Durabilitas Kedua dengan Metode Pencampuran Bertahap 65
Tabel 5. 9 *Indirect Tensile Strength (ITS)* dan *Tensile Strength Ratio (TSR)* dengan Metode Pencampuran Bertahap 65
Tabel 5. 10 *Cantabro Loss* dengan Metode Pencampuran Bertahap 66
Tabel 5. 11 *Draindown* dengan Metode Pencampuran Bertahap 66
Tabel 5. 13 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap 105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Distribusi Beban Roda pada Lapisan Perkerasan Lentur 19
Gambar 3. 2 Ilustrasi Proses Metode Pencampuran Konvensional (a) dan Metode Pencampuran Bertahap (b) 28
Gambar 3. 3 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Stabilitas 29
Gambar 3. 4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *Flow* 30
Gambar 3. 5 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *Density* 31
Gambar 3. 6 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VITM* 32
Gambar 3. 7 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VMA* 32
Gambar 3. 8 Ilustrasi Rongga Agregat yang Terisi Aspal 34
Gambar 3. 9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VFWA* 34
Gambar 3. 10 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *MQ* 35
Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Rencana Campuran *SMA* 47
Gambar 4. 2 Bagan Alir Penelitian 59
Gambar 5. 1 Grafik Penentuan Nilai KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap 63
Gambar 5. 2 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai Stabilitas 71
Gambar 5. 3 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *Flow* 72
Gambar 5. 4 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VITM* 73
Gambar 5. 5 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VMA* 74
Gambar 5. 6 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VFWA* 75
Gambar 5. 7 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VCA* 75
Gambar 5. 8 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *IRS* 76
Gambar 5. 9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *Draindown* 77
Gambar 5. 10 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap Nilai *VITM* 79
Gambar 5. 11 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap Nilai *VFWA* 80
Gambar 5. 12 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode

Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Density* 81
Gambar 5. 13 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *VMA* 82
Gambar 5. 14 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Nilai *VCA* 84
Gambar 5. 15 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai Stabilitas 85
Gambar 5. 16 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Flow* 86
Gambar 5. 17 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *MQ* 88
Gambar 5. 18 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ITS Unconditioned* 90
Gambar 5. 19 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ITS Conditioned* 90
Gambar 5. 20 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ITS* 91
Gambar 5. 21 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *CL* Normal 92
Gambar 5. 22 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *CL* 24 Jam 93
Gambar 5. 23 Grafik Perbandingan *CL* Rendaman Normal dan 24 Jam Menggunakan Metode Konvensional dan Bertahap 93
Gambar 5. 24 Grafik Perbandingan Stabilitas Rendaman 0,5 Jam dan 24 Jam Menggunakan Metode Konvensional dan Bertahap 95
Gambar 5. 25 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *IRS* 96
Gambar 5. 26 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai IDP 97
Gambar 5. 27 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai IDP 99
Gambar 5. 28 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode

Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *TSR* 100
Gambar 5. 29 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ICL* 102
Gambar 5. 30 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Draindown* 103

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal 126
Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal 127
Lampiran 3 Pemeriksaan Titik Nyala Dan Titik Bakar Aspal 128
Lampiran 4 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal 129
Lampiran 5 Pemeriksaan Daktilitas Aspal 130
Lampiran 6 Pemeriksaan Kelarutan Aspal Dalam *TCE* 131
Lampiran 7 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar 132
Lampiran 8 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal 133
Lampiran 9 Pemeriksaan Keausan Agregat Kasar Dengan Mesin *Los Angeles* 134
Lampiran 10 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus 135
Lampiran 11 Pemeriksaan *Sand Equivalent* 136
Lampiran 12 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler* Abu Batu 137
Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler* Abu Bauksit 138
Lampiran 14 Sifat Campuran dengan Metode *Marshall* 139
Lampiran 15 Sifat Campuran dengan Metode *IRS* 140
Lampiran 16 Sifat Campuran *VCA* 141
Lampiran 17 Sifat Campuran *Draindown* 142
Lampiran 18 Rekapitulasi Perhitungan KAO 143
Lampiran 19 Hasil Pengujian *Marshall* dengan Metode Pencampuran Bertahap 145
Lampiran 20 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Marshall* dengan Metode Pencampuran Bertahap 146
Lampiran 21 Hasil Pengujian *VCA* 148
Lampiran 22 Hasil Pengujian *IRS* dengan Metode Pencampuran Bertahap 149
Lampiran 23 Rekapitulasi Hasil Pengujian *IRS* dengan Metode Pencampuran Bertahap 150
Lampiran 24 Hasil Pengujian *ITS* dengan Metode Pencampuran Bertahap 151
Lampiran 25 Hasil Pengujian *TSR* dengan Metode Pencampuran Bertahap 152

Lampiran 26 Rekapitulasi Hasil Pengujian *ITS* dan *TSR* dengan Metode Pencampuran Bertahap 153
Lampiran 27 Hasil Pengujian *Cantabro Loss* Normal dengan Metode Pencampuran Bertahap 154
Lampiran 28 Hasil Pengujian *Cantabro Loss* Rendaman dengan Metode Pencampuran Bertahap 155
Lampiran 29 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Cantabro Loss* dengan Metode Pencampuran Bertahap 156
Lampiran 30 Hasil Pengujian *Draindown* dengan Metode Pencampuran Bertahap 157
Lampiran 31 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Draindown* dengan Metode Pencampuran Bertahap 158

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	= Berat akhir pelat wadah penampung (gr)
a	= Persentase aspal terhadap batuan (%)
B	= Berat awal pelat wadah penampung (gr)
b	= Persentase aspal terhadap campuran (%)
C	= Berat total awal campuran(gr)
CL	= *Cantabro Loss*
c	= Berat benda uji sebelum direndam (gr)
D	= diameter benda uji (cm)
d	= Berat benda uji dalam keadaan jenuh/ssd (gr)
e	= Berat dalam air (gr)
f	= Volume/isi (cm^3)
g	= Nilai kepadatan (*density*)(gr/cc)
G_{CA}	= Berat jenis bulk agregat kasar
G_{mm}	= Berat jenis maksimum campuran aspal (rongga tanpa udara).
G_{mb}	= berat jenis bulk dari beton aspal padat
G_{sb}	= berat jenis bulk agregat total
ICL	= nilai *ICL*
IDK	= Indeks Durabilitas Kedua
IDP	= Indeks Durabilitas Pertama
IRS	= *Index of Retained Strength*
ITS	= *Indirect Tensile Strength*
l	= Nilai *VMA* (%)
m	= Nilai *VFWA* (%)
MQ	= *Marshall Quotient*
M_o	= berat sebelum diabrasi (gram)
M_i	= berat setelah diabrasi (gram)
p	= Pembacaan arloji stabiltas x kalibrasi alat
P_{CA}	= Persentase agregat kasar dalam total campuran (%)

P_D	= kehilangan berat dalam kondisi kering (%)
P_s	= persentase berat agregat terhadap berat campuran
Pmaks	= beban maksimum/ puncak (kg)
P_W	= kehilangan berat dalam kondisi basah (%)
q	= Nilai stabilitas (kg)
r	= Indeks penurunan stabilitas (%)
r	= Nilai *flow* (mm)
s	= Angka koreksi tebal benda uji
Sa	= persen kuat sisa rata-rata satu hari (%)
S_i	= Persentase kekuatan sisa pada waktu t_i (%)
SMA	= *Stone Matrix Asphalt*
SNI	= Standar Nasional Indonesia
SSD	= *Saturated Surface Dry*
S_1	= Nilai rata – rata stabilitas *Marshall* perendaman 0,5 jam (kg/cm²)
S_2	= Nilai rata – rata stabilitas *Marshall* perendaman 24 jam (kg/cm²)
S_{i+1}	= Persentase kekuatan sisa pada waktu t_{i+1} (%)
t	= Tinggi benda uji (cm)
tn	= Total waktu perendaman (jam)
t_i, t_{i+1}	= Periode perendaman (dimulai dari awal proses perendaman)
T_1	= rata – rata nilai *ITS* tanpa rendaman (kg)
T_2	= rata – rata nilai *ITS* setelah perendaman 24 jam (kg)
TSR	= *Tensile Strength Ratio*
VCA	= *Voids of in Coarse Aggregate*
VCAdrc	= *Voids of in Coarse Aggregate Dry Rodded*
VCAmix	= *Voids of in Coarse Aggregate Mixture*
VFWA	= *Voids Filled With Asphalt*
VITM	= *Voids in Total Mix*
VMA	= *Voids Mineral Aggregate*

ABSTRAK

Perkembangan teknologi dalam perkerasan jalan menyebabkan munculnya metode pencampuran baru, salah satunya metode pencampuran bertahap. Selain itu, abu bauksit dapat dijadikan salah satu alternatif untuk dimanfaatkan menjadi *filler* pada campuran guna mengurangi permasalahan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh abu bauksit sebagai substitusi *filler* terhadap karakteristik volumetrik, mekanik dan durabilitas campuran dengan metode pencampuran bertahap terhadap campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA).*

Penelitian ini diawali dengan pemeriksaan sifat fisik material agregat dan aspal. Tahap kedua dilakukan pembuatan benda uji untuk mencari Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan variasi kadar aspal sebesar 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% terhadap berat total campuran. Setelah mendapatkan kadar aspal optimum, tahap selanjutnya dilakukan analisis parameter volumetrik, mekanik, dan durabilitas campuran berdasarkan pengujian *VITM, VMA, stabilitas, flow, MQ, IRS,* IDP, IDK, *ITS, TSR,* dan *Cantabro Loss* dengan substitusi *filler* abu bauksit sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% menggunakan metode pencampuran bertahap, kemudian dibandingkan dengan metode konvensional.

Hasil pengujian karakteristik volumetrik menunjukkan bahwa semakin besar penambahan substitusi *filler* abu bauksit pada campuran *SMA*, maka rongga dalam campuran semakin besar sehingga menurunkan kepadatan campuran. Penggunaan metode pencampuran bertahap berpengaruh positif terhadap nilai volumetrik, dimana rongga yang dihasilkan lebih kecil daripada metode konvensional, dikarenakan aspal mampu mengisi rongga – rongga dalam campuran secara optimal. Meskipun demikian, pada parameter mekanik, penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan kekuatan struktur yang lebih baik, ditandai dengan nilai stabilitas, *flow*, *MQ*, dan *ITS* yang lebih tinggi dan nilai keausan yang lebih rendah daripada metode konvensional, menandakan bahwa campuran mampu menahan beban dan keausan yang lebih baik serta tidak mudah mengalami deformasi. Selain itu, berdasarkan pengujian durabilitas, penggunaan metode pencampuran bertahap dengan substitusi *filler* abu bauksit menghasilkan nilai ketahanan yang lebih baik daripada metode konvensional. Hal tersebut menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang baik terhadap perubahan suhu maupun cuaca.

Kata Kunci: abu bauksit, *filler*, pencampuran bertahap, dan *Stone Matrix Asphalt (SMA)*.

ABSTRACT

The development of technology in pavement has led to the emergence of new mixing methods, one of which is the gradual mixing method. In addition, bauxite ash can be used as an alternative to be utilized as a filler in the mixture to reduce environmental problems. This research aims to investigate the effect of bauxite ash as filler substitution on the volumetric, mechanical and durability characteristics of Stone Matrix Asphalt (SMA) mixes using the sequentials mixing method.

This research began with the examination of the physical properties of aggregate and asphalt materials. In the second stage, test specimens were made to find the Optimum Asphalt Content (KAO) with variations in asphalt content of 5.5%, 6%, 6.5%, 7%, and 7.5% of the total weight of the mixture. After obtaining the optimum asphalt content, the next step is to analyze the volumetric, mechanical, and durability parameters of the mixture based on VITM, VMA, stability, flow, MQ, IRS, IDP, IDK, ITS,TSR, and Cantabro Loss with 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% bauxite ash filler substitution using staged mixing method, then compared with conventional method.

The test results of volumetric characteristics showed that the greater the addition of bauxite ash filler substitution to the SMA mixture, the larger the voids in the mixture, thus reducing the density of the mixture. The use of staged mixing method has a positive effect on the volumetric value, where the voids produced are smaller than the conventional method, because the asphalt is able to fill the voids in the mixture optimally. However, in mechanical parameters, the use of the staged mixing method resulted in better structural strength, characterized by higher stability, flow, MQ, and ITS values and lower wear values than the conventional method, indicating that the mixture is able to withstand loads and wear better and is not easily deformed. In addition, based on durability testing, the use of the gradual mixing method with bauxite ash filler substitution resulted in better durability values than the conventional method. This shows that the mixture has good resistance to changes in temperature and weather.

***Keywords**: bauxite ash, filler, sequential mixing method, and Stone Matrix Asphalt (SMA).*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia menjadi negara dengan jumlah penduduk terbanyak ke- 4 di dunia. Hal tersebut yang melatarbelakangi populasi kepemilikan kendaraan bermotor terus mengalami peningkatan setiap tahunnya. Berdasarkan data Korlantas Polri bulan Februari 2024 tercatat populasi kendaraan bermotor di seluruh wilayah Indonesia berjumlah 160.652.675 unit. Untuk menunjang jumlah kendaraan yang besar tentunya membutuhkan prasarana yang memadai.

Jalan merupakan infrastruktur atau prasarana transportasi darat yang memiliki peranan penting dalam sektor perhubungan, terutama dalam melakukan distribusi barang dan jasa dari suatu tempat ke tempat lain secara efektif dan efisien. Kondisi jalan yang baik apabila dapat memberikan rasa nyaman, aman, kuat, dan ekonomis. Merujuk pada data Kementerian PUPR (2024) jumlah panjang jalan aspal dan non aspal di Indonesia sepanjang 548.097 km. Ada sekitar 31,9% jalan di seluruh wilayah Indonesia dalam kondisi rusak dan rusak berat (Badan Pusat Statistik, 2021).

Aspal adalah salah satu jenis bahan baku utama dalam pembuatan jalan di Indonesia yang berasal dari olahan minyak bumi. Aspal memiliki sifat yang elastis bila menerima beban kendaraan, memiliki ketahanan mampu menahan kebisingan. (Ratnasari, dkk 2023). Kekuatan utama pada aspal terdapat pada keadaan butir agregat yang saling mengunci dan sedikit pada pasir/ *filler* sebagai mortar.

Bahan pengisi *(filler)* atau bahan pengisi merupakan bagian dari agregat halus yang lolos saringan no.200 atau minimum 75% (Sukirman, 2003). Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga (2018), bahan pengisi (*filler*) yang dapat ditambahkan berupa batu kapur, atau debu kapur padam, debu kapur magnesium, dolomit, semen, atau abu terbang tipe C dan F. Salah satu bahan pengisi (*filler*) yang dapat digunakan adalah abu bauksit.

Bauksit merupakan biji utama dalam produksi *aluminium*. Kandungan dalam bauksit terdiri dari tiga unsur mineral, yaitu *gibbsite*, *boehmit,* dan *diaspore*. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian ESDM (2021), pada tahun 2020, Indonesia menjadi negara dengan cadangan bauksit terbesar keenam di dunia dengan jumlah produksi sebanyak 16 juta ton, artinya Indonesia memiliki peranan penting dalam penyediaan bahan baku bauksit dunia. Kepulauan Riau menjadi salah satu daerah dengan penghasil biji bauksit terbesar kedua di Indonesia. Produksi bijih bauksit menghasilkan jumlah limbah yang sangat besar yang akan berdampak buruk terhadap lingkungan. Selain itu, sebagian besar *filler* merupakan hasil alam seperti semen dan abu batu yang jumlahnya kian terbatas. Oleh karena itu, penggunaan material alternatif dengan bahan pengganti berupa limbah abu bauksit dapat dijadikan pilihan untuk mengurangi permasalahan lingkungan. Pada umumnya, bauksit memiliki kandungan mineral, seperti *aluminium, hematite, geotite, silica, rutile*, dan *kaolinite* (Bora, dkk, 2016). Penelitian tentang bauksit dilakukan oleh Rabihati, dkk (2020) sebagai bahan pengganti agregat halus pada campuran beton. Hasil penelitian tersebut meningkatkan nilai kuat tarik dan kuat tekan beton rata-rata pada usia 7 hari dan 28 hari.

Stone Matrix Asphalt (SMA) merupakan jenis campuran beton aspal yang terdiri dari agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), dan bahan pengikat (aspal). Pada perkerasan lentur, *SMA* digunakan sebagai lapis permukaan dengan susunan agregat bergradasi terbuka (*open graded*) dengan kadar agregat kasar yang besar sekitar 70% hingga 80%, dan bahan pengisi sekitar 11%. Karena kadar agregat kasar yang besar dan kadar aspalnya yang tinggi, campuran *SMA* ini memiliki keunggulan seperti, lebih tahan terhadap deformasi beban kendaraan, mempunyai *skid resistance* (ketahanan gelincir) yang tinggi, dan cenderung lebih tahan lama (Ramadhan dan Fauziah, 2020). Dibalik keunggulannya, campuran *SMA* memiliki kekurangan yaitu kurang tahan terhadap temperatur tinggi. Kadar aspal yang tinggi juga berpotensi mengalami *draindown*. Oleh karena itu, dibutuhkan bahan tambah (*additive*) salah satunya berupa serat selulosa. Serat selulosa berfungsi untuk menstabilkan aspal dan meningkatkan kekuatan

campuran.

Berdasarkan uraian di atas, peneliti mencoba melakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan data sekunder dari Yuda (2024) tentang pengaruh substitusi *filler* abu bauksit terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Aphalt (SMA)*. Berbeda dari penelitian sebelumnya, penelitian ini membandingkan metode pencampuran konvensional dengan metode pencampuran bertahap untuk mengetahui seberapa besar efisiensi kedua metode tersebut terhadap kinerja campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Pada penelitian ini, penulis menggunakan *filler* yang sama yaitu abu bauksit dengan kadar substitusi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Adapun penelitian dengan menggunakan metode konvensional telah dilakukan oleh Yuda (2024). Hasil dari penelitian tersebut didapatkan Kadar Aspal Optimum (KAO) yang digunakan untuk variasi substitusi *filler* adalah 6,5%. Berat jenis pada masing-masing *filler* yaitu abu bauksit sebesar 2,510 gr/cm^3 dan debu batu sebesar 2,541 gr/cm^3.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan suatu permasalahan pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh substitusi *filler* abu bauksit terhadap karakteristik volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan metode pencampuran bertahap?
2. Bagaimana pengaruh substitusi *filler* abu bauksit terhadap karakteristik mekanik pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan metode pencampuran bertahap?
3. Bagaimana pengaruh substitusi *filler* abu bauksit terhadap durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan metode pencampuran bertahap?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang dapat diperoleh dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menginvestigasi pengaruh substitusi *filler* abu bauksit dengan metode

pencampuran bertahap terhadap karakteristik volumetrik campuran *Stone Matrix Asphalt.*

2. Mengetahui pengaruh substitusi *filler* abu bauksit dengan metode pencampuran bertahap terhadap karakteristik mekanik campuran *Stone Matrix Asphalt.*
3. Memprediksi pengaruh substitusi *filler* abu bauksit dengan metode pencampuran bertahap terhadap durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt.*

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat khususnya bagi penulis maupun pembaca sebagai berikut.

1. Memberikan pemahaman dan pengetahuan mengenai pengaruh substitusi *filler* abu bauksit dengan berbagai metode pencampuran terhadap kinerja dan kekuatan campuran *Stone Matrix Asphalt.*
2. Mengetahui kelebihan-kelebihan yang dihasilkan dalam penelitian dengan menggunakan abu bauksit sebagai substitusi *filler* pada campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan berbagai metode pencampuran, sehingga kedepannya dapat dijadikan bahan utama yang ramah lingkungan dalam pelaksaan konstruksi perkerasan jalan di Indonesia.
3. Menjadikan penelitian ini sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya dalam mengembangkan teknologi perkerasan jalan raya.

1.5 Batasan Penelitian

Perlunya batasan penelitian ini bertujuan agar penelitian lebih terarah dan tidak meluas dari ruang lingkup pembahasan sehingga tercapai tujuan penelitian. Adapun batasan-batasan penelitian tersebut adalah sebagai berikut.

1. Campuran yang digunakan adalah *Stone Matrix Asphalt* berdasarkan Bina Marga 2018 Revisi 2 dan SNI 8129:2015.
2. Bahan ikat yang digunakan yaitu aspal penetrasi 60/70.
3. Material *filler* adalah abu bauksit yang diperoleh dari Kota Batam, Provinsi

Kepulauan Riau.

4. Agregat kasar dan agregat halus berasal dari *Cl*ereng, Kulon Progo yang disediakan oleh Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Bahan aditif yang digunakan berupa serat selulosa Viatop[66] dengan kadar 0,3% terhadap berat total campuran sesuai dengan SNI 8129:2015 dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.
6. Metode yang digunakan yaitu metode konvensional dan metode pencampuran bertahap tiga. Hasil dari perbandingan metode konvensional mengacu pada penelitian Yuda (2024).
7. Kadar aspal yang digunakan untuk menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) adalah 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% terhadap berat total campuran.
8. Variasi substitusi *filler* abu bauksit yang digunakan adalah 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap berat *filler*.
9. Tinjauan karakteristik volumetrik campuran didasarkan dari nilai *density, Voids in Total Mix (VITM), Voids in Minerale Aggregate (VMA), Voids Filler with Asphalt (VFWA),* dan *Voids in Coarse Aggregate (VCA)*.
10. Tinjauan kekuatan struktur campuran didasarkan dari nilai stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient (MQ)*, *Indirect Tensile Strength (ITS)* dan *Cantabro Loss (CL)*.
11. Tinjauan durabilitas campuran didasarkan dari nilai *Index of Retained Strength (IRS),* Indeks Durabilitas (ID), *Tensile Strength Ratio (TSR), Index of Cantabro Loss* (*ICL*), dan *Draindown.*
12. Penelitian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
13. Tidak meneliti dan menguji kandungan unsur mineral dan kimiawi pada limbah abu bauksit.
14. Penelitian ini tidak melakukan pengujian stabilitas dinamis campuran.
15. Penelitian ini tidak membahas segi ekonomis dari penggunaan metode pencampuran bertahap.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Campuran secara umum terdiri dari agregat dan bahan ikat (aspal) yang menjadi bahan pembuatan perkerasan jalan. Perkerasan yang baik adalah yang dapat menjamin empat hal berikut, yaitu fleksibilitas, stabilitas (*stability*), durabilitas (*durability*), dan kekesatan (*skid resistance*). Sehingga kinerja perkerasan dapat bekerja sesuai dengan peranannya secara struktural dan fungsional. Peran perkerasan secara struktural artinya dapat memberikan pelayanan optimal dalam menahan beban lalu lintas tanpa terjadi kerusakan pada struktur utamanya, sedangkan secara fungsional dapat melayani kebutuhan lalu lintas dengan baik, ditinjau dari segi kenyamanan dan keamanan dalam berkendara. Oleh karena itu, untuk menciptakan hasil perkerasan yang baik diperlukan perencanaan perkerasan yang sesuai dengan peraturan dan spesifikasi yang ada.

2.2 Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Kajian tentang pengaruh rendaman air laut telah dipublikasikan oleh Yusuf dan Fauziah (2018). Dalam kajiannya melakukan perbandingan kinerja campuran *SMA* dengan menggunakan dua bahan ikat yang berbeda, yaitu Aspal Pen 60/70 dan Starbit E-55. Hasil dari penelitian dengan menggunakan kedua bahan ikat tersebut pada nilai permeabilitas campuran *SMA* 12,5 mm menunjukkan indikator drainase jelek yang artinya campuran tidak mudah dilewati air.

Banafsaj dan Fauziah (2018) melakukan serangkaian uji eksperimen terkait kinerja campuran *SMA* menggunakan *filler* Abu Sekam Padi akibat rendaman air laut. Hasil dari uji eksperimen tersebut menyimpulkan bahwa penambahan ASP dan lama rendaman air laut memengaruhi nilai *ITS.* Penurunan nilai *ITS* seiring dengan bertambahnya kadar *filler* dan lama durasi perendaman. Artinya semakin menurun nilai *ITS* pada campuran *SMA* yang disebabkan oleh penambahan ASP dan rendaman air laut dapat mengakibatkan turunnya sifat adhesi dan campuran

menjadi peka terhadap oksidasi. Selanjutnya campuran akan mudah mengalami keretakan saat dibebani lalu lintas. Namun nilai *IRS* mengalami kenaikan pada kadar *filler* 50%, kemudian pada kadar *filler* 75% mengalami penurunan.

Hidayat dan Kushari (2019) dalam penelitiannya mengkaji tentang pemanfaatan abu ampas tebu sebagai *filler* pengganti pada campuran *SMA*. Eksperimen ini menghasilkan kesimpulan bahwa untuk mendapatkan peningkatan nilai stabilitas dan nilai *flow* sebaiknya menggunakan substitusi *filler* 50% agar mendapatkan hasil yang baik. Selain itu nilai *IRS* dan *ITS* pada persen abu ampas tebu 50% juga paling tinggi, ini menggambarkan bahwa campuran ini memiliki durabilitas yang lebih tinggi dan cocok untuk kondisi daerah dengan curah hujan tinggi.

Tolab dan Fauziah (2024) melakukan eksperimen laboratorium tentang penggunaan limbah *geothermal* sebagai substitusi *filler* pada campuran *Stone Matrix Asphal* (*SMA*). Tolab dalam penelitiannya melakukan pengujian karakteristik *Marshall, VCA, IRS, ITS, TSR, CL,* dan *AFD*. Pengujian tersebut dilakukan pada setiap kadar substitusi *filler* limbah *geothermal* sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%. Berdasarkan hasil analisis, menunjukkan penggunaan limbah *geothermal* sebagai *filler* pada campuran *SMA* mampu memberikan kinerja yang terbaik pada kadar *filler* 40%.

Yuda (2024) melakukan penelitian tentang pengaruh abu bauksit sebagai substitusi *filler* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Dalam penelitiannya menggunakan substitusi *filler* menguji kekuatan struktur campuran, karakteristik volumetrik, dan durabilitas campuran. Pada penelitiannya menggunakan substitusi kadar *filler* 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentasi substitusi *filler* abu bauksit terbaik sebesar 100%. Pada parameter kekuatan struktur berdasarkan nilai stabilitas, *flow, MQ,* dan *ITS*, menghasilkan campuran yang kaku, mampu menahan beban dan memiliki ketahanan terhadap *fatigue crack*.

Octavian (2024) melakukan penelitian tentang pengaruh limbah serbuk besi sebagai substitusi *filler* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Dalam penelitiannya menggunakan substitusi *filler* menguji kekuatan struktur campuran,

karakteristik volumetrik, dan durabilitas campuran. Pada penelitiannya menggunakan substitusi kadar *filler* 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentasi substitusi *filler* serbuk besi terbaik sebesar 50%. Pada parameter kekuatan struktur berdasarkan nilai stabilitas, *flow, MQ,* dan *ITS*, dimana pada kadar substitusi optimum 50% menghasilkan campuran yang kaku dan tahan deformasi, akan tetapi tidak tahan terhadap kuat tariknya.

2.3 Kinerja Campuran Aspal dengan Metode Pencampuran

Metode pencampuran bertahap merupakan salah satu dari metode dalam pencampuran beton aspal yang berfungsi untuk meningkatkan kinerja campuran. Pada metode ini, agregat kasar dilapisi terlebih dahulu dengan kadar aspal optimum yang telah ditentukan, kemudian diikuti dengan penambahan agregat halus dan bahan pengisi (*filler*). Hal tersebut bertujuan agar aspal dapat menyelimuti agregat secara merata dan homogen. Campuran aspal dengan metode pencampuran bertahap memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen dan menurunkan terjadinya pengelupasan agregat yang diakibatkan oleh debu dan kotoran. (Kok dan Koluglu, 2011).

Hesami, dkk (2015), Jacobsson (2009), Viman (2011), dan Viman, dkk (2008) menerangkan empat manfaat ketika menerapkan metode pencampuran bertahap dalam campuran beton aspal, yaitu suhu produksi lebih rendah <30ºC, campuran lebih homogen, lapisan lebih tebal disekitar partikel yang lebih kasar sehingga menghasilkan kualitas campuran yang lebih baik, dan lebih ramah lingkungan serta biaya yang ekonomis.

Kiselev, dkk (2021) menggunakan metode pencampuran dua tahap untuk mengetahui peningkatan kinerja sifat mekanik dan fungsional pada campuran aspal porus dengan tambahan modifikasi bahan ikat berupa *styrene-butadienestyrene* (SBS) dan *tafpack-super* (TPS). Dalam penelitian ini, digunakan variasi kadar bahan ikat SBS 4% dan TPS 6%, TPS 8%, dan TPS 10%. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan metode pencampuran dua tahap memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan metode konvensional.

Wahyudi (2019) meneliti tentang pengaruh metode pencampuran terhadap karakteristik campuran *superpave* dan aspal porus. Penelitian ini menggunakan tiga skema metode pengujian, yaitu metode 1,2, dan 3. Dari penelitian tersebut, diperoleh nilai *ITS* pada campuran *superpave* dari metode pencampuran 2 dan 3 lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional, sedangkan pada campuran aspal porus metode konvensional menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan metode 2 dan 3. Nilai *TSR* dan *IRS* dengan metode pencampuran bertahap pada campuran *superpave* cenderung memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional. Berbanding terbalik dengan campuran aspal porus yang memiliki nilai lebih buruk dengan metode pencampuran bertahap.

Hidayat (2021) melakukan kajian penelitian mengenai pengaruh perbandingan metode pencampuran dua tahap terhadap campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* 12,5 dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber*. Hasil dari penelitiannya menunjukkan bahwa metode pencampuran dua tahap mengalami peningkatan nilai yang signifikan pada pengujian *Marshall, IRS, ITS,* dan *TSR* dibandingkan dengan metode konvensional, baik yang menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70 maupun aspal *Crumb Rubber*. Sedangkan nilai *Cantabro Loss* berbahan ikat aspal pen 60/70 dan aspal *Crumb Rubber* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap lebih rendah dari penggunaan metode pencampuran konvensional. Hal tersebut menandakan bahwa metode pencampuran dua tahap mampu meningkatkan kualitas campuran.

Perbandingan kinerja campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dengan berbagai metode pencampuran telah dikaji oleh Mahza (2023). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap terhadap nilai kekuatan struktur, volumetrik dan durabilitas campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Penelitian ini memperoleh kesimpulan bahwa nilai *Marshall, IRS, ITS, TSR, CL,* dan *AFD* menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan campuran yang lebih baik dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional setelah melalui proses perendaman.

Kajian tentang perbandingan berbagai metode pencampuran terhadap kinerja campuran *Hot Rolled Asphalt (HRA)* telah dipublikasikan oleh Firdaus (2023).

Hasil kajian tersebut menunjukkan nilai stabilitas, *flow*, *VMA*, dan *density* lebih besar dengan metode pencampuran dua tahap, sedangkan nilai *MQ, VITM,* dan *VFWA* lebih kecil. Nilai *IRS, ITS,* dan *TSR* dengan menggunakan metode pencampuran dua tahap menghasilkan nilai yang lebih tinggi , sehingga campuran memiliki ketahanan yang baik.

Ichwan (2023) melakukan penelitian tentang perbandingan kinerja campuran *AC – BC* dengan metode pencampuran bertahap. Hasil dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa metode pencampuran dua tahap memiliki pengaruh ketahanan campuran yang lebih baik dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional. Hal ini ditinjukkan oleh kenaikan nilai *IRS, ITS,* dan *TSR* yang signifikan.

Iqbal dan Fauziah (2023) melakukan sebuah kajian eksperimen tentang penggunaan bahan tambah serbuk ban karet dengan menggunakan metode pencampuran bertahap untuk mengetahui kinerja campuran *HRS – WC.* Hasil kajian tersebut menunjukkan indikator yang baik bahwa penambahan serbuk ban karet pada kadar 2% mampu meningkatkan kinerja karakteristik *Marshall* dan stabilitas. Penggunaan metode pencampuran bertahap dapat memperbaiki kinerja campuran lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional.

2.4 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

Adapun perbandingan peneletian terdahulu dengan penelitian yang akan dilaksanakan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

No	Aspek	Kok dan Kuloglu (2011)	Hesami, dkk (2015)	Yusuf dan Fauziah (2018)	Abdillah, dkk (2018)	Wahyudi (2019)
1.	Judul Penelitian	*Effects of Two-Phase Mixing Method on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt*	*Effect of Mixing Sequence On The Workability and Performance of Asphalt Mixtures*	Pengaruh Durasi Rendaman Air Laut terhadap Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yang Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Starbit E-55	Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Viatop^{66} pada Campuran *Stone Matrix Asphalt* terhadap Titik Lembek Aspal dan Sifat *Drain Down* Campuran	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran terhadap Karakteristik Campuran *Superpave* dan Aspal Porus
2.	Jenis Campuran	*Asphalt Concrete Binder Course (AC-BC)*	*Split Mastic Asphalt*	*SMA* 12,5 mm	*SMA*	*Superpave* dan Aspal Porus
3.	Bahan Ikat	*AC*-5, *AC*-10, dan *AC*-20	*AC*-10	Pertamina Pen 60/70 dan Starbit E-55	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70
4.	*Filler*	-	-	Abu Batu	-	Debu Batu
5.	Bahan Tambah	*Styrene Butadiene Styrene (SBS)*	-	*Roadcel-50*	Viatop^{66}	-
6.	Metode Pencampuran	Konvensional dan Dua Tahap	Metode Dua Tahap	Konvensional	Konvensional	Konvensional dan Dua Tahap

Sumber: Kok dan Kuloglu (2011), Hesami, dkk (2015),Yusuf dan Fauziah (2018), Abdillah, dkk (2018), Wahyudi (2019).

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

No	Aspek	Kok dan Kuloglu (2011)	Hesami, dkk (2015)	Yusuf dan Fauziah (2018)	Abdillah, dkk (2018)	Wahyudi (2019)
7.	Metode Pengujian	*Marshall, IRS, ITS, Rutting Test*	*X-ray computed, workability, viscosity*	Karakteristik *Marshall, IRS, ITS,* dan Permeabilitas	Titik Lembek dan *Draindown*	*Marshall, ITS, IRS, TSR,* dan *Cantabro Loss*
8.	Hasil	Metode pencampuran dua tahap mampu meningkatkan nilai *MQ, stiffness modulus,* dan *creep test* dibandingkan metode konvensional, sehingga campuran lebih tahan terhadap deformasi permanen dan mengurangi sesitivitas kelembaban.	Hasil dari eksperimen ini menunjukkan metode pencampuran dua tahap memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen yang baik, tetapi rentan terhadap retak getas. Selain itu, distribusi rongga udara yang merata membuat campuran lebih mudah dipadatkan.	Hasil penelitian menunjukkan nilai stabilitas campuran dengan kedua bahan ikat mengalami penurunan seiring bertambahnya durasi rendaman. Nilai *ITS* dengan bahan ikat aspal Pen 60/70 cenderung lebih stabil pada maksimum durasi perendaman.	Semakin besar kadar viatop[66], nilai titik lembek aspal semakin tinggi. Hal tersebut juga mempengaruhi penurunan nilai *draindown*.	Pada metode dua tahap memiliki dua variasi dengan komposisi agregat yang berbeda ketika pencampuran, sehingga pada metode dua tahap menghasilkan versi 3 yang mana hasil dari beberapa pengujian menunjukkan hasil yang lebih baik.

Sumber: Kok dan Kuloglu (2011), Hesami, dkk (2015),Yusuf dan Fauziah (2018), Abdillah, dkk (2018), Wahyudi (2019).

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

No	Aspek	Kiselev, dkk (2021)	Hidayat (2021)	Hawari dan Lizar (2021)	Mahza (2023)	Chasanah dan Sukmo (2023)
1.	Judul Penelitian	*The Effect of Two-Phase Mixing On The Functional and Mechanical Properties of TPS/SBS-Modified Porous Asphalt Concrete*	Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* dengan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 dan Aspal *Crumb Rubber*	Analisis Pengaruh Penggantian *Filler* Abu Sawit *Fly Ash* Dan Bottom Ash Terhadap Karakteristik Perkerasan Lentur (*AC-WC*)	Perbandingan Kinerja *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap	Pengaruh Bubuk Talk Sebagai Bahan *Filler* Pengganti pada Campuran *AC-WC*
2.	Jenis Campuran	*Asphalt Porous* 13 mm	*SMA* 12,5 mm	*AC-WC*	*SMA* 19 mm	*AC-WC*
3.	Bahan Ikat	*Tafpack-super* (TPS).	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70
4.	*Filler*	-	Debu Batu	*Fly Ash* dan *Bottom Ash*	Debu Batu	Bubuk Talk
5.	Bahan Tambah	*Styrene Butadiene Styrene (SBS)*	Dedak Padi	-	Serat Selulosa Buatan	-
6.	Metode Pencampuran	Konvensional dan Dua Tahap	Konvensional dan Dua Tahap	Konvensional	Konvensional dan Dua Tahap	Konvensional

Kiselev, dkk (2021), Hidayat (2021), Hawari dan Lizar (2021), Mahza (2023), dan Chasanah dan Sukmo (2023).

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

No	Aspek	Kiselev, dkk (2021)	Hidayat (2021)	Hawari dan Lizar (2021)	Mahza (2023)	Chasanah dan Sukmo (2023)
7.	Metode Pengujian	*Material Test, Rutting Test, Split Test, Fatigue Test.*	*Marshall, ITS, IRS, TSR,* dan *Cantabro Loss*	*Marshall Test*	*Marshall, IRS, Index Durability, ITS, TSR, CL,* dan *AFD*	*Marshall, ITS,* dan *Cantabro Test*
8.	Hasil	Campuran aspal porus yang menggunakan metode pencampuran dua tahap menunjukkan sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan metode konvensional.	Hasil menunjukkan metode pencampuran dua tahap dengan bahan ikat *Crumb Rubber* mampu meningkatkan stabilitas, *skid resistance*, dan lebih kedap air sehingga cocok pada kondisi lalu lintas berat dan iklim tropis.	Penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* abu sawit menyebabkan campuran menjadi berongga. Ditunjukkan dengan adanya kenaikan *VITM* dan *VMA* serta penurunan nilai *VFWA* pada setiap kadar.	Hasil menunjukkan nilai *Marshall, IRS, TSR, CL,* dan *AFD* dengan metode pencampuran dua tahap setelah melalui proses rendaman menghasilkan campuran yang lebih baik dibandingkan metode pencampuran konvensional.	Nilai stabilitas, *flow*, *MQ*, *VITM*, dan *density* mengalami peningkatan penggunaan bubuk talk sebagai *filler*. Sedangkan nilai *VMA* dan *VFWA* mengalami penurunan.

Kiselev, dkk (2021), Hidayat (2021), Hawari dan Lizar (2021), Mahza (2023), dan Chasanah dan Sukmo (2023).

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

No	Aspek	Yuda (2024)	Prasetya (2024)	Peneliti (2024)
1.	Judul Penelitian	Pengaruh Abu bauksit sebagai Substitusi *Filler* terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*	Pemanfaatan *Fly Ash* Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik *Stone Matrix Asphalt*	Pengaruh Substitusi *Filler* Abu bauksit terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dengan Metode Pencampuran Bertahap
2.	Jenis Campuran	*SMA* 25 mm	*SMA 25 mm*	*SMA* 25 mm
3.	Bahan Ikat	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70	Aspal Pen 60/70
4.	*Filler*	Abu bauksit	*Fly Ash*	Abu bauksit
5.	Bahan Tambah	Viatop[66]	*CF 51500*	Viatop[66]
6.	Metode Pencampuran	Konvensional	Konvensional	Konvensional dan Bertahap
7.	Metode Pengujian	*Marshall, IRS, IDP, IDK, TSR, Draindown, dan Cantabro Loss.*	*Marshall, IRS, IDP, IDK, TSR, Draindown, dan Cantabro Loss.*	*Marshall, IRS, ITS, IDP, IDK, TSR, Draindown, dan Cantabro Loss*

Yuda (2024), Prasetya (2024), dan Peneliti (2025).

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Sekarang dengan Penelitian Terdahulu

No	Aspek	Yuda (2024)	Prasetya (2024)	Peneliti (2024)
8.	Hasil	Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentasi substitusi *filler* abu bauksit terbaik sebesar 100%. Penggunaan debu baukit sebagai substitusi *filler* membuat campuran lebih berongga. Hal ini ditandai dengan meningkatnya nilai *VITM* , dan *VMA* serta menurunnya nilai *VFWA* dan *density*. Disisi lain, abu bauksit membuat campuran lebih tahan terhadap deformasi permanen.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa *FA* menyebabkan penurunan stabilitas campuran. Penambahan *FA* dapat mengisi rongga dalam campuran, tetapi tidak secara optimal. Sehingga menghasilkan campuran yang lebih berongga. Disisi lain, penambahan *FA* dapat meningkatkan *worability*.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentasi substitusi *filler* abu bauksit terbaik sebesar 100%. Penggunaan debu baukit sebagai substitusi *filler* membuat campuran lebih berongga. Hal ini ditandai dengan meningkatnya nilai *VITM* , dan *VMA* serta menurunnya nilai *VFWA* dan *density*. Disisi lain, abu bauksit membuat campuran lebih tahan terhadap deformasi permanen. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai yang lebih baik pada setiap parameter pengujian dibandingkan metode konvensional.

Yuda (2024), Prasetya (2024), dan Peneliti (2025).

Berdasarkan Tabel 2.1 di atas, terdapat beberapa perbedaan dan kesamaan antara penelitian sekarang dengan penelitian terdahulu diantaranya sebagai berikut.

1. Penelitian yang dilakukan Kok dan Kuloglu (2011), Wahyudi (2019), Kiselev, dkk (2021), Hidayat (2021), dan Mahza (2023) menggunakan metode pencampuran yang sama yaitu membandingkan antara metode konvensional dengan metode pencampuran bertahap.
2. Terdapat kesamaan jenis campuran pada penelitian yang dilakukan oleh Yusuf dan Fauziah (2018), Abdillah dkk (2018), Hidayat (2021), Mahza (2023), dan Yuda (2024) yaitu menggunakan campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*.
3. Beberapa data sekunder diambil dari penelitian Yuda (2024) karena terdapat kesamaan dan perbedaan di antaranya menggunakan jenis campuran dan gradasi yang sama yaitu *Stone Matrix Asphalt* 25 mm, jenis *filler* yang sama debu batu dan abu bauksit, kadar *filler* abu bauksit 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%, dan bahan ikat yang sama yaitu Aspal Pen 60/70. Adapun data tersebut yaitu perhitungan berat jenis agregat dan *filler*. Perbedaannya terletak pada penggunaan metode pencampuran, Yuda (2024) menggunakan metode konvensional sedangkan penulis menggunakan metode pencampuran bertahap. Hasil penelitian Yuda (2024) menjadi pembanding metode pencampuran bertahap.
4. Penelitian ini menggunakan bahan tambah Viatop[66], sedangkan beberapa penelitian terdahulu menggunakan bahan tambah yang berbeda.
5. Penelitian ini menggunakan beberapa parameter pengujian yang sama dengan beberapa penelitian sebelumnya berupa *Marshall Test, Index of Retained Strength (IRS), Indirect Tensile Strength (ITS), Tensile Strength Ratio (TSR), Cantabro Loss,* Indeks Durabilitas Campuran, dan *Draindown*.

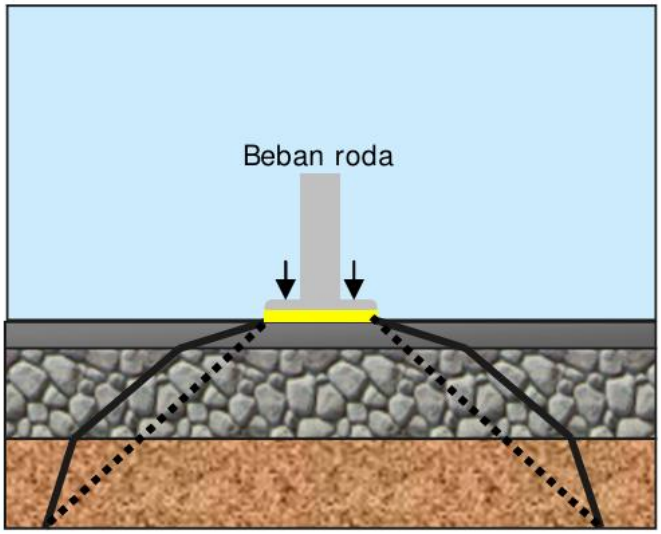
BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Jalan

Perkerasan jalan merupakan lapisan perkerasan yang terletak di antara lapisan tanah dasar dan roda kendaraan, yang berfungsi memberikan pelayanan kepada sarana transportasi, dan selama masa pelayanannya diharapkan tidak terjadi kerusakan yang berarti (Sukirman, 2003). Perkerasan harus memiliki kekuatan dalam menopang beban lalu lintas. Permukaan pada perkerasan haruslah rata tetapi harus mempunyai kekesatan atau tahan gelincir *(skid resistance)* di permukaan perkerasan. Perkerasan dibuat dari berbagai pertimbangan, seperti persyaratan struktur, ekonomis, keawetan, kemudahan, dan pengalaman (Christady, 2011). Jenis perkerasan berdasarkan bahan pengikatnya dibedakan menjadi perkerasan lentur *(flexible pavement)* yaitu perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat, perkerasan kaku *(rigid pavement)* yaitu perkerasan yang menggunakan semen portland, dan perkerasan komposit *(composite pavement)* yaitu perkerasan kaku yang dikombinasikan dengan perkerasan lentur, dapat perkerasan lentur di atas perkerasan kaku atau perkerasan kaku di atas perkerasan lentur (Sukirman, 2010).

3.2 Perkerasan Lentur (Flexible Pavement)

Pada umumnya perkerasan lentur baik digunakan untuk jalan yang melayani beban lalulintas ringan hingga sedang, seperti jalan perkotaan, jalan dengan utilitas terletak di bawah perkerasan jalan, perkerasan bahu jalan, atau perkerasan dengan konstruksi bertahap (Sukirman, 2010). Perkerasan lentur *(flexible pavement)* adalah perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat dan lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke lapisan di bawahnya hingga ke tanah dasar. Adapun distribusi penyaluran beban roda pada perkerasan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Distribusi Beban Roda pada Lapisan Perkerasan Lentur

(Sumber: Sukirman, 2010)

3.3 Karakteristik Perkerasan Lentur

Karakteristik perkerasan merupakan sifat khusus perkerasan yang menunjukan mutu suatu perkerasan. Karakteristik perkerasan yang baik adalah yang dapat mengakomodasi lalu lintas yang direncanakan, ditinjau dari segi kekuatannya, keawetan, dan kenyamanannya. Tentunya hal tersebut tidak terlepas dari bahan penyusunnya pada saat proses perencanaan dan pembuatannya. Karakteristik yang harus dimiliki oleh perkerasan lentur adalah sebagai berikut.

1. Stabilitas

   Stabilitas adalah kemampuan lapisan perkerasan dalam menopang beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan deformasi permanen seperti gelombang *(shoving)*, alur *(ruts)* , *bleeding*, retak *(cracking)*, pecah, dan bolong. Kebutuhan stabilitas sebanding dengan jumlah lalu lintas dan beban kendaraan yang akan melewati jalan tersebut. Pada jalan dengan tingkat pelayanan volume lalu lintas tinggi dan kendaraan berat, maka dibutuhkan stabilitas perkerasan yang tinggi dibandingkan dengan jalan pada tingkat pelayanan ringan hingga sedang. Stabilitas dihasilkan dari geseran dan *interlocking* antar partikel agregat, dan daya ikat dari lapisan aspal.

2. Durabilitas

   Durabilitas adalah kemampuan lapis permukaan perkerasan dalam mempertahankan sifat aslinya terhadap pengaruh cuaca dan lalu lintas selama masa pelayanan. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi durabilitas adalah:

   a. Film aspal atau selimut aspal yang tebal dapat menghasilkan lapis aspal beton yang berdurabilitas tinggi, tetapi kemungkinan terjadinya *bleeding* menjadi tinggi.
   b. *Voids in Mix* (VIM) kecil sehingga lapis kedap air dan udara tidak masuk kedalam campuran yang menyebabkan terjadinya terjadinya oksidasi.
   c. *Void in Mineral Agregate* (*VMA*) besar, sehingga film aspal dibuat tebal. Jika *VMA* dan VIM kecil serta kadar aspal tinggi, maka kemungkinan terjadinya *bleeding* besar. Digunakan agregat bergradasi senjang untuk mencapai *VMA* yang besar.

3. Kelenturan *(Flexibility)*

   Kelenturan atau fleksibilitas campuran adalah kemampuan bahan lapisan perkerasan dalam berdeformasi akibat beban lalu lintas berulang tanpa menimbulkan keretakan dan perubahan volume. Untuk mendapatkan nilai fleksibitilas yang tinggi pada suatu campuran, digunakan agregat bergradasi senjang untuk mendapatkan nilai *VMA* yang besar dan penggunaan aspal dengan penetrasi tinggi.

4. Tahanan Geser *(Skid Resistance)*

   Tahanan Geser adalah kekesatan yang diberikan oleh permukaan perkerasan sehingga kendaraan yang melaluinya tidak mengalami slip atau pergeseran ban saat melaju, baik dalam kondisi jalan basah maupun kering. Kekesatan dinyatakan dengan koefisien gesek antar permukaan jalan dan ban kendaraan.

5. Kedap Air

   Kedap air adalah kemampuan bahan perkerasan untuk tidak dapat dengan mudah dilalui oleh air atau udara. Air dan udara yang masuk kedalam lapisan perkerasan dapat mengakibatkan percepatan penuaan (oksidasi) campuran beton aspal dan pengelupasan selimut aspal dari permukaan agregat.

6. Ketahanan Leleh

   Ketahanan leleh adalah ketahanan lapis aspal beton tanpa terjadinya kelelehan yang berupa alur (*rutting*) dan retak akibat menerima beban berulang. Faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan terhadap kelelehan adalah sebagai berikut.

   a. *VIM* yang tinggi dan kadar aspal yang rendah akan mengakibatkan kelelahan yang lebih cepat.
   b. *VMA* dan kadar aspal yang tinggi dapat mengakibatkan lapis perkerasan menjadi fleksibel

7. Kemudahan Pelaksanaan (*Workability*)

   Workability adalah kemudahan pelaksanaan suatu campuran perkerasan untuk dilakukan penghamparan dan pemadatan sehingga diperoleh hasil kepadatan yang diharapkan. Banyak faktor yang dapat mempengaruhi *workability* yaitu, penentuan gradasi agregat, temperatur campuran, dan kandungan bahan pengisi (*filler*).

3.4 Material Penyusun Campuran

Bahan campuran aspal beton pada umumnya terdiri dari agregat, aspal, bahan pengisi (*filler*), bahan aditif, serat selulosa (untuk campuran *SMA*). Adapun material penyusun campuran aspal beton yang digunakan adalah sebagai berikut.

3.4.1 Aspal

Menurut Sukirman (2003) aspal merupakan material perekat berwana hitam atau coklat tua, dengan unsur utamanya adalah bitumen. Aspal memiliki sifat *thermoplastic* dan *visco-elastic*. *Thermoplastic* yaitu viskositasnya turun (melunak) jika dipanaskan dan mengeras jika termperatur turun, sedangkan *visco-elastic* yaitu bergantung pada temperatur (T), dan lama pembebanan (t). Aspal berwarna hitam atau kecoklatan, memiliki sifat kedap air dan *adhesive* (*British Standart*, 1989). Banyaknya aspal dalam campuran perkerasan berkisar antar 4 – 10% berdasarkan berat campuran, atau 10 – 15% berdasarkan volume campuran.

Berdasarkan sumbernya, jenis aspal terdiri dari:

1. Aspal Alam

   Aspal alam terbentuk dari minyak mentah bumi yang naik ke permukaan melalui celah kulit bumi. Minyak ringan dan gas yang menguap akibat paparan sinar matahari dan angin, sehingga meniggalkan residu yang plastis dan berwana hitam disebut aspal. Kebanyakan aspal alam di tempat asalnya bercampur dengan mineral lainnya. Aspal alam banyak tersebar di beberapa wilayah di belahan bumi, seperti di Trinidad, Venezuela, dan Pulau Buton.

2. Aspal Minyak (*Petroleum Asphalt*)

   Aspal alam diperoleh dari penyulingan minyak bumi. Dari hasil destilasi minyak mentah bumi diperoleh berbagai jenis minyak seperti bahan bakar yang sering digunakan untuk kendaraan maupun kegiatan pembakaran lainnya. Residu yang dihasilkan dari proses destilasi inilah yang disebut aspal, namun aspal ini masih lunak yaitu mempunyai penetrasi sekitar 300. Diperoleh aspal penetrasi 60/70 dan aspal lainnya setelah melalui proses *semi-blown*.

3. Aspal Modifikasi

   Campuran aspal keras dengan menggunakan suatu bahan tambah untuk meningkatkan ketahanan dan kepekaan aspal terhadap temperatur. Polimer adalah jenis bahan tambah yang sering digunakan sehingga aspal modifikasi dapat disebut juga aspal polimer.

Pada umumnya aspal keras yang digunakan untuk campuran aspal panas di Indonesia adalah jenis aspal penetrasi 60/70. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018, ketentuan untuk Aspal Keras Pen 60/70 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Ketentuan untuk Aspal Keras

No	Jenis Pengujian	Metoda Pengujian	Tipe I Aspal Pen. 60-70
1.	Penetrasi pada 25ºC (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70

Sumber: Bina Marga (2018)

Lanjutan Tabel 3.1 Ketentuan untuk Aspal Keras

2.	Temperatur yang menghasilkan Geser Dinamis (G*/sinδ) pada osilasi 10 rad/detik ≥ 1,0 kPa, (ºC)	SNI 06-6442-2000	-
3.	Viskositas kinematis 135ºC (cSt)	ASTM D2170-10	≥ 3000
4.	Titik lembek (ºC)	SNI 2434:2011	≥ 48
5.	Daktilitas pada 25ºC, (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100
6.	Titik nyala (ºC)	SNI 2433:2011	≥ 232
7.	Kelarutan dalam *Trichloroethylene* (%)	AASHTO T44-14	≥ 99
8.	Berat jenis	SNI 2441:2011	≥ 1,0

Sumber: Bina Marga (2018)

3.4.2 Agregat

Agregat adalah bahan dari batuan atau sejenisnya yang digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan perkerasan jalan. Agregat merupakan komponen utama dari struktur perkerasan jalan, yaitu 90-95% agregat berdasarkan persentase berat, atau 75-85% agregat berdasarkan persentase volume. Dengan demikian kualitas perkerasan jalan ditentukan dari sifat agregat dan hasil campuran agregat dengan material lain. (Sukirman, 2003). Pemilihan agregat, campuran agregat dan bahan ikat merupakan komponen yang sangat penting dalam menentukan umur perkerasan. Pemilihan agregat yang tidak tepat dalam campuran perkerasan dapat mengakibatkan kerusakan dini pada perkerasan.

Berdasarkan ukuran butirnya, agregat terbagi menjadi tiga jenis diantaranya sebagai berikut.

1. Agregat kasar, yaitu butiran agregat yang tertahan pada saringan No. 4 (4,75 mm).
2. Agregat halus, yaitu butiran agregat yang terdiri dari pasir atau hasil pengayakan batu pecah yang lolos ayakan pada saringan No.4 (4,75 mm).
3. Bahan pengisi (*filler*), yaitu bagian dari agregat halus yang lolos ayakan saringan No. 200 (0,075 mm) atau yang lolos minimum 75%. Bahan pengisi

dapat berupa debu batu kapur (*limestone dust*), atau debu kapur padam atau debu kapur magnesium atau dolomit yang sesuai dengan spesifikasi, atau semen atau abu terbang tipe C dan F. (Spesifikasi Bina Marga, 2018).

Adapun ketentuan agregat kasar dan agregat halus berdasarkan Spesifikasi Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3. 2 Ketentuan Agregat Kasar

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

Sumber: Bina Marga (2018)

Tabel 3. 3 Ketentuan Agregat Halus

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

Sumber: Bina Marga (2018)

3.5 Gradasi Agregat

Gradasi adalah susunan butir agregat sesuai dengan ukurannya. Ukuran butir agregat diperoleh melalui pengujian analisa saringan dengan menggunakan satu set ayakan. Ayakan berukuran lubang paling besar diletakkan teratas, dan yang paling halus yaitu ayakan No.200, terbawah sebelum pan. Gradasi sangat berpengaruh terhadap kualitas perkerasan secara keseluruhan. Berikut adalah persyaratan gradasi agregat *Stone Matrix Asphalt (SMA)* berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Gradasi Agregat Campuran *SMA*

Ukuran Ayakan		%Berat yang Lolos Terhadap Total Agregat		
ASTM	(mm)	Tipis	Halus	Kasar
1½”	37,5			
1”	25			100
¾”	19		100	90-100
½”	12,5	100	90 -100	50-88
⅜”	9,5	70-95	50-80	25-60
No.4	4,75	30-50	20-35	20-28
No.8	2,36	20-30	16-24	16-24
No.16	1,18	14-21		
No.30	0,600	12-18		
No.50	0,300	10-15		
No.100	0,150			
No.200	0,075	8-12	8-11	8-11

Sumber: Bina Marga (2018)

3.6 Bauksit

Bauksit adalah batuan yang memiliki komposisi berupa mineral – mineral utama dalam pembuatan alumunium seperti *gibsit, buhmit,* dan diaspor. Bauksit banyak ditemukan pada daerah tropis dan curah hujan yang tinggi membuat terjadinya proses laterisasi pembentukan endapan. Unsur kimia dalam bauksit

mirip-mirip dengan unsur yang terkandung dalam *fly ash* atau abu terbang. Berikut ini merupakan senyawa-senyawa kimia yang terkandung dalam bauksit dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Unsur Kimia dalam Bauksit

Parameter	Satuan	%Massa
Silika total	%	18,77
Alumunium	mg/kg	275502
Besi	mg/kg	69619
Kalsium	mg/kg	42043
Magnesium	mg/kg	2893
Kalium	mg/kg	229
Natrium	mg/kg	262
Kadar Air	%	2,68
Kadar Lengas	%	0,76

Sumber: Lisantono, dkk (2018)

3.7 Bahan Aditif

Bahan aditif yang digunakan dapat berupa bubuk atau butiran atau anti pengelupasan. Bahan yang umum digunakan sebagai bahan tambah pada campuran beton aspal yaitu serat selulosa. Serat selulosa berfungsi untuk mencegah terjadinya *bleeding*, dapat meningkatkan kemampuan atau kapasitas campuran, dapat membentuk permukaan kualitas yang lebih baik, serta mampu menstabilkan kadar aspal yang tinggi (Matekohy, dkk 2022).

3.8 Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Menurut SNI 8129:2015 *Stone Matrix Asphalt (SMA)* adalah campuran beraspal panas yang terdiri dari dua bagian, yaitu skeleton agregat kasar dan mortar bahan pengikat aspal pen 60 dengan proporsi tinggi. *Stone Matrix Asphalt (SMA)* merupakan campuran aspal bergradasi senjang yang memiliki kandungan agregat kasar tinggi yaitu lebih dari 70%. Fraksi agregat kasar umumnya yang tertahan pada ayakan 4,75 mm (No. 4) tetapi dapat ditetapkan sebagai ukuran lain.

Anas Tahir (2011) dalam Matekohy, dkk (2022) menyebutkan campuran *SMA* memiliki karakteristik kelenturan atau fleksibilitas, kedap air, kekesatan atau tahan geser, mampu melayani lalu lintas berat dan tahan terhadap panas atau temperatur tinggi. Adapun persyaratan campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* harus memenuhi batas-batas yang ditunjukkan pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 6 Persyaratan Campuran *SMA*

Sifat-sifat campuran		**Persyaratan**	
		SMA	*SMA* Mod
Kadar aspal		6,0 – 7,0	
Jumlah tumbukan per bidang		50	
Rongga dalam campuran (*VIM*), %	Min.	3,0	
	Maks.	5,0	
Rongga dalam agregat (*VMA*), %	Min.	17	
Rasio VCA_{MIX}/VCA_{DRC}		<1	
Draindown pada temperatur produksi, % berat dalam campuran (waktu 1 jam)	Maks.	0,3	
Stabilitas *marshall*, kg	Min.	600	750
Pelelehan, mm	Min.	2	
	Maks.	4,5	
Stabilitas *Marshall* Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 ºC	Min.	90	
Stabilitas dinamis, lintasan/mm	Min.	2500	3000

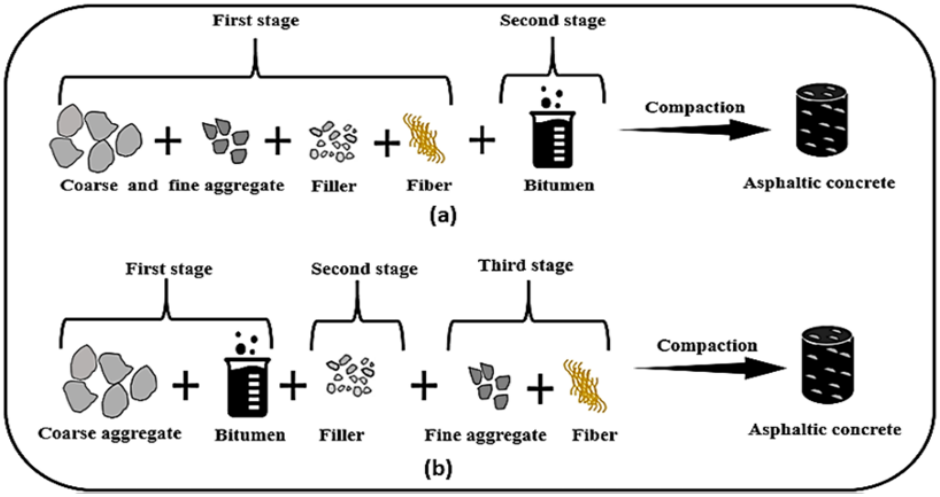
Sumber: Bina Marga (2018)

3.9 Metode Pencampuran Bertahap

Metode pencampuran bertahap merupakan suatu metode yang digunakan untuk membantu meningkatkan kinerja campuran beton aspal. Berdeda dengan metode pencampuran konvensional yang melakukan pencampuran agregat kasar, agregat halus, dan bahan ikat secara bersamaan. Metode pencampuran bertahap dilakukan dengan mencampur agregat kasar dan bahan ikat terlebih dahulu, kemudian disusul agregat halus dan *filler*. Menurut Kok dan Kuloglu (2011),

metode pencampuran bertahap didasarkan pada pelapisan agregat kasar dengan kadar aspal optimum (KAO) sebelum dilakukan pencampuran dengan agregat halus dan bahan pengisi (*filler*). Dalam penelitiannya menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap dapat meningkatkan kinerja campuran lebih baik dibandingkan metode konvensional. Hal ini disebabkan oleh permukaan agregat yang terselimuti aspal dengan baik hingga ke rongga-rongga udara dalam agregat, sehingga campuran aspal memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen dan menurunkan terjadinya pengelupasan agregat yang akibat debu dan kotoran.

Yaro, dkk (2021) menyimpulkan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap mampu meningkatkan kinerja mekanik campuran *SMAC*. Ilustrasi perbandingan proses metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Ilustrasi Proses Metode Pencampuran Konvensional (a) dan Metode Pencampuran Bertahap (b)
(Sumber: Yaro dkk, 2021)

3.10 Karakteristik Pengujian *Marshall*

Pengujian *Marshall* ini awalnya dikembangkan oleh Bruce *Marshall* seorang insinyur aspal dari Mississipi *State Highway Department* yang kemudian disempunakan melalui penelitian-penelitiannya oleh *U.S Corps of Engineer*s. Adapun beberapa parameter pengujian *Marshall* diantaranya adalah stabilitas (*stability*), kelelehan (*flow*), kepadatan (*density*), *VITM (Void in the Total Mix)*,

VMA (Void in Mineral Aggregate), *VFWA (Void Filler with Asphalt)*, dan *Marshall Quotient* (*MQ*).

3.10.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas adalah kemampuan lapisan perkerasan dalam menopang beban lalu lintas tanpa terjadi perubahan deformasi permanen seperti gelombang *(shoving)*, alur *(ruts)*. Semakin tinggi nilai stabilitas menunjukkan kemampuan suatu perkerasan dalam menahan beban lalu lintas yang besar. Namun stabilitas yang tinggi tidak terlalu baik pada perkerasan karena akan menjadi kaku (Sukirman, 2003). Nilai stabilitas dapat diperoleh dari Persamaan 3.1 berikut.

$$q = p \times s \times 0{,}4536 \tag{3.1}$$

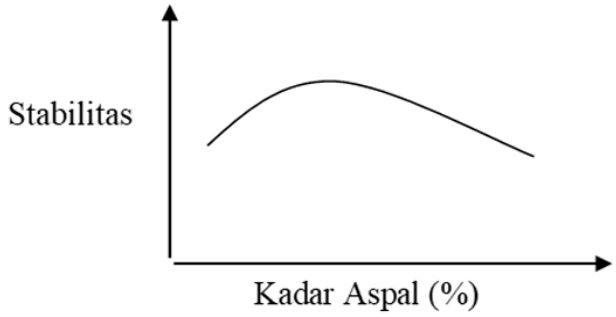
keterangan :

q = Stabilitas (kg),

p = Pembacaan arloji stabiltas x kalibrasi alat

s = Angka koreksi tebal benda uji, dan

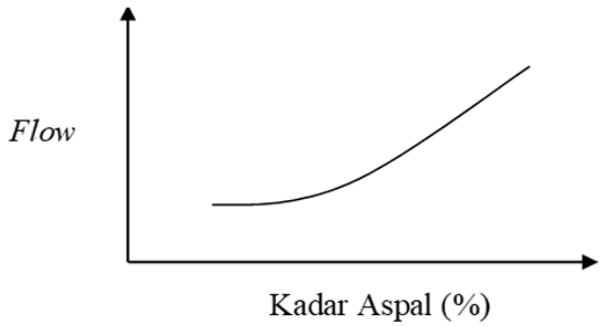
0,4536 = Angka konversi satuan dari *lb* ke kg



Gambar 3. 3 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Stabilitas
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.10.2 Kelelehan (*Flow*)

Kelelehan (*flow*) adalah besarnya deformasi vertikal mulai awal pembebanan hingga batas runtuh yang dinyatakan dalam satuan panjang mm atau 0,01 *inch*. Nilai *flow* dipengaruhi oleh besarnya kadar aspal, gradasi campuran, bentuk agregat, dan temperatur pemadatan. Semakin besar kadar aspal pada campuran akan semakin besar nilai *flow*-nya.



Gambar 3. 4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *Flow*
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.10.3 Kepadatan (*Density*)

Kepadatan *(density*) adalah nilai berat volume yang menunjukkan tingkat kepadatan suatu campuran beton aspal dan dinyatakan dalam satuan g/cc. Nilai *density* juga menunjukkan kerapatan campuran yang telah dipadatkan. Semakin besar nilai *density*, maka kepadatannya semakin baik sehingga mampu menahan beban dengan lebih baik. Nilai *density* dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah suhu pemadatan, komposisi bahan penyusun, kadar *filler*, energi pemadat, dan kadar aspal. Nilai *density* dapat diperoleh dari Persamaan 3.2 dan 3.3 berikut.

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

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

keterangan :

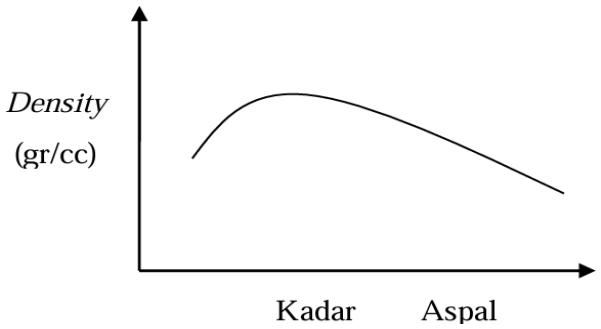
g = nilai kepadatan (*density*) (gr/cc),

c = berat benda uji sebelum direndam (gr),

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

e = berat dalam air (gr), dan

f = volume/isi (cm^3)



Gambar 3. 5 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *Density*
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.10.4 *Voids in Total Mix* (*VITM*)

VITM adalah persentase rongga udara pada suatu campuran diukur terhadap volume total campuran setelah campuran dipadatkan, terdiri atas rongga udara diantara butiran-butiran agregat yang telah diselimuti aspal. *VITM* dibutuhkan sebagai tempat bergesernya butir-butir agregat akibat pemadatan atau sebagai tempat bila aspal menjadi lunak akibat meningkatnya temperatur. Nilai *VITM* harus memenuhi ketentuan rentang minimum dan maksimum, karena hal ini berkaitan dengan tingkat keawetan (durabilitas) perkerasan. Nilai *VITM* dapat diperoleh dari Persamaan 3.4 berikut.

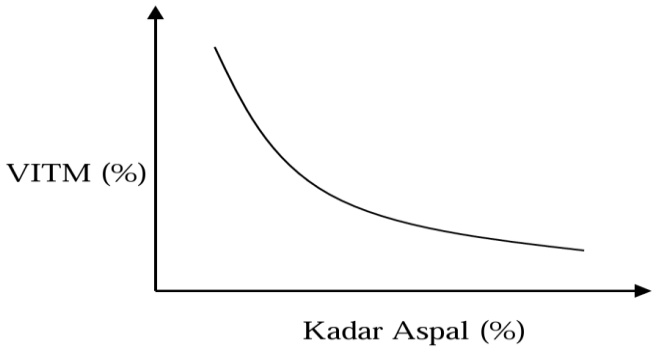
$$VITM = 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm} \quad (3.4)$$

keterangan :

VITM = rongga udara di dalam campuran aspal padat, persen berat total dari campuran,

G_{mm} = berat jenis maksimum campuran aspal (rongga tanpa udara), dan

G_{mb} = berat jenis *bulk* dari beton aspal padat



Gambar 3. 6 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VITM*
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.10.5 *Voids in Mineral Aggregate* (*VMA*)

VMA adalah rongga udara di antara agregat dalam campuran yang telah dipadatkan termasuk rongga yang terisi aspal, dinyatakan dalam persentase rongga terhadap volume total campuran agregat dan aspal. AAHSTO M 325-08 (2012) mengatur nilai minimum *VMA* adalah 17% yang juga dijadikan referensi oleh SNI 8129:2015 . Nilai *VITM* dapat diperoleh dari Persamaan 3.5 berikut.

$$VMA = 100 - \left(\frac{Gmb}{Gsb}\right) Ps \qquad (3.5)$$

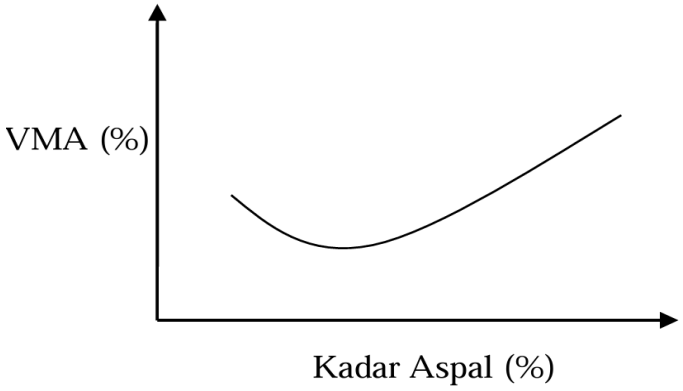
keterangan :

VMA = volume pori antara agregat di dalam beton aspal padat (%),

G_{mb} = berat jenis *bulk* dari aspal beton padat,

G_{sb} = berat jenis *bulk* agregat total,

P_s = persentase berat agregat terhadap berat campuran (%)



Gambar 3. 7 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VMA*
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.10.6 *Voids in Filled with Asphalt* (*VFWA*)

VFWA adalah persen rongga dalam campuran yang terisi aspal setelah melalui proses pemadatan. Aspal dalam rongga tersebut berfungsi menyelimuti agregat. Semakin besar nilai *VFWA* menunjukkan semakin banyak rongga yang terisi aspal, sehingga kekedapan campuran terhadap udara dan air semakin baik. Sebaliknya semakin kecil nilai *VFWA*, kekedapan terhadap air dan udara semakin kecil, sehingga aspal akan mudah teroksidasi dan mempengaruhi stabilitas dan durabilitas. Nilai *VFWA* dapat diperoleh dari Persamaan 3.6 sampai Persamaan 3.10 berikut.

1. Perhitungan persentase aspal terhadap campuran

$$h = \frac{a}{100+a} \times 100 \quad (3.6)$$

keterangan :

a = persentase aspal terhadap batuan (%), dan

b = persentase aspal terhadap campuran (%).

2. Perhitungan persentase aspal terhadap agregat

$$m = 100 \times \frac{i}{j} \quad (3.7)$$

$$i = \frac{b \times g}{Bj\ Aspal} \quad (3.8)$$

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

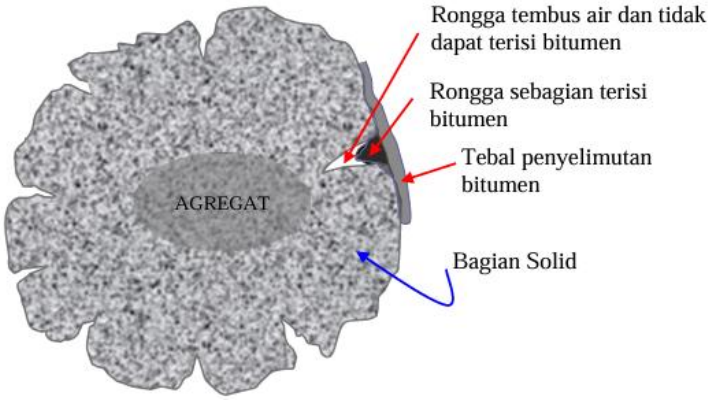
$$j = \left(\frac{(100-b)\times g}{Bj\ Agregat}\right) \quad (3.10)$$

keterangan :

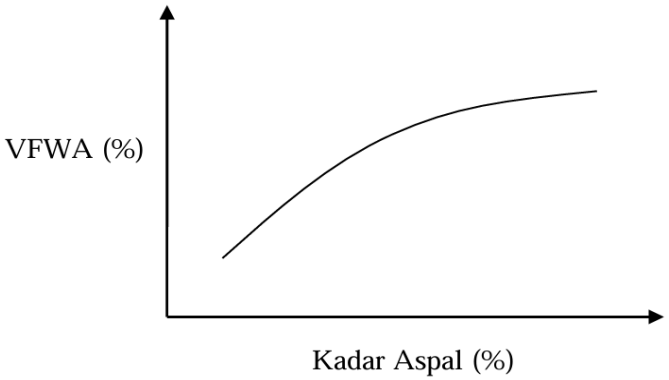
m = nilai *VFWA* (%),

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

b = persentase aspal terhadap campuran.



Gambar 3. 8 Ilustrasi Rongga Agregat yang Terisi Aspal
(Sumber: Subarkah, 2015)



Gambar 3. 9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *VFWA*
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.10.7 *Marshall Quotient* (*MQ*)

Marshall Quotient adalah hasil bagi antara stabilitas dengan *flow*, digunakan sebagai pendekatan untuk mengukur tingkat fleksibilitas suatu campuran. Semakin tinggi nilai *MQ*, maka campuran cenderung kaku dan memiliki nilai fleksibilitas yang rendah, sedangkan jika nilai *MQ* rendah maka campuran tersebut memiliki nilai fleksibilitas yang tinggi, namun cenderung kurang stabil. Nilai *Marshall Quotient* dapat diperoleh dari Persamaan 3.11 berikut.

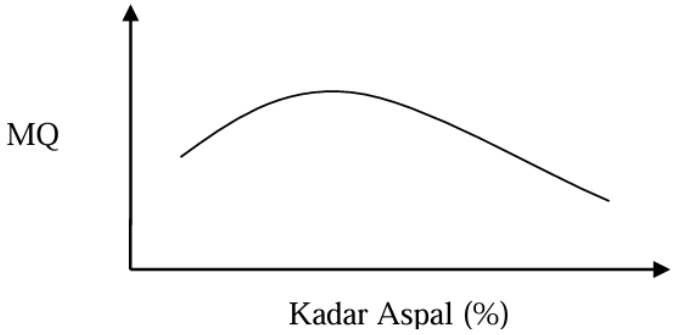
$$MQ = \frac{q}{r} \tag{3.11}$$

keterangan :

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

q = nilai stabilitas (kg), dan

r = nilai *flow* (mm).



Gambar 3. 10 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan *MQ*
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.11 *Voids in Coarse Aggregate (VCA)*

Menurut AASTHO R 46-08 (2012) , *VCA* adalah volume rongga udara diantara partikel agregat kasar. Volume tersebut termasuk bahan pengisi *(filler)*, agregat halus, rongga udara, aspal, dan bahan tambah stabilisasi (jika digunakan). Pada kondisi *stone-on-stone contact* dalam campuran *SMA* , nilai VCA_{mix} harus lebih kecil dari VCA_{drc} atau $VCA_{mix}/VCA_{drc} < 1$. Nilai VCA_{drc} diperoleh dari hasil pemadatan campuran dengan menggunakan teknik *dry-rodded* mengacu pada AASTHO T 19/T19. Nilai VCA_{drc} dapat diperoleh dari Persamaan 3.12 berikut.

$$VCA_{DRC} = \frac{(GCA \times \gamma w) - \gamma s}{GCA \times \gamma w} \times 100 \quad (3.12)$$

keterangan :

VCA_{DRC} = volume rongga fraksi agregat kasar pada kondisi *dry-rodded* (%),

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

γ_w = satuan berat air (kg/m³), dan

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

Adapun untuk nilai VCA_{mix} dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.13 berikut.

$$VCA_{mix} = 100 - (G_{mb}/G_{CA}).\ P_{CA} \quad (3.13)$$

keterangan:

VCA_{mix} = volume rongga antar agregat kasar yang dipadatkan (%),

G_{mb} = berat jenis campuran yang telah dipadatkan,

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

P_{CA} = persentase agregat kasar dalam total campuran (%).

Berikut adalah nilai kepadatan air berdasarkan temperatur yang digunakan saat pemeriksaan VCA_{DRC} dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Kepadatan Air (γw)

Temperatur		Kepadatan Air	
(°C)	(°F)	(kg/m3)	(lb/ft3)
15,6	60	990,01	62,366
18,3	65	998,54	62,336
21,2	70	997,97	62,301
23	73,4	997,54	62,274
23,9	75	997,59	62,261
26,7	80	996,59	62,216
29,4	85	995,83	62,166

Sumber: *AASTHO* (T 19M)

3.12 Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)*

Immersion Test bertujuan untuk mengetahui perubahan karakteristik campuran akibat pengaruh air, suhu, udara, dan cuaca. Berdasarkan AAHSTO T 165-74 atau ASTM D 1075-54 (1969), pengujian ini dibagi dalam 2 kelompok uji, yaitu dilakukan perendaman benda uji dalam *waterbath* pada suhu 60ºC selama 0,5 jam (stabilitas standar), dan direndam pada suhu pada suhu 60ºC selama 24 jam (stabilitas rendaman). Nilai *IRS* dapat diperoleh dari Persamaan 3.14 berikut.

$$Index\ of\ Retained\ Strength = \frac{S2}{S1} \quad (3.14)$$

keterangan:

S_1 = nilai rata – rata stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 0,5 jam (kg),

S_2 = nilai rata – rata stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 24 jam (kg).

3.13 Indeks Durabilitas Pertama (IDP)

Indeks Durabilitas Pertama (IDP) didefinisikan sebagai kelandaian yang berurut dari kurva durabilitas. *IDP* dinyatakan dalam "r", nilai "r" positif menunjukkan adanya penurunan persentase kekuatan pada campuran. Sedangkan nilai "r" negatif menunjukkan adanya kenaikan perentase kekuatan pada campuran. Nilai *IDP* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.15 berikut.

$$\text{IDP (r)} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{Si-(Si+1)}{(t1+1)-ti} \qquad (3.15)$$

keterangan :

r = indeks penurunan stabilitas (%),

S_i = persentase kekuatan sisa pada waktu t_i (%),

S_{i+1} = persentase kekuatan sisa pada waktu t_{i+1} (%), dan

t_i, t_{i+1} = periode perendaman (dimulai dari awal proses perendaman).

3.14 Indeks Durabilitas Kedua (IDK)

Indeks Durabilitas Kedua (IDK) didefinisikan sebagai luasan rata-rata kehilangan kekuatan yang terbentuk antara kurva durabilitas dengan garis S_0 = 100%. IDK menunjukkan kehilangan kekuatan selama 24 jam. Nilai IDK dinyatakan dalam "a", nilai "a" positif menunjukkan adanya kehilangan kekuatan, sedangkan nilai "a" negatif menunjukkan adanya kenaikan kekuatan. Menurut definisinya, nilai a<100 memungkinkan untuk menyatakan persentase kuat tahan yang terisa dalam satu hari (Sa). Nilai Sa dapat dihitung dengan Persamaan 3.16 berikut.

$$Sa = (100 - a) \qquad (3.16)$$

keterangan :

Sa = persen kuat sisa rata-rata satu hari (%), dan

a = nilai IDK (%).

Selanjutnya nilai IDK dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan

3.17 berikut.

$$\text{IDK (a)} = \frac{1}{t_n}\sum_{i=1}^{n} a_1 = \frac{1}{2t_n}\sum_{i=0}^{n-1} (S_i - S_i{}^{+1})[2t_n - (t_i + t_{i+1})] \quad (3.17)$$

keterangan :

a = kehilangan kekuatan rata – rata satu hari (%),

t_n = total waktu perendaman (jam),

S_i = persentase kekuatan yang tersisa pada waktu t_i (%),

S_{i+1} = persentase kekuatan yang tersisa pada waktu t_{i+1} (%), dan

t_i, t_{i+1} = waktu perendaman (dimulai dari awal proses perendaman).

3.15 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*

Indirect Tensile Strength (ITS) adalah suatu metode pengujian untuk mengevaluasi potensi retakan *(fatigue)* dengan mengetahui gaya tarik pada campuran aspal beton. Pengujian *ITS* dilakukan pada pada benda uji berbentuk silinder dengan membebani benda uji sejajar dengan diameter vertikalnya. Umumnya kerusakan terjadi di sepanjang bidang diameter, dan menandai beban maksimum kuat tarik yang dapat ditahan campuran. Nilai *ITS* dapat diperoleh dari Persamaan 3.18 berikut.

$$ITS = \frac{2 \times P\ maks}{\pi \times t \times D} \quad (3.18)$$

keterangan :

ITS = nilai *ITS* (kg/cm²),

P_{maks} = beban maksimum/ puncak (kg),

t = tinggi benda uji (cm) dan,

D = diameter benda uji (cm).

3.16 Pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)*

Pada pengujian *TSR* nilai diperoleh dari perbandingan nilai daya tahan tarik antara campuran setelah dilakukan perendaman selama 24 jam pada *waterbath* dalam suhu 60ºC dengan tanpa perendaman, dinyatakan dalam satuan persen (%). Nilai minimum *TSR* yang disyaratkan dalam SNI 8129:2015 adala harus lebih dari

80% pada *VIM* 6%±1%. Nilai *TSR* dapat diperoleh dari Persamaan 3.19 berikut.

$$TSR = (T_2/T_1) \times 100 \quad (3.19)$$

keterangan :

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

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

3.17 Pengujian *Cantabro Loss*

Pengujian *Cantabro Loss* dilakukan untuk mengetahui ketahanan campuran benda uji terhadap gaya *impact* atau abrasi dengan menggunakan mesin L*os Angeles*. Dalam penerapannya di lapangan, *Cantabro Test* bertujuan untuk mengetahui ketahanan campuran terhadap beban lalu lintas berulang yang menyebabkan lapisan perkerasan mengalami penurunan kualitas. Benda uji ditempatkan di dalam mesin *Los Angeles* dan dilakukan 300 kali putaran dengan kecepatan mesin 30-33 rpm dalam suhu ruangan tanpa bola baja. Setelah mesin selesai berputar, benda uji dikeluarkan dan dilakukan penimbangan terhadap berat benda uji yang hilang setelah abrasi, dinyatakan dalam persentase dari berat benda uji aslinya. Nilai *Cantabro* dapat diperoleh dari Persamaan 3.20 Berikut.

$$CL = \frac{Mo - Mi}{Mo} \times 100\% \quad (3.20)$$

keterangan :

CL = persentase kehilangan berat (%),

M_o = berat sebelum diabrasi (gram), dan

M_i = berat setelah diabrasi (gram).

3.18 Pengujian *Draindown*

Draindown merupakan sebuah metode pengujian campuran aspal yang bertujuan untuk mengetahui nilai kadar aspal maksimum yang tercampur secara homogen dengan agregat tanpa adanya pemisahan aspal. Besarnya pengaliran aspal pada campuran *SMA* disyaratkan lebih kecil dari 0,3% dari berat campuran (AASTHO T305). Nilai *draindown* dapat dihitung dengan menggunakan

Persamaan 3.21 berikut.

$$Draindown = \frac{\mathrm{A-B}}{\mathrm{C}} \times 100\% \quad (3.21)$$

keterangan :

Draindown = nilai *draindown* (%),

A = berat akhir pelat wadah penampung (gr),

B = berat awal pelat wadah penampung (gr), dan

C = berat total awal campuran(gr).

3.19 Pengujian *Index of Cantabro Loss* (*ICL)*

Pengujian *ICL* bertujuan untuk mengetahui persentase ketahanan pada campuran dengan uji keausan akibat pengaruh kelembapan. Pada kondisi basah, sampel direndam dalam air selama 24 jam. Kemudian sampel dikeluarkan dari air, dan didiamkan pada suhu ruangan selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian keausan. Nilai *ICL* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.22 berikut.

$$ICL = \left(1 - \frac{(100 - PD) - (100 - PW)}{100 - PD}\right) \times 100 \quad (3.22)$$

keterangan:

ICL = nilai *ICL* (%),

P_D = kehilangan berat dalam kondisi kering (%),

P_W = kehilangan berat dalam kondisi basah (%).

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Metode penelitian dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu dengan melakukan serangkaian kagiatan percobaan pengamatan untuk memeroleh data. Data yang diperoleh dari hasil percobaan pengamatan selanjutnya dilakukan olah data untuk mendapatkan hasil penelitian, kemudian dibandingkan dengan standar spesifikasi atau persyaratan yang digunakan. Pada penelitian ini, standar spesifikasi dan prosedur penelitian mengacu pada perarturan *Association of State Highway and Transportation Officials* (*AASTHO*), dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2.

4.2 Metode Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sampel dalam penelitian ini menggunakan metode *non-probability sampling* dengan penerapan teknik *purposive sampling*. Metode tersebut mengambil sample tidak dipilih secara acak dan disesuaikan berdasarkan tujuan yang ditentukan pada awal penelitian.

4.3 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data yang dilakukan pada penelitian ini diperoleh dari data primer dan data sekunder. Adapun penjabaran data primer dan data sekunder sebagai berikut.

1. Data primer diperoleh dari serangkaian pemeriksaan dan pengujian di laboratorium. Oleh karena itu, untuk mempermudah pengambilan data, maka dilakukan pengelompokkan benda uji. Dari pengelompokkan tersebut didapatkan berupa nilai karakteristik *Marshall, Indirenct Tensile Strength (ITS),* Indeks Durabilitas Pertama (IDP), Indeks Durabilitas Kedua (IDK), *Index of Retained Strength (IRS), Tensile Strength Ratio (TSR), Cantabro Loss*, dan *Draindown*.

2. Data sekunder sebagai bahan penunjang data primer, diperoleh dari peraturan – peraturan instansi terkait yang berhubungan dengan penelitian ini. Selain itu, data sekunder pada penelitian diperoleh dari hasil penelitian Yuda (2024) tentang *"Pengaruh Abu bauksit sebagai Substitusi Filler terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt".*

4.4 Tahapan Penelitian

Kegiatan penelitian dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Tahapan penelitian ini meliputi persiapan dan pemeriksaan material, persiapan alat, pembutan benda uji hingga melakukan beberapa rangkaian pengujian.

4.4.1 Persiapan dan Pemeriksaan Material

Pemeriksaan material penelitian dilakukan untuk mengetahui kelayakan dari suatu material yang didasarkan pada ketentuan dan spesifikasi yang digunakan. Pemeriksaan ini berpedoman pada perarturan *AASHTO*, SNI, dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Material yang digunakan dalam penelitian campuran *Stone Matrix Asphalt* yaitu agregat, aspal, dan *filler*. Adapun pemeriksaan material sebagai berikut.

1. Pengujian Agregat

   Pengujian yang akan dilakukan dalam pengujian agregat meliputi:

   a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar yang mengacu pada SNI 1969:2016

      Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis semu, berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), dan angka penyerapan air dari agregat kasar.

   b. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus yang mengacu pada SNI 1970:2016

      Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai berat jenis semu, berat jenis curah, berat jenis kering permukaan jenuh (SSD), dan angka penyerapan air dari agregat halus.

c. Pengujian analisa saringan mengacu pada SNI ASTM C136:2012

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan gradasi agregat halus dan kasar dengan menggunakan saringan.

d. Pengujian kelekatan agregat terhadap aspal mengacu pada SNI 2439:2011 atau AASHTO T 182 – 82

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kelekatan agregat oleh aspal. Kelekatan agregat oleh aspal adalah persentase luas permukaan agregat yang tertutup aspal terhadap luas permukaan.

e. Pengujian *sand equivalent* mengacu pada SNI 03-4428-1997

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kadar lumpuran atau debu atau bahan yang mempunyai lempung pada agregat halus.

f. Pengujian keausan agregat (abrasi) dengan mesin *los angeles* mengacu pada SNI 2417:2008

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan ketahanan agregat kasar terhadap keausan dengan menggunakan mesin *los angeles*.

2. Pengujian aspal

Aspal merupakan material pembentuk campuran perkerasan jalan, fungsinya yaitu sebagai bahan pengikat antar agregat pada campuran perkerasan jalan. Pada penelitian ini menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70. Pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kualitas aspal adalah sebagai berikut.

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

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan berat jenis aspal keras yang akan digunakan dengan piknometer. Berat jenis aspal keras adalah perbandingan antara berat aspal dengan berat air suling dengan isi yang sama pada suhu tertentu.

b. Pengujian penetrasi mengacu pada SNI 2456:2011

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

c. Pengujian daktilitas mengacu pada SNI 2432:2011

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sifat kohesi dan nilai kelenturan

aspal yang diukur jarak terpanjang sebelum aspal putus saat antara dua cetakan yang berisi aspal ditarik dengan kecepatan tarik 50mm/menit pada suhu 25ºC.

d. Pengujian kelarutan dalam *Trichloroethylene (TCE)* mengacu pada AASHTO T44-14

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kadar aspal yang larut dalam larutan *TCE* sehingga dapat diketahui nilai kemurnian aspal tersebut.

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

   Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui suhu dari aspal saat terlihat nyala singkat diatas permukaan aspal dan aspal terlihat menyala terbakar sekurang-kurangnya 5 detik pada suatu permukaan aspal.

f. Pengujian titik lembek mengacu pada SNI 2434:2011

   Pengujian ini bertujuan untuk menentukan titik lembek aspal dengan suhu berkisar antara 30 ºC sampai 200 ºC.

3. Pengujian *Filler*

   Filler yang digunakan yaitu abu bauksit. Bahan yang digunakan adalah yang lolos saringan no.30 dan paling sedikit 65% lolos saringan no. 200 (0,075 mm).

4.4.2 Persiapan Alat

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

1. Seperangkat alat pengujian agregat, seperti satu set analisa saringan, mesin *los angeles*, tabung *sand equivalent*, dan *vibrator*.
2. Seperangkat alat pengujian aspal, seperti alat uji daktilitas, penetrasi, kelarutan aspal, titik nyala, titik bakar, dan titik lembek.
3. Cetakan benda uji (*mold*) dengan diameter 10 cm dan tinggi 7,5 cm.
4. Alat pengujian *marshall*, sebagai berikut.
   a. Kepala penekan berbentuk lengkung (*breaking head*).
   b. Cincin penguji berkapasitas 2500 kg dengan ketelitian 12,5 kg, dilengkapi arloji tekan dengan ketelitian 0,0025 cm.

c. Arloji penunjuk *flow* dengan ketelitian 0,25 mm (0,01") beserta kelengkapannya.

5. *Compactor*, alat penumbuk benda uji permukaan tumbukan rata berbentuk silinder dengan berat 4,536 kg dan tinggu jatuhan beban 45,7 cm.
6. *Ejector*, alat untuk mengeluarkan benda uji yang telah dipadatkan dari cetakan.
7. Bak perendam *(waterbath)* yang dilengkapi pengatur suhu minimum 20°C, digunakan untuk merendam benda uji sebelum dilakukan pengujian.
8. *Oven,* alat untuk memanaskan benda uji dengan pengatur suhu sampai (200 ±3)°C.
9. Timbangan berkapasitas 2 kg dengan ketelitian 0,1 gram dan timbangan 5 kg dengan ketelitian 1 gram yang dilengkapi penggantung.
10. Alat pelengkap lainnya seperti sarung tangan karet, kompor, spatula, *thermometer*, wajan, gelas ukur, nampan, bak plastik, panci, kain lap, jangka sorong, dan lain sebagainya.
11. Alat uji *ITS* dan *TSR* yang meliputi sebagai berikut.
    a. Alat ukur tekan (*strip loading*) dengan lebar 0,5 inch.
    b. Arloji pengukur stabilitas dan *flow* dengan ketelitian 0,25 mm.
12. Alat pengujian VCA_{DRC}
    a. Timbangan kapasitas > 5 kg dengan ketelitian 1 gram.
    b. Silinder takaran dengan diameter 150 mm dengan tinggi 159 mm.
    c. *Tamping rod* berdiameter 16 mm dengan panjang 600 mm.
    d. *Oven* untuk memanaskan agregat serta *thermometer*.
13. 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 inch).
    d. Piring alumunium kecil sebagai alas penampung lelehan *mastic* atau aspal.

4.4.3 Perencanaan Campuran

Perencanaan campuran dilakukan berdasarkan jenis perkerasan yang digunakan. Penelitian ini menggunakan campuran perkerasan bergradasi *SMA*

dengan mengacu pada persyaratan SNI 8129:2015 sebagai berikut.

1. Menentukan komposisi agregat.
2. Menentukan variasi kadar aspal pada campuran dengan perhitungan Pb.
3. Melakukan pembuatan benda uji yang dipadatkan dengan menggunakan alat pemadat *marshall* dengan 2 x 50 tumbukan.
4. Menentukan nilai KAO berdasarkan kriteria parameter berikut.
   a. Kadar aspal dengan syarat minimum 6% dan maksimum 7%.
   b. *VIM* dengan syarat minimum 4% dan maksimum 5%.
   c. *VMA* dengan syarat minimum 17%.
   d. Stabilitas *marshall* campuran dengan syarat minimum 600 kg.
   e. Pelelehan (*flow*) campuran dengan syarat minimum 2 mm dan maksimum 4,5 mm.

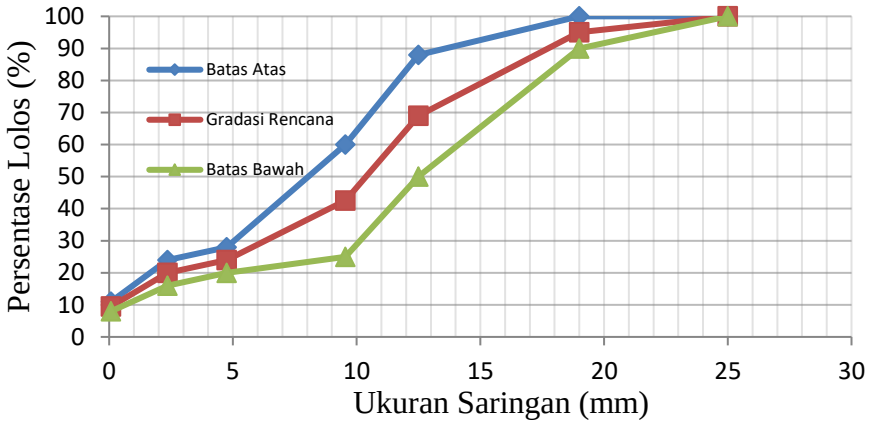
Perencanaan gradasi agregat yang digunakan pada campuran *SMA* dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Gradasi Agregat Gabungan Campuran *SMA* 25 mm

Ukuran Ayakan		Spesifikasi (%)		Jumlah Persen (%)	
Inchi	(mm)	Min	Maks	Lolos	Tertahan
1”	25	100		100	0
¾”	19	90	100	95	5
½”	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	0	100

Sumber: Bina Marga (2018)

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat dibuat grafik gradasi rencana campuran *SMA* yang dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Rencana Campuran *SMA*

Setelah dilakukan perencanaan gradasi agregat, selanjutnya mencari kadar aspal optimum rencana dapat dihitung dengan menggunakan yang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.1 berikut.

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

keterangan :

Pb = kadar aspal,

CA = persen agregat kasar tertahan saringan No. 4,

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

Filler = persen agregat halus lolos saringan No. 200, dan

K = konstanta 1-2.

Berdasarkan Tabel 4.1, maka didapatkan CA = 76%, FA = 14,5%, *Filler* = 9,5% dan nilai konstanta yang digunakan adalah 1,5. Selanjutnya dihitung menggunakan Persamaan 4.1 untuk mencari kadar aspal optimum adalah sebagai berikut.

Pb = 0,035 (%*CA*) + 0,045 (%*FA*) + 0,18 (%*Filler*) + K

= 0,035 (76%) + 0,045 (14,5%) + 0,18 (9,5%) + 1,5

= 6,522 % ≈ 6,5%

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, didapatkan nilai kadar aspal perkiraan (Pb) adalah 6,5%. Maka hasil tersebut sudah sesuai dengan persyaratan

SNI 8129:2015 pada kadar aspal minimum untuk campuran *SMA* adalah 6%. Pada pengujian untuk mencari nilai kadar aspal optimum (KAO), digunakan variasi kadar aspal 5,5%, 6%, 6,5%, 7%, dan 7,5% terhadap berat total campuran. Kadar bahan tambah pada setiap benda uji adalah 0,3% terhadap berat total campuran. Kadar substitusi *filler* abu bauksit yaitu menggunakan variasi 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% terhadap berat total *filler*. Setiap campuran benda uji memiliki berat total sebesar 1200 gram dengan menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70.

Adapun kebutuhan agregat pada tiap-tiap kadar aspal dapat dilihat pada Tabel 4.2 sampai Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 2 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
Jumlah						1134,00	

Tabel 4. 3 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	0
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,40	56,40

Lanjutan Tabel 4.3 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6 %

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
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
Jumlah						1128,00	

Tabel 4. 4 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
Jumlah						1122,00	

Tabel 4. 5 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

Lanjutan Tabel 4.5 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7 %

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (Gr)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
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						1116,00	

Tabel 4. 6 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7,5 %

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	55,50	55,50
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	288,60	344,10
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	294,15	638,25
# 4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	205,35	843,60
# 8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	44,40	888,00
# 200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	116,55	1004,55
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	105,45	1110,00
Jumlah						1110,00	

Selanjutnya, dilakukan pembuatan benda uji untuk memperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada metode pencampuran bertahap. Jumlah benda uji yang digunakan untuk memperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dapat dilihat pada Tabel 4.12 berikut.

Tabel 4. 7 Jumlah Benda Uji untuk Mencari Nilai KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap

Pengujian	Kadar Aspal (%)				
	5,5	6	6,5	7	7,5
Marshall	3	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3	3
Draindown	3	3	3	3	3
Jumlah Benda Uji	9	9	9	9	9
Total Keseluruhan	45 buah				

Setelah mendapatkan nilai KAO, maka dilakukan pengujian menggunakan metode pencampuran bertahap pada masing – masing variasi kadar substitusi *filler* abu bauksit. Adapun jumlah benda uji dalam setiap metode pengujian pada KAO dapat dilihat pada Tabel 4.13 berikut.

Tabel 4. 8 Jumlah Benda Uji Setiap Pengujian Menggunakan Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Metode Pencampuran Bertahap

Pengujian	Kadar Substitusi *Filler* (%)				
	0	25	50	75	100
Marshall	3	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3	3
ITS	3	3	3	3	3
TSR	3	3	3	3	3
Cantabro Loss	3	3	3	3	3
Draindown	3	3	3	3	3
Jumlah Benda Uji	18	18	18	18	18
Total Keseluruhan	90 buah				

Berdasarkan Tabel 4.10 dan 4.11, jumlah benda uji keseluruhan yang dibutuhkan pada penelitian ini berjumlah 135 buah yang terperinci dalam benda uji

untuk mencari nilai KAO berjumlah 45 buah dan benda uji dalam kondisi KAO berjumlah 90 buah.

4.4.4 Pembuatan Campuran Benda Uji

Proses pembuatan campuran benda uji dilakukan setelah melakukan perencanaan campuran benda uji. Perencanaan campuran benda uji meliputi kegiatan penyaringan agregat dengan menggunakan mesin penyaring (*sieve shaker machine*) yang bertujuan untuk memisahkan butiran agregat sesuai dengan nomor saringan, kemudian ditimbang berdasarkan kebutuhan tiap kadar aspal. Adapun langkah-langkah pembuatan campuran benda uji adalah sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Memanasakan aspal pada suhu tertentu.
   Penelitian ini menggunakan aspal Penetrasi 60/70 yang dipanaskan pada suhu mencapai 160 – 170 °C.
3. Memanaskan agregat, *filler*, dan bahan tambah sampai suhu 170°C. Kemudian mencampurkan kadar aspal sesuai dengan persentase yang telah direncanakan dan mengaduknya sampai homogen.
4. Membersihkan cetakan benda uji dan mengolesi bagian dalam cetakan menggunakan oli.
5. Meletakkan kertas yang telah disesuaikan ukurannya dengan ukuran cetakan pada bagian bawah. Kemudian memasukkan campuran benda uji yang telah homogen sebanyak 1/3 bagian dari volume cetakan, dan ditusuk-tusuk dengan menggunakan spatula sebanyak 25 kali. Pada cara yang sama, benda uji dimasukkan sampai memenuhi bagian cetakan kemudia meletakkan kembali kertas di bagian atas.
6. Meletakkan cetakan yang telah terisi benda uji di atas mesin pemadat, kemudian mengatur jumlah tumbukan pada mesin pemadat sebanyak 50 kali tumbukan di sisi pertama dan kedua.
7. Setelah pemadatan selesai, benda uji dikeluarkan dari mesin pemadat dan didiamkan sampai suhu tidak terlalu panas.
8. Mengeluarkan benda uji dari cetakan dengan menggunakan *ejector hydraulic pump*, kemudian mendiamkan benda uji dan mengambil kertas pada kedua sisi.

4.4.5 Pengujian *Marshall*

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

1. Menyiapkan alat dan benda uji yang akan digunakan pada pengujian *Marshall*.
2. Membersihkan benda uji dari kotoran yang 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 ujia pada air suhu ruang selama 20 – 24 jam untuk mendapatkan kejenuhan, kemudian menimbang benda uji di dalam air dan mencatat hasilnya.
5. Mengelap benda uji yang telah ditimbang kedalam air dengan menggunakan kain lap sampai mencapai kondisi SSD, kemudian menimbang kembali benda uji dalam keadaan SSD.
6. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 30 menit.
7. Melakukan pemeriksaan terhadap mesin *Marshall* berserta dial perlengkapannya 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* di posisi angka nol.
10. Menghidupkan mesin dan mengamati pembebanan yang terjadi sampai dial stabilitas mencapai angka maksimum.
11. Mencatat hasil pembacaan dari dial stabilitas dan *flow*.
12. Mengulangi langkah ke-2 sampai ke-11 untuk benda uji selanjutnya.

4.4.6 Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)*

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

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian *ITS*.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan campuran 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.
5. Mengulangi langkah ke-3 dan ke-4 untuk pengujian benda uji selanjutnya.

4.4.7 Pengujian *Tensile Strength Ratio (TSR)*

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

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian *TSR*.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan campuran menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *Marshall*.
3. Melakukan perendaman terhadap benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam, kemudian benda uji didiamkan selama 24 jam pada suhu ruangan.
4. Meletakkan benda uji pada mesin *TSR*.
5. Menyalakan mesin uji dan mengamati pembacaan dial serta mencatat hasilnya.
6. Mengulangi langkah ke-3 dan ke-4 untuk pengujian benda uji selanjutnya.

4.4.8 Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)*

Pengujian *IRS* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian *IRS*.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan campuran menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *Marshall*.
3. Melakukan perendaman terhadap benda uji dalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 24 jam.
4. Malakukan serangkaian pengujian *Marshall* seperti pada Sub bab 4.4.5.

4.4.9 Pengujian *Cantabro Loss*

Pengujian *Cantabro* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian *Cantabro*.
2. Membuat benda uji sesuai dengan perencanaan campuran menggunakan nilai KAO yang telah diperoleh dari hasil pengujian *Marshall*.
3. Menimbang benda uji setelah dilakukan pemadatan (M_O).
4. Memasukkan benda uji ke dalam mesin *Los Angeles* tanpa disertai bola baja.
5. Melakukan pengaturan pemutaran mesin dengan kecepatan 30-33 rpm sebanyak 300 kali putaran.
6. Mengeluarkan benda uji dari mesin *Los Angeles*, kemudian menimbang berat benda uji setelah abrasi (M_i).

4.4.10 Pengujian *Draindown*

Pengujian *draindown* dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian *AFD*.
2. Melapisi nampan dengan menggunakan *alumunium foil* dan menimbang beratnya.
3. Memasak benda uji seperti pembuatan benda uji *Marshall*.
4. Menuang dan meratakan campuran yang sudah dimasak ke dalam nampan, kemudian menimbang beratnya.
5. Memasukkan benda uji ke dalam oven dengan temperatur 160°C selama 1 jam.
6. Mengeluarkan benda uji, kemudian menimbang berat nampan dengan sisa aspal yang menempel di atasnya.

4.4.11 Pengujian *Voids in Coarse Aggregate (VCA)*

Langkah-langkah pengujian *VCA* sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam pengujian *VCA*.
2. Mengukur dimensi *mold*.
3. Menimbang berat *mold*.
4. Memasukkan agregat kasar per 1/3 bagian hingga *mold* terisi penuh, kemudian ditusuk secara merata per bagiannya sebanyak 25 kali dengan

menggunakan *tamping-rod*.

5. Menimbang benda uji beserta *mold*, kemudian melakukan perhitungan VCA_{DRC} dan VCA_{MIX}.

4.5 Analisis Data

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

4.5.1 Analisis Karakteristik *Marshall*

Parameter hasil pengujian *Marshall* diperoleh data sebagai berikut.

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

Karekteristik *Marshall* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

1. Berat jenis aspal

   Adapun berat jenis aspal dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.2 berikut.

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

   dengan :

   A = berat piknometer dengan penutup (gram),

   B = berat piknometer berisi air (gram),

   C = berat piknometer berisi aspal (gram), dan

   D = berat piknomerer berisi air dan aspal (gram).

2. Berat jenis agregat

   Adapun berat jenis agregat dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.3 berikut.

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

dengan :

A = persentase agregat kasar (%),

B = persentase agregat halus (%),

F_1 = berat jenis agregat kasar, dan

F_2 = berat jenis agregat halus.

3. Nilai *stability* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.1
4. Nilai *flow* dapat diperoleh dari hasil pembacaan dial *flow*
5. Nilai *density* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.2 dan 3.3.
6. Nilai *VITM* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.4.
7. Nilai *VMA* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.5.
8. Nilai *VFWA* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.6 sampai 3.10.
9. Nilai *MQ* dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.11.

4.5.2 Analisis Pengujian *VCA*

Nilai *VCA* dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.12 dan 3.13.

4.5.3 Analisis Pengujian *IRS*

Nilai *IRS* dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.14.

4.5.4 Analisis nilai IDP

Nilai IDP dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.15

4.5.5 Analisis nilai IDK

Nilai IDK dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.16 dan 3.17.

4.5.6 Analisis Pengujian *ITS*

Nilai *ITS* dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.18.

4.5.7 Analisis Pengujian *TSR*

Nilai *TSR* dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.19.

4.5.8 Analisis Pengujian *Cantabro*

Nilai *Cantabro* dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.20.

4.5.9 Analisis Pengujian *Draindown*

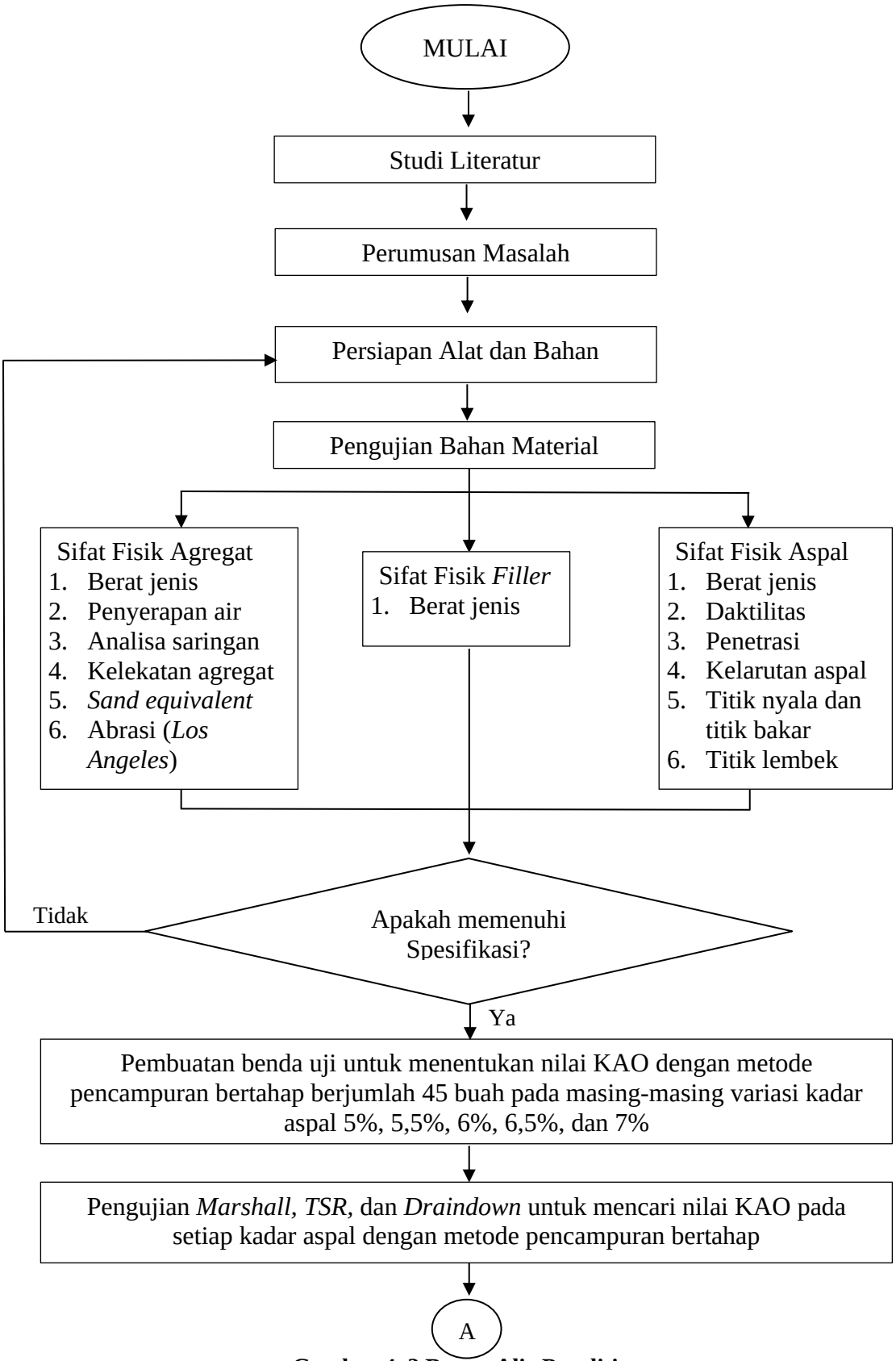
Nilai *draindown* dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.21.

4.5.10 Analisis Pengujian *ICL*

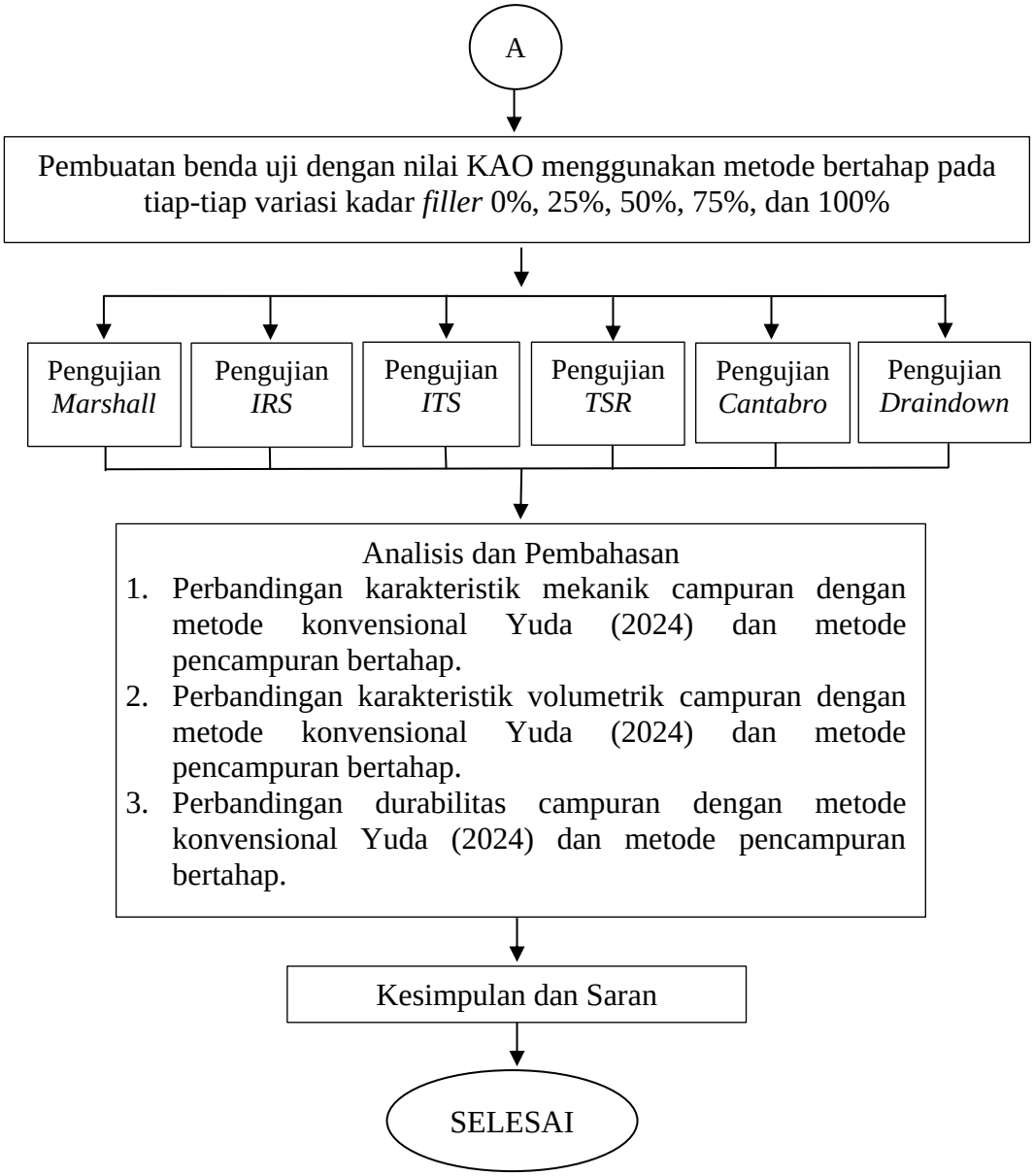
Nilai *ICL* dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.22.

4.6 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian merupakan representasi visual yang menunjukkan tahapan dari suatu penelitian dari awal hingga akhir yang dilakukan secara lebih singkat dan jelas. Bagan alir dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut



Gambar 4. 2 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4.3 Bagan Alir Penelitian

BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan terhadap campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dengan menggunakan perbandingan dua metode yaitu metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap, maka diperoleh hasil dari setiap pengujian sebagai berikut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Pengujian karakteristik aspal dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pengujian ini menggunakan aspal Pen 60/70, dan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Berikut adalah rekapitulasi hasil pengujian karekteristik aspal yang disajikan dalam Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis	≥ 1,0	1,047	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	60-70	65,50	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	≥ 100	165	Memenuhi
4	Titik Lembek (ºC)	≥ 48	48	Memenuhi
5	Titik Nyala (ºC)	≥ 232	270	Memenuhi
6	Titik Bakar (ºC)	≥ 232	290	Memenuhi
7	Kelarutan pada TCE (%)	≥ 99	99,43	Memenuhi

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian karakteristik agregat meliputi pengujian agregat kasar, agregat halus, dan *filler*. Pengujian ini menggunakan agregat yang berasal dari Sungai *Cl*ereng, Kabupaten Kulon Progo, Yogyakarta dan dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas

Islam Indonesia. Data yang dihasilkan dari pengujian ini berpedoman pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Yuda (2024) melakukan penelitian dengan menggunakan *filler* dan campuran yang sama dengan metode pencampuran konvensional. Hasil dari pengujian karakteristik agregat dan *filler* dapat dilihat pada Tabel 5.2 sampai Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis	≥ 2,5	2,61	Memenuhi
2	Penyerapan Agregat terhadap Air (%)	≤ 3	1,88	Memenuhi
3	Kelekatan agregat Terhadap Aspal (%)	≥ 95	96,5	Memenuhi
4	Keausan Agregat dengan Mesin *Los Angeles* (%)	≤ 40	12,9	Memenuhi

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis	≥ 2,5	2,55	Memenuhi
2	Penyerapan Agregat terhadap Air (%)	≤ 3	1,49	Memenuhi
3	*Sand Equivalent* (%)	≥ 50	91,30	Memenuhi

Tabel 5. 4 Pengujian Berat Jenis *Filler*

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Jenis Abu Batu	≥ 2,5	2,541	Memenuhi
2	Berat Jenis Abu Bauksit	≥ 2,5	2,510	Memenuhi

5.1.3 Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) Menggunakan Metode pencampuran bertahap

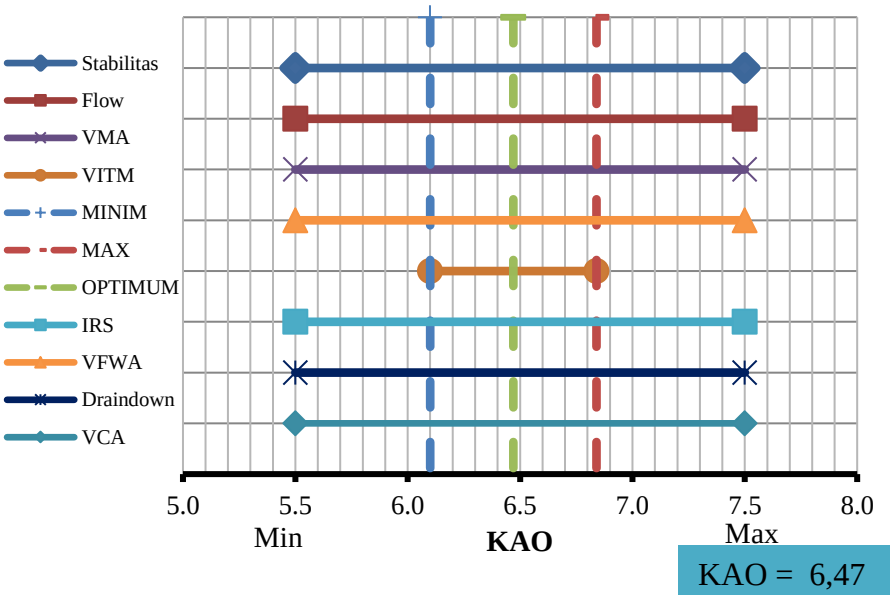
Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran *SMA.* Data tersebut diperoleh dari hasil pengujian stabilitas, *flow*, *VMA*, *VITM*, *VFWA*, *IRS*, dan *Draindown*. Rekapitulasi hasil pengujian untuk

memperoleh nilai KAO dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian untuk Memperoleh Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan Metode Pencampuran Bertahap

Kadar Aspal (%)	Stabilitas (Kg)	*Flow* (mm)	*VMA* (%)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*VCA* (%)	*IRS* (%)	*Draindown* (%)
5,5	697,97	3,09	17,46	5,54	68,31	0,743	90,52	0,01
6	721,54	3,20	18,18	5,23	71,25	0,740	91,21	0,03
6,5	732,83	3,78	18,17	4,06	77,71	0,737	92,17	0,05
7	747,57	4,07	17,93	2,61	85,90	0,732	95,40	0,11
7,5	685,23	4,48	18,84	2,51	86,77	0,727	97,73	0,21
Spek.	> 600	2-4,5	> 17	3-5	-	< 1	> 90	< 0,3

Berdasarkan Tabel 5.5, dilakukan perhitungan secara grafis yang dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5. 1 Grafik Penentuan Nilai KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap

Berdasarkan Gambar 5.1, maka Kadar Aspal Optimum (KAO) di rentang kadar aspal antara 5,5% sampai 7,5% berada pada 6,47% dari grafik penentuan nilai KAO, selisih sedikit dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Yuda (2024) yang mendapatkan KAO sebesar 6,5% dengan Metode Konvensional. Untuk memudahkan pelaksanaan di lapangan, maka KAO pada campuran *SMA* yang digunakan untuk penelitian ini yaitu 6,5% dari berat total campuran, sehingga KAO yang digunakan sama dengan penelitian Yuda (2024). Selanjutnya untuk mendapatkan perbandingan berat volume pada masing-masing *filler*, maka diperlukan pengujian berat jenis *filler*.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Yuda (2024), didapatkan hasil pengujian berat jenis *filler* debu batu sebesar 2,541 gr/cm³ dan berat jenis abu bauksit sebesar 2,510 gr/cm³.

5.1.4 Hasil Pengujian Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* pada Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan Metode Pencampuran Bertahap

Pengujian campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* substitusi *filler* abu bauksit pada KAO dilakukan dengan menggunakan metode pencampuran bertahap. Hasil pengujian ini meliputi pengujian *Marshall*, *VCA*, *Draindown*, *IRS*, IDP, IDK, *ITS*, *TSR*, dan *Cantabro Loss* dapat dilihat pada Tabel 5.6 sampai Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5. 6 *Marshall Test* dengan Metode Pencampuran Bertahap

Kadar Substitusi *Filler* (%)	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	*VITM* (%)	*VFWA* (%)	*VMA* (%)	*MQ* (kg/mm)	*Density* (gr/cc)
0	867,863	3,120	3,161	81,851	17,403	278,195	2,294
25	917,484	2,817	3,468	80,366	17,661	325,790	2,286
50	931,014	2,765	3,676	79,387	17,836	332,572	2,281
75	955,713	2,715	3,909	78,321	18,031	358,199	2,275
100	1019,427	2,625	4,013	77,850	18,116	384,841	2,272
Spesifikasi	> 600	2-4,5	3-5		> 17		

Tabel 5. 7 *Voids in Coarse Aggregate (VCA)* dengan Metode Pencampuran Bertahap

Kadar *Filler* (%)	*VCAMIX/VCAdrc* < 1
0	0,716
25	0,722
50	0,725
75	0,730
100	0,732

Tabel 5. 8 *Index of Retained Strength (IRS)*, Indeks Durabilitas Pertama dan Indeks Durabilitas Kedua dengan Metode Pencampuran Bertahap

Kadar *Filler* (%)	IDP (%)	IDK (%)	*IRS* (%)
0	0,238	2,739	94,52
25	0,178	2,045	95,91
50	0,074	0,847	98,31
75	0,050	0,577	98,85
100	0,031	0,360	99,28
Spesifikasi	-	-	> 90

Tabel 5. 9 *Indirect Tensile Strength (ITS)* dan *Tensile Strength Ratio (TSR)* dengan Metode Pencampuran Bertahap

Kadar *Filler* (%)	*ITS Unconditioned* (Kpa)	*ITS Conditioned* (Kpa)	*TSR* (%)
0	766,032	715,917	93,458
25	829,310	778,503	93,874
50	871,007	832,908	95,626
75	946,010	910,344	96,230
100	1015,103	989,060	97,434
Spesifikasi	-	-	> 80

Tabel 5. 10 *Cantabro Loss* dengan Metode Pencampuran Bertahap

Kadar *Filler* (%)	*Cantabro Loss* Tanpa Rendaman (%)	*Cantabro Loss* Rendaman 24 jam (%)
0	15,24	16,57
25	13,58	14,98
50	12,50	13,13
75	12,16	12,69
100	8,87	10,80
Spesifikasi	< 20	

Tabel 5. 11 *Draindown* dengan Metode Pencampuran Bertahap

Kadar *Filler* (%)	*Draindown* (%)
0	0,13
25	0,12
50	0,10
75	0,08
100	0,06
Spesifikasi	< 0,3

5.2 Pembahasan

Hasil pengujian yang telah dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia akan dibahas secara rinci sebagai berikut.

5.2.1 Hasil Pengujian Karakteristik Aspal

Bahan ikat yang digunakan dalam penelitian ini adalah aspal pertamina Pen 60/70 yang mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Berikut adalah pembahasan hasil pengujian karakteristik aspal.

1. Berat Jenis

   Berat jenis diperoleh dari perbandingan massa aspal dengan massa air pada volume dan temperatur tertentu. Diperoleh hasil dari pengujian ini sebesar 1,047. Hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018

Revisi 2 yaitu > 1,00.

2. Penetrasi Aspal

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan aspal yang dinyatakan dalam masuknya jarum dengan beban dan waktu tertentu ke dalam aspal pada termperatur tertentu. Pengujian ini memperoleh angka penetrasi sebesar 65,50 mm, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 pada aspal Pen 60/70 yaitu 60 – 70 mm.

3. Daktilitas Aspal

Pengujian daktilitas aspal dimaksudkan untuk mengetahui sifat kohesi dalam aspal. Aspal dengan nilai daktilitas lebih tinggi dapat mengikat agregat lebih baik, tetapi lebih rentan terhadap fluktuasi suhu. Hasil pengujian daktilitas aspal diperoleh sebesar 165 cm, dan sudah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu > 100 cm.

4. Kelarutan dalam *Trichloroethylene* (*TCE*)

Nilai yang diperoleh dari pengujian kelarutan ini merupakan persentase dari jumlah kadar aspal yang larut dalam cairan *TCE*. Persentase dari hasil pengujian tersebut didapatkan sebesar 99,43%, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 pada pengujian Kelarutan dalam *TCE* aspal Pen 60/70 yakni ≥ 99%.

5. Titik Lembek

Pengujian ini menunjukkan bahwa aspal cenderung melunak saat mengalami kenaikan suhu. Hasil dari pengujian diperoleh nilai sebesar 48 ºC, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 48 ºC.

6. Titik Nyala

Titik nyala aspal merupakan suhu yang terlihat menyala singkat di suatu titik di atas permukaan aspal. Pada pengujian ini, didapatkan nilai titik nyala pada aspal sebesar 270 ºC. Hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 pada pengujian titik nyala yaitu ≥ 232 ºC.

7. Titik Bakar

Titik bakar merupakan suatu kondisi ketika aspal mulai memunculkan

percikan api yang terlihat menyala sekurang-kurangnya 5 detik pada permukaan aspal. Pada pengujian ini, didapatkan nilai titik nyala pada aspal sebesar 290 ºC. Hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 pada pengujian titik nyala yaitu ≥ 232 ºC.

5.2.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui sifat fisik dan karakteristik pada agregat kasar. Agregat kasar yang digunakan berasal dari *Cl*ereng, Kulon Progo yang disediakan oleh Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Berikut adalah pembahasan hasil pengujian karakteristik agregat kasar.

1. Berat Jenis Agregat Kasar

   Berat jenis agregat kasar diperoleh dari rasio antara berat volume agregat terhadap berat volume air pada suhu tertentu. Data yang dicari pada pemeriksaan berat jenis agregat kasar ini adalah berat jenis (*bulk*), berat jenis kering permukaan jenuh (*SSD*), dan berat jenis semu (*Apparent Specific Gravity*), serta penyerapannya. Diperoleh hasil dari pemeriksaan berat jenis agregat kasar sebesar 2,61. Hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Kasar

   Penyerapan air oleh agregat bertujuan untuk mengetahui persentase berat air yang dapat diserap oleh pori-pori di dalam agregat pada kondisi berat kering agregat. Pemeriksaan ini menghasilkan persentase penyerapan air sebesar 1,88%, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≤ 2%.

3. Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

   Kelekatan agregat terhadap aspal adalah perbandingan luas permukaan agregat yang terselimuti aspal terhadap keseluruhan luas permukaan agregat. Pemeriksaan ini bertujuan untuk menentukan kelekatan agregat terhadap aspal. Hasil dari pemeriksaan ini diperoleh persentase kelekatan agregat oleh aspal sebesar 96,5%, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 95%.

4. Keausan Agregat dengan Mesin *Los Angeles*

   Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui ketahanan agregat kasar terhadap abrasi dengan menggunakan mesin *Los Angeles*. Nilai keausan diperoleh dari perbandingan antara berat semula agregat dengan berat bahan aus lewat saringan No.12, dan dinyatakan dalam persen. Pada pengujian ini, diperoleh persentase keausan agregat sebesar 12,9%, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≤ 30%.

5.2.3 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat Halus

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui sifat fisik dan karakteristik pada agregat halus. Agregat halus yang digunakan berasal dari *Cl*ereng, Kulon Progo yang disediakan oleh Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Berikut adalah pembahasan hasil pengujian karakteristik agregat halus.

1. Berat Jenis Agregat Halus

   Berat jenis agregat halus diperoleh dari rasio antara berat volume agregat terhadap berat volume air pada suhu tertentu. Data yang dicari pada pemeriksaan berat jenis agregat halus ini adalah berat jenis (*bulk*), berat jenis kering permukaan jenuh (*SSD*), dan berat jenis semu (*Apparent Specific Gravity*), serta penyerapannya. Diperoleh hasil dari pemeriksaan berat jenis agregat halus sebesar 2,55. Hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Halus

   Penyerapan air oleh agregat bertujuan untuk mengetahui persentase berat air yang dapat diserap oleh pori-pori di dalam agregat pada kondisi berat kering agregat. Pemeriksaan ini menghasilkan persentase penyerapan air sebesar oleh agregat halus 1,49%, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≤ 2%.

3. *Sand Equivalent*

   Nilai *sand equivalent* menunjukkan persentase kadar debu atau lumpur yang terkandung di dalam agregat halus. Pada pengujian ini, diperoleh nilai *sand equivalent* sebesar 91,30%, hasil tersebut telah memenuhi spesifikasi syarat

Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 50%.

5.2.4 Hasil Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*)

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui sifat fisik dan karakteristik pada bahan pengisi (*filler*). Berikut adalah pembahasan hasil pengujian karakteristik bahan pengisi.

1. Berat Jenis Debu Batu

   Berat jenis diperoleh dari rasio antara berat volume agregat terhadap berat volume air pada suhu tertentu. Diperoleh hasil dari pemeriksaan berat jenis *filler* debu batu sebesar 2,541.

2. Berat Jenis Abu bauksit

   Berat jenis diperoleh dari rasio antara berat volume agregat terhadap berat volume air pada suhu tertentu. Diperoleh hasil dari pemeriksaan berat jenis *filler* debu batu sebesar 2,510.

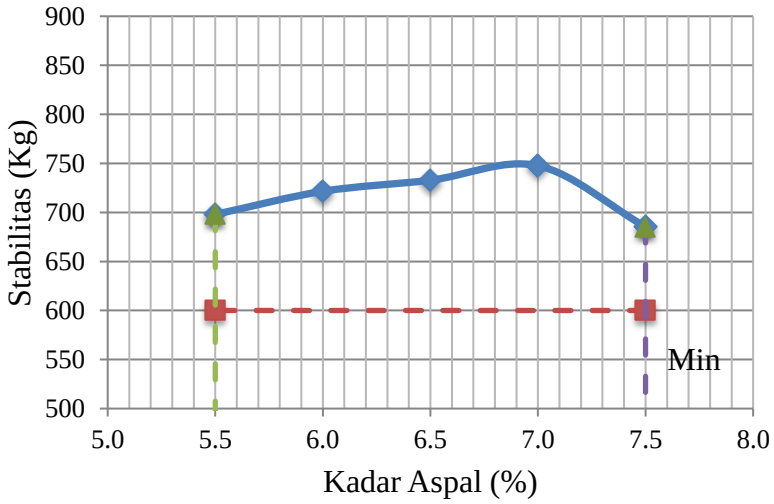
Setelah dilakukan pengujian berat jenis pada masing-masing *filler*, selanjutnya dilakukan penyetaraan volume pada tiap-tiap substitusi yang bertujuan untuk mengetahui perbandingan volume antar *filler* yang memiliki berat jenis berbeda.

5.2.5 Pembahasan Karakteristik *Marshall* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum (KAO) dengan Metode Pencampuran Bertahap

Dalam menentukan Kadar Aspal Opimum (KAO), dilakukan beberapa parameter pengujian salah satunya yaitu pengujian karakteristik *Marshall*. Nilai-nilai yang diperoleh pada pengujian ini yaitu nilai stabilitas, *flow*, *Voids in Total Mix* (*VITM*), *Voids in Mineral Aggregate* (*VMA*), dan *Voids Filled with Asphalt* (*VFWA*).

1. Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas dalam Menentukan KAO

   Stabilitas adalah kemampuan perkerasan untuk menahan deformasi permanen yang diakibatkan oleh beban lalu lintas tanpa mengalami distorsi seperti gelombang (*shoving*) dan alur (*rutting*). Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan bahwa perkerasan dapat menahan beban lalu lintas dengan baik. Berikut merupakan hasil nilai stabilitas akibat pengaruh penambahan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.2.

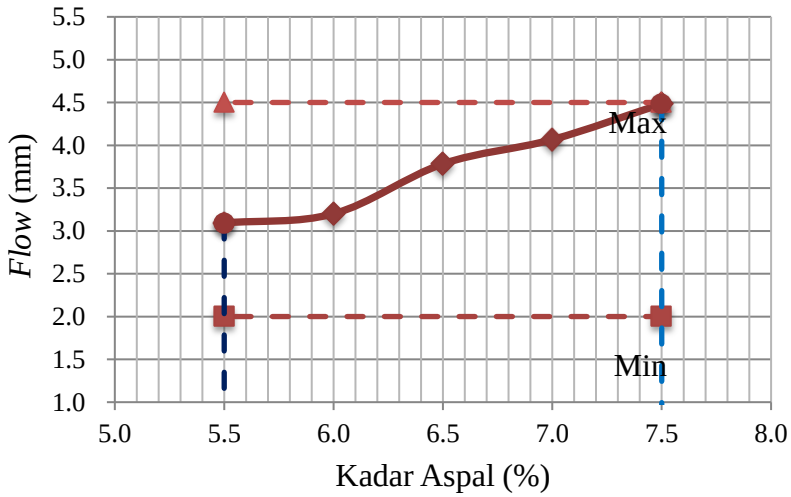


Gambar 5. 2 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai Stabilitas

Berdasarkan Gambar 5.2, dapat dilihat bahwa nilai stabilitas pada campuran *SMA* semakin meningkat seiring bertambahnya kadar aspal, namun pada batas optimum di kadar aspal 7% nilai stabilitas berangsur menurun. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak penambahan kadar aspal, maka penyelimutan aspal pada agregat semakin tebal sehingga mengakibatkan penggelinciran pada butiran agregat. Hasil nilai stabilitas di atas pada masing-masing kadar aspal telah memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *SMA* yaitu ≥ 600 kg.

2. Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *Flow* dalam Menentukan KAO

Kelelehan (*flow*) merupakan suatu kondisi dimana suatu campuran mengalami perubahan bentuk akibat beban yang diterima hingga batas runtuh. Berikut merupakan hasil nilai *flow* akibat pengaruh penambahan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.3.

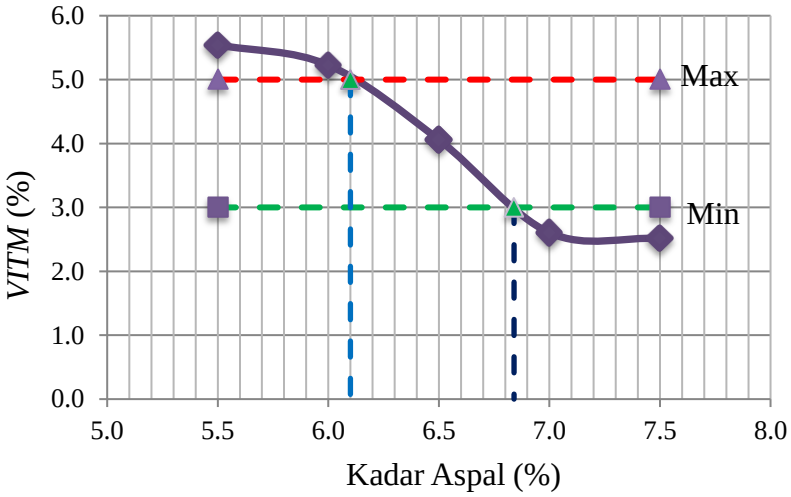


Gambar 5. 3 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *Flow*

Berdasarkan Gambar 5.3, dapat dilihat bahwa penambahan kadar aspal dapat meningkatkan nilai *flow*. Nilai *flow* yang tinggi menunjukkan campuran tersebut bersifat plastis dan mudah mengalami deformasi, sedangkan nilai *flow* yang rendah menunjukkan campuran bersifat getas dan mudah retak bila dilakukan pembebanan. Hasil nilai kelelehan pada Gambar 5.3 pada masing-masing kadar aspal telah memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *SMA* yaitu berkisar antara 2 mm – 4,5 mm.

3. Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VITM* dalam Menentukan KAO

VITM adalah persentase rongga yang terdapat dalam suatu campuran terhadap volume total campuran. Berikut merupakan hasil nilai *flow* akibat pengaruh penambahan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.4.

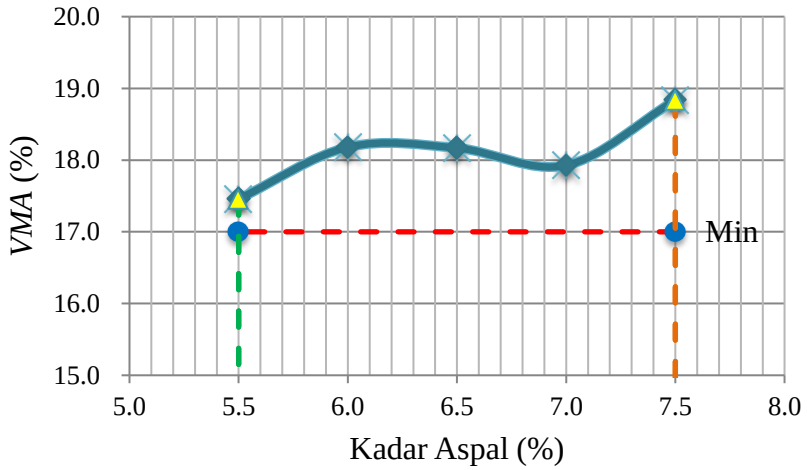


Gambar 5. 4 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VITM*

Berdasarkan Gambar 5.4, dapat dilihat bahwa nilai *VITM* menurun seiring bertambahnya kadar aspal. Hal ini terjadi karena rongga udara di dalam campuran berkurang karena terisi oleh aspal. Nilai *VITM* yang terlalu tinggi mengakibatkan berkurangnya kekedapan campuran terhadap air sehingga mudah mengalami oksidasi dan penurunan durabilitas campuran. Sebaliknya jika nilai *VITM* terlalu rendah menyebabkan campuran mudah mengalami kerusakan *rutting* dan *bleeding*. Nilai *VITM* yang disyaratkan pada campuran *SMA* berdasarkan syarat dari Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu 3% – 5%. Hasil tersebut menunjukkan nilai *VITM* yang memenuhi syarat berada pada rentang kadar aspal antara 6,10% sampai 6,84% .

4. Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VMA* dalam Menentukan KAO

VMA adalah rongga udara diantara agregat dalam campuran setelah dilakukan pemadatan, dan dinyatakan dalam persentase rongga terhadap volume total campuran. Ada beberapa faktor yang memengaruhi nilai *VMA* diantaranya, kadar aspal, gradasi agregat, temperatur, dan jumlah tumbukan. Berikut merupakan hasil nilai *VMA* akibat pengaruh penambahan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.5.

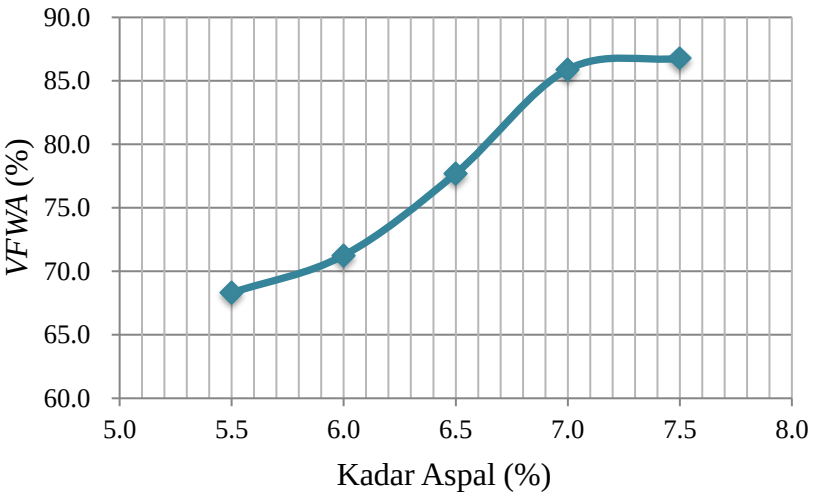


Gambar 5. 5 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VMA*

Berdasarkan Gambar 5.5, penambahan kadar aspal memberikan pengaruh pada peningkatan nilai *VMA*. Hal tersebut dikarenakan aspal yang menyelimuti lebih tebal. Hasil dari pengujian ini menunjukkan nilai *VMA* pada setiap kadar aspal telah memenuhi spesifikasi yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 17%.

5. Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VFWA* dalam Menentukan KAO

VFWA adalah rongga udara dalam campuran yang terisi oleh aspal, dan dinyatakan dalam persen. Semakin banyak rongga udara dalam campuran yang terisi aspal, maka nilai *VFWA* semakin tinggi sehingga kekedapan campuran terhadap udara dan air menjadi lebih baik. Nilai *VFWA* akan naik seiring bertambahnya kadar aspal. Berikut merupakan hasil nilai *VFWA* akibat pengaruh penambahan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.6.

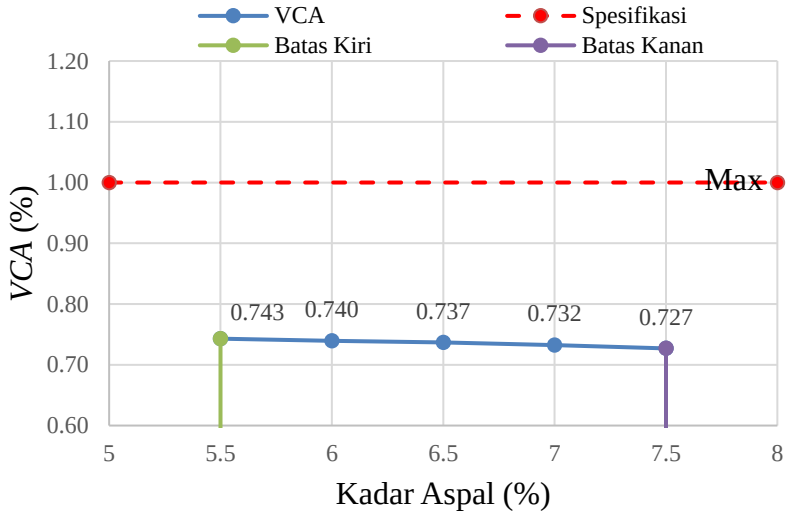


Gambar 5. 6 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VFWA*

Berdasarkan Gambar 5.6, menunjukkan bahwa penambahan kadar aspal memengaruhi nilai *VFWA*. Pada spesifikasi syarat Bina Marga 2028 Revisi 2 tidak disebutkan syarat secara sepesifik untuk parameter *VFWA*.

6. Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai *VCA* dalam Menentukan KAO

Voids in the Coarse Aggregate (VCA) didefinisikan sebagai volume diantara fraksi agregat kasar yang meliputi bahan pengisi, agregat halus, rongga udara, dan bahan penstabil (jika digunakan). Hasil nilai *VCA* dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut.

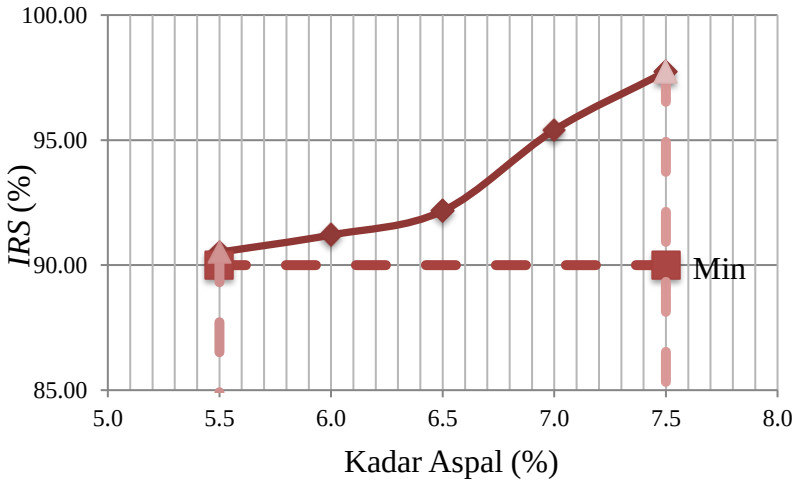


Gambar 5. 7 Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *VCA*

Berdasarkan Gambar 5.7, dapat dilihat bahwa nilai *VCA* pada campuran *SMA* telah memenuhi yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu rasio $VCA_{MIX}/VCAdrc$ < 1. Semakin kecil nilai *VCA* mengindikasikan bahwa campuran mengalami *stone-on-stone contact* yang baik antar agregat.

5.2.6 Pembahasan Pengaruh Karakteristik *Index of Retained Strength (IRS)* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum dengan Metode Pencampuran Bertahap (KAO)

IRS merupakan suatu parameter pengujian yang digunakan untuk mengetahui durabilitas suatu campuran dengan mengukur kemampuan campuran terhadap kerusakan akibat paparan air dan perubahan suhu. Nilai *IRS* diperoleh dari perbandingan nilai stabilitas *marshall* yang direndam dalam *waterbath* selama 24 jam dengan nilai stabilitas *marshall* yang direndam *waterbath* selama 0,5 jam pada suhu 60 ± 1ºC. Berikut merupakan hasil nilai *IRS* akibat pengaruh penambahan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.8.

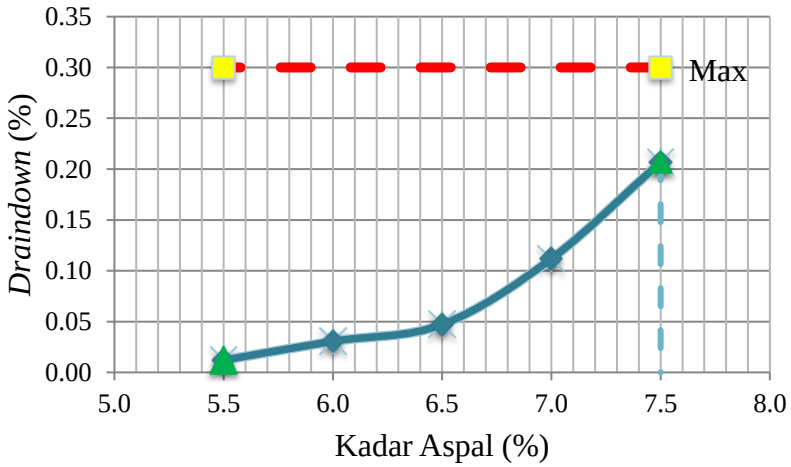


Gambar 5. 8 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *IRS*

Berdasarkan Gambar 5.7 di atas, peningkatan nilai *IRS* dipengaruhi seiring bertambahnya kadar aspal. Hasil dari pengujian ini menunjukkan nilai *IRS* pada setiap kadar aspal telah memenuhi spesifikasi yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu ≥ 90%.

5.2.7 Pembahasan Pengaruh Karakteristik *Draindown* untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum dengan Metode Pencampuran Bertahap (KAO)

Draindown merupakan bagian dari campuran (agregat halus dan aspal) yang memisahkan diri dan mengalir ke bawah dari suatu campuran. *National Asphalt Pavement Association* (2002), mensimulasikan pengujian *draindown* sebagai langkah antisipasi yang mungkin terjadi saat proses produksi sampai penghamparan di lapangan. *Draindown* dapat diminimalisir dengan penambahan serat atau *stabilizer* pada campuran. Berikut merupakan hasil nilai *draindown* akibat pengaruh penambahan kadar aspal dapat dilihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5. 9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Nilai *Draindown*

Dari hasil pengujian *draindown* pada Gambar 5.8 menunjukkan nilai *draindown* meningkat seiring dengan penambahan kadar aspal, namun semua variasi telah memenuhi syarat berada dibawah nilai maksimum 0,3% yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2.

Berdasarkan hasil parameter pengujian KAO di atas, diperoleh nilai KAO campuran sebesar 6,470%. Selanjutnya dilakukan pembuatan spesimen dengan menggunakan metode pencampuran bertahap, kemudian dibandingkan dengan metode konvensional yang telah dilakukan oleh Yuda (2024) menggunakan substitusi *filler* abu bauksit pada campuran *SMA*. Analisis lebih lanjut mengenai hasil pengujian karakteristik volumetrik, mekanik, dan durabilitas capuran diuraikan secara rinci sebagai berikut.

5.2.8 Pembahasan Karakteristik Volumetrik Campuran *SMA* dengan Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap

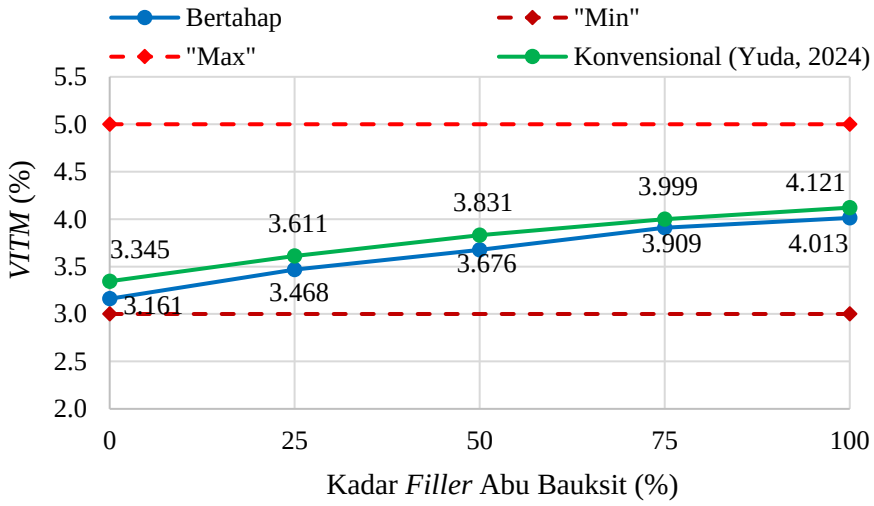
1. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *VITM*

   VITM merupakan jumlah rongga udara dalam campuran yang dinyatakan dalam persen. Berdasarkan Gambar 5.10, dapat dilihat bahwa penambahan kadar *filler* abu bauksit berpengaruh terhadap kenaikan nilai *VITM*. Semakin besar persentase penambahan abu bauksit, maka rongga dalam campuran semakin besar. Hal ini disebabkan oleh sifat *pozzolan* yang dimiliki abu bauksit menyebabkan viskositas aspal meningkat dan *filler* menggumpal dalam campuran sehingga pencampuran dan pemadatan akan lebih sulit dilakukan.

   Menurut Yuda (2024), besarnya nilai *VITM* disebabkan karena berat jenis *filler* abu bauksit lebih kecil dibandingkan dengan abu batu, dan abu bauksit memiliki tekstur yang lebih kasar sehingga mengakibatkan aspal menjadi tidak lentur dan mengurangi kemampuan aspal dalam mengisi rongga pada campuran. Campuran dengan rongga yang lebih besar mengindikasikan bahwa campuran tersebut tidak kedap air (mudah menyerap air), yang dapat mengakibatkan penurunan durabilitas campuran. Hasil ini sejalan dengan Fauziah, dkk (2012) yang menyatakan bahwa rongga dalam campuran meningkat seiring dengan bertambahnya kadar *fly ash* ke dalam aspal menjadikan viskositas aspal meningkat. Dengan demikian berpengaruh terhadap durabilitas campuran. Berbeda dengan penelitian Attahaullah (2024) yang menunjukkan penurunan nilai *VITM*

seiring penambahan kadar abu bauksit. Hal ini dikarenakan perbedaan nilai KAO dan jenis campuran yang digunakan.

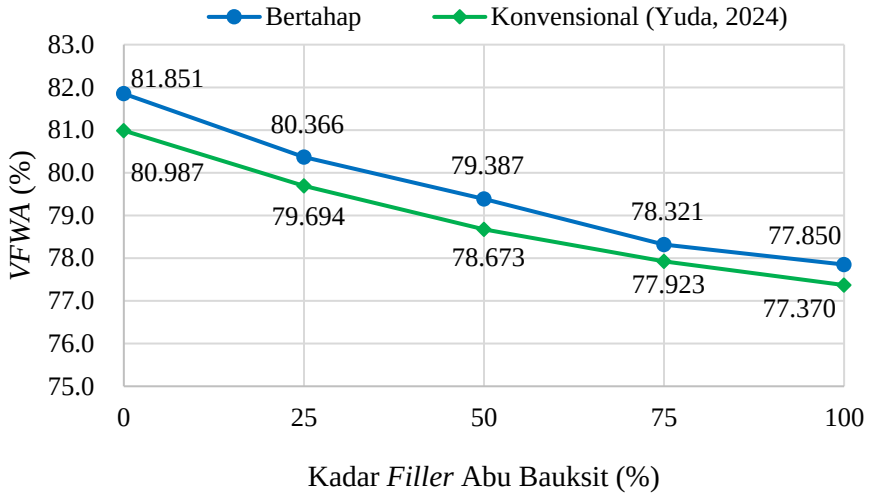
Berdasarkan grafik pada Gambar 5.10, campuran *SMA* dengan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *VITM* lebih rendah dibandingkan metode konvensional oleh Yuda (2024). Hal tersebut disebabkan pengaruh pelapisan awal antara agregat kasar dengan aspal yang membuat aspal mengisi rongga-rongga dalam campuran dengan optimal. Penelitian ini sejalan dengan Mentari (2023) yang menyatakan bahwa hasil nilai *VITM* menggunakan metode pencampuran bertahap dapat mengurangi rongga dalam campuran.



Gambar 5. 10 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap Nilai *VITM*

2. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *VFWA*

Grafik hasil nilai *VFWA* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut.



Gambar 5. 11 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap Nilai *VFWA*

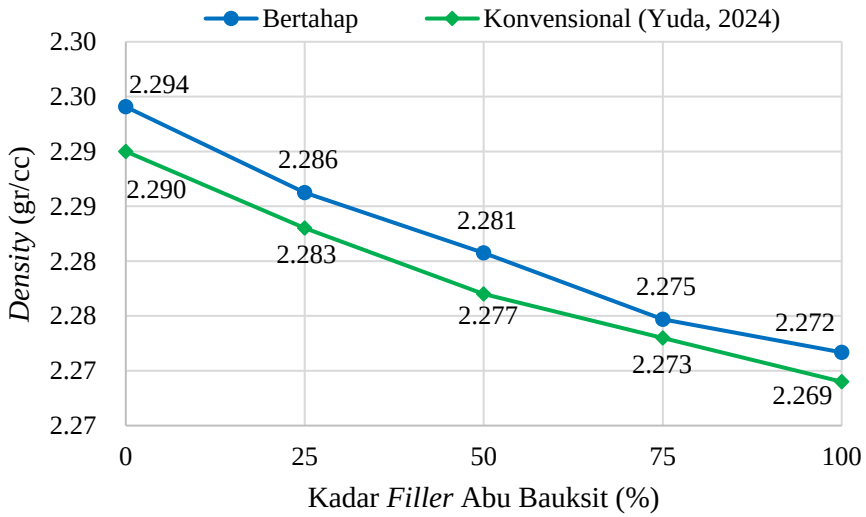
Berdasakan grafik pada Gambar 5.11 menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan kadar abu bauksit membuat nilai *VFWA* semakin menurun baik dengan metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap. Sejalan dengan uraian di atas, penambahan kadar abu bauksit menyebabkan viskositas aspal meningkat dan penggumpalan dalam campuran sehingga pelaksanaan pencampuran serta pemadatan akan lebih sulit dilakukan. Menurunya *workability* menghasilkan rongga dalam campuran semakin meningkat, dan menurunkan besarnya rongga yang terisi aspal. Hasil ini sejalan dengan Chasanah dan Sukmo (2023) yang menyatakan bahwa penggunaan *filler* bubuk talk menyebabkan penurunan nilai *VFWA* pada setiap persentase kadar. Rendahnya rongga yang terisi aspal menyebabkan campuran rentan terhadap gangguan air, sehingga menurunkan durabilitas campuran. Namun, berbeda dengan penelitian Attahaullah (2024) yang menunjukkan kenaikan nilai *VFWA* seiring penambahan kadar abu bauksit. Hal ini dikarenakan perbedaan nilai KAO dan jenis campuran yang digunakan.

Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *VFWA* yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Hal tersebut dikarenakan oleh pelapisan awal antara agregat kasar dengan aspal yang membuat

rongga dalam campuran beton aspal padat semakin terisi oleh aspal akibat dari penggunaan metode pencampuran bertahap. Kok dan Kologlu (2011) menyimpulkan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan rongga dalam campuran lebih sedikit, membuat campuran lebih kedap terhadap air dan udara.

3. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Density*

Nilai *density* menunjukkan tingkat kepadatan suatu campuran yang diperoleh dari perbandingan antara berat campuran dan volume, dinyatakan dalam satuan gr/cc. Grafik hasil nilai *density* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.12 berikut.



Gambar 5. 12 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Density*

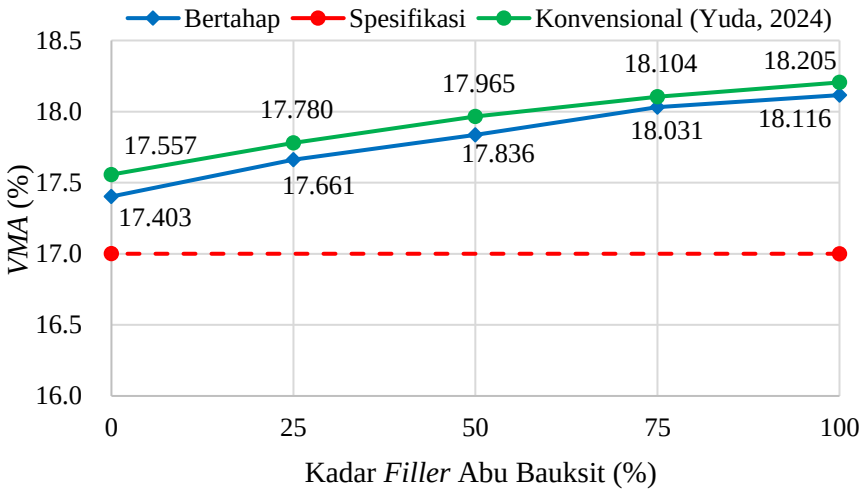
Gambar 5.12 mempresentasikan grafik perubahan nilai kepadatan campuran dengan adanya penambahan kadar *filler* abu bauksit. Grafik menunjukkan bahwa nilai *density* semakin menurun seiring dengan penambahan kadar abu bauksit. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, penambahan kadar abu bauksit yang semakin besar menyebabkan peningkatan rongga dalam campuran (*VITM*) dan penurunan rongga yang

terisi aspal (*VFWA*) sehingga kepadatan campuran menjadi menurun, sebagaimana yang dijelaskan oleh Yuda (2024).

Penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *density* yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional, tetapi perbedaannya tidak begitu jauh. Sejalan dengan Hidayat (2021), Firdaus (2023), Ichwan (2023), Mentari (2023), dan Iqbal dan Fauziah (2023) yang berpendapat bahwa metode pencampuran bertahap dapat mengurangi rongga-rongga antar butiran agregat, sehingga kepadatan campuran meningkat.

4. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *VMA*

Grafik hasil nilai *VMA* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



Gambar 5. 13 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *VMA*

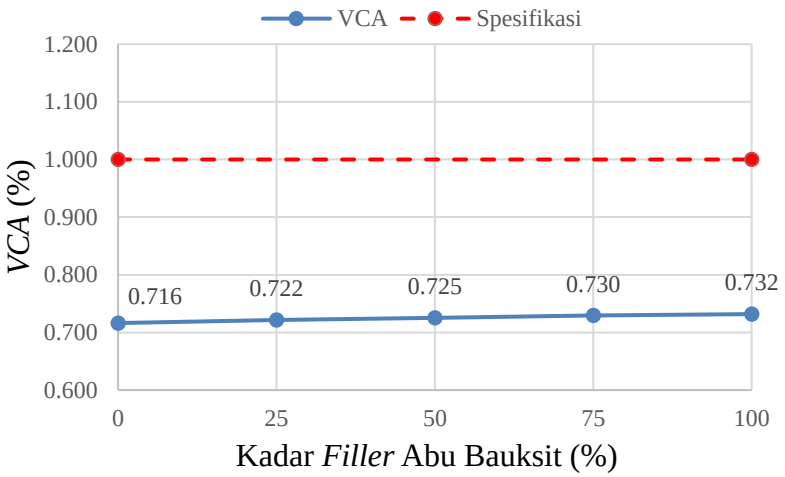
Berdasarkan grafik pada Gambar 5.13, nilai *VMA* mengalami peningkatan pada setiap penambahan kadar abu bauksit. Semakin besar nilai *VMA* menandakan bahwa jarak antar agregat dalam campuran semakin berjauhan. Hal ini dikarenakan sifat *pozzolan* pada abu bauksit menyebabkan penggumpalan *filler* dalam campuran sehingga pemadatan

menjadi sulit dilakukan, akibatnya kepadatan campuran menurun. Mengacu kepada hasil pengujian nilai *density* yang telah dibahas sebelumnya, kencenderungan naiknya nilai *VMA* beriringan dengan menurunnya nilai *density* dan meningkatnya nilai *VITM*. Hawari dan Lizar (2021) dalam penelitiannya menunjukkan kenaikan nilai *VMA* seiring dengan penambahan kadar *filler fly ash* dan *bottom ash.* Hal tersebut dikarenakan sifat *pozzolan* dalam kedua *filler* menyebabkan *filler* menggumpal sehingga pemadatan sulit dilakukan.

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.13, metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *VMA* yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Hal ini dikarenakan metode pencampuran bertahap menghasilkan ikatan adhesi yang lebih kuat sehingga jarak antar agregat menjadi lebih rapat, sejalan dengan yang disimpulkan oleh Kok dan Kologlu (2011).

5. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *VCA*

Voids in the Coarse Aggregate (VCA) didefinisikan sebagai volume diantara fraksi agregat kasar yang meliputi bahan pengisi, agregat halus, rongga udara, dan bahan penstabil (jika digunakan). Grafik hasil nilai *VCA* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut.



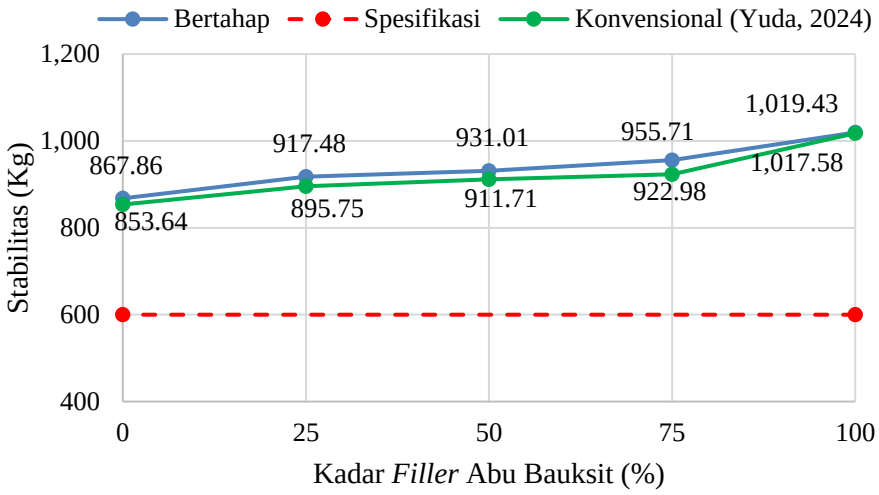
Gambar 5. 14 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Nilai *VCA*

Berdasarkan Gambar 5.14, nilai *VCA* untuk campuran *SMA* pada setiap kadar substitusi *filler* abu bauksit telah memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2 yakni < 1, sehingga dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa campuran memiliki kepadatan yang baik, ditandai dengan terciptanya *stone-on-stone conctact* yang baik antar agregat kasar. Penurunan nilai *VCA* dipengaruhi oleh berat jenis campuran pada masing-masing kadar *filler* yang dibuat saat mencari berat volumetrik.

5.2.9 Pembahasan Karakteristik Mekanik Campuran *SMA* dengan Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap

1. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai Stabilitas

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh grafik perbandingan nilai stabilitas menggunakan metode konvensional yang dilakukan oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap dengan menggunakan substitusi *filler* abu bauksit dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut.



Gambar 5. 15 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai Stabilitas

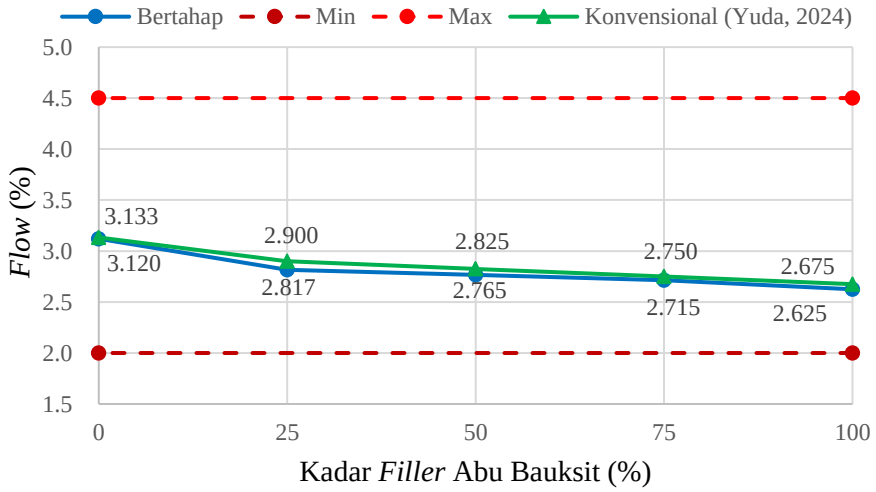
Berdasarkan Gambar 5.15, nilai stabilitas menunjukkan peningkatan seiring dengan penambahan kadar *filler* baik yang menggunakan metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap. Besarnya nilai stabilitas dipengaruhi oleh *frictional resistance* dan *interlocking* antar partikel agregat serta kohesi campurannya. Peningkatan nilai stabilitas disebabkan oleh rekatan (*interlocking*) antar agregat meningkat akibat dari penambahan kadar abu bauksit yang dapat meningkatkan kohesi aspal. Hal tersebut dikarenakan senyawa kimia yang terkandung dalam abu bauksit bersifat *pozzolan* yang menyebabkan campuran menjadi kaku dan keras, sejalan dengan yang disimpulkan oleh Yuda (2024). Senyawa kimia dalam bauksit mirip-mirip dengan senyawa yang terkandung dalam *fly ash* seperti silika, alumunium oksida, besi oksida, kalsium oksida, magnesium dan sulfat. (Fauziah, dkk 2012). Nilai stabilitas yang tinggi mengindikasikan bahwa campuran memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen akibat beban yang diterimanya. Berbanding terbalik dengan Octavian (2024), nilai stabilitas mengalami penurunan seiring dengan penambahan kadar serbuk besi yang ditunjukkan dengan penurunan nilai *density* dikarenakan campuran memiliki rongga yang besar akibat penambahan serbuk besi.

Berdasarkan pada Gambar 5.15, metode pencampuran bertahap pada

campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* mampu menghasilkan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Penelitian ini sejalan dengan Kok dan Kologlu (2011), Yaro, dkk (2021), dan Hidayat (2021), Mentari (2023), Iqbal dan Fauziah (2023), Ichwan (2023), Firdaus (2023), dan Atthaullah (2024) bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap mampu meningkatkan nilai stabilitas. Hal tersebut dikarenakan metode pencampuran bertahap menunjukkan adanya *interlocking* antar agregat kasar terjadi dengan baik serta mengurangi pori-pori pada campuran yang dihasilkan dari pelapisan awal agregat kasar. Hasil dari kedua penelitian ini menunjukkan nilai stabilitas telah memenuhi yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yaitu >600 kg.

2. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Flow*

Grafik hasil nilai *flow* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.11 berikut.



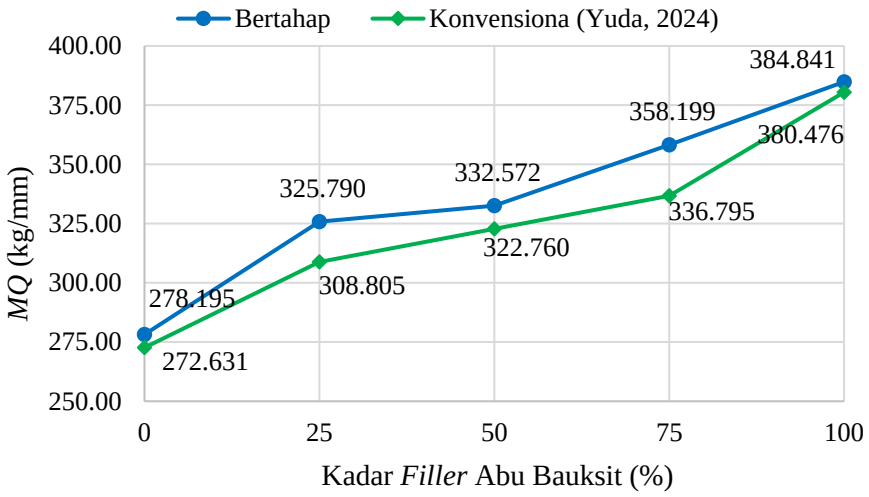
Gambar 5. 16 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Flow*

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.16, nilai *flow* menunjukkan penurunan seiring penambahan *filler* abu bauksit baik dengan metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa penambahan kadar abu bauksit mengakibatkan peningkatkan viskositas aspal, sehingga membuat campuran menjadi keras dan kaku. Hal ini dikarenakan abu bauksit memiliki sifat *pozzolan* yang ketika dicampurkan dengan aspal akan membentuk reaksi senyawa yang membuat aspal menjadi kaku dan keras (Fauziah, dkk 2012). Pada suatu kondisi dimana nilai *flow* sangat rendah di bawah minimum yang disyaratkan, maka campuran cenderung bersifat getas dan rawan mengalami keretakan. Sebaliknya jika nilai *flow* sangat tinggi di atas maksimum yang disyaratkan, maka campuran akan bersifat plastis sehingga mudah mengalami deformasi permanen. Besarnya nilai *flow* dipengaruhi oleh kadar aspal dalam campuran, viskositas aspal, temperatur pencampuran, dan bentuk agregat (Utami, 2018). Prasetya (2024) menujukkan perbedaan hasil nilai *flow* yang meningkat seiring penambahan kadar *fly ash*. Mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih plastis akibat penambahan kadar *fly ash*.

Penggunaan metode pencampuran bertahap menghasikan nilai *flow* yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Hal ini dikarenakan sifat adhesi dalam campuran meningkat, akibatnya campuran menjadi lebih kaku. Hasil penelitian ini sejalan dengan Hesami (2015) dan Hidayat (2021), Mentari (2023), Iqbal dan Fauziah (2023), Ichwan (2023), Firdaus (2023), dan Atthaullah (2024), yang menyatakan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap dapat membuat campuran menjadi kaku sehingga memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen, namun rentan terhadap *cracking*. Meskipun demikian, hasil dari kedua penelitian ini menunjukkan nilai *flow* telah memenuhi yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yaitu 2 – 4,5 mm.

3. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Marshall Quotient (MQ)*

Grafik hasil nilai *MQ* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.17 berikut.



Gambar 5. 17 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *MQ*

Nilai *MQ* merupakan perbandingan antara nilai stabilitas dengan *flow* yang digunakan untuk mengetahui tingkat kelenturan (fleksibilitas) suatu campuran. Berdasarkan grafik pada Gambar 5.17, nilai *MQ* mengalami kenaikan pada setiap persentase *filler* abu bauksit baik dengan metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap. Hal yang menyebabkan terjadinya peningkatan nilai *MQ* dikarenakan penambahan substitusi *filler* abu bauksit membuat stabilitas, viskositas aspal dan kekakuan pada campuran meningkat. Nilai *MQ* yang telalu tinggi membuat campuran cenderung menjadi getas, dan mudah mengalami retak akibat pembebanan yang berulang. Sedangkan nilai *MQ* yang terlalu rendah membuat campuran menjadi sangat lentur (*flexible*) berpotensi mengalami *bleeding*. Pratama (2024) menyimpulkan hal yang berbeda bahwa

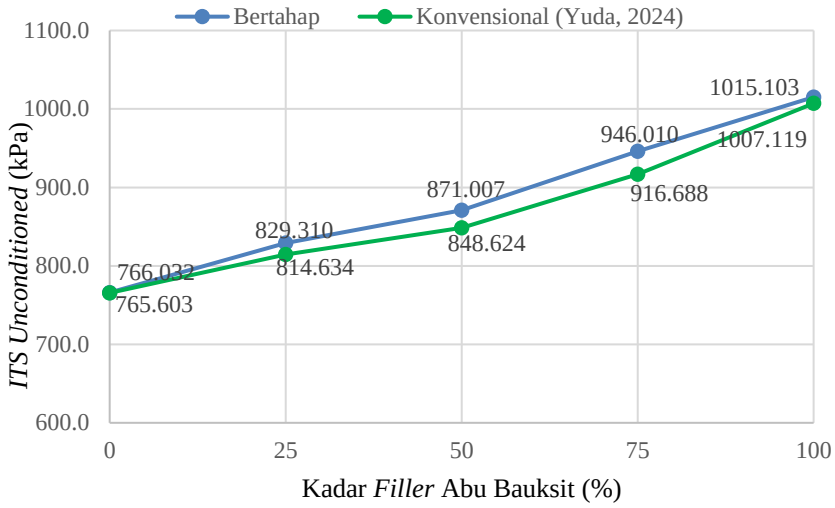
penambahan kadar 50%, 75%, dan 100% abu arang kayu membuat fleksibilitas campuran menjadi rendah, ditandai dengan penurunan nilai *MQ*.

Pada Gambar 5.17, penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *MQ* yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional oleh Yuda (2024). Hal tersebut mengindikasikan bahwa metode pencampuran bertahap mengakibatkan kekakuan campuran meningkat, sehingga campuran lebih tahan terhadap deformasi plastis akibat pembebanan. Pernyataan tersebut sejalan dengan penelitian Kok dan Kologlu (2011), Hidayat (2021), Mentari (2023), Ichwan (2023), Iqbal dan Fauziah (2023), dan Atthaullah (2024). Berbanding terbalik dengan Wahyudi (2019), Firdaus (2023), dan Mahza (2023) yang menyatakan dalam penelitiannya bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Hal tersebut membuat campuran menjadi lebih fleksibel, dan tidak mudah mengalami perubahan bentuk plastis. Perbedaan gradasi dan bahan ikat juga berpengaruh terhadap nilai *MQ*. Nilai *MQ* untuk campuran *SMA* tidak diatur secara khusus dalam spesifikasi syarat Bina Marga 2018 Revisi 2.

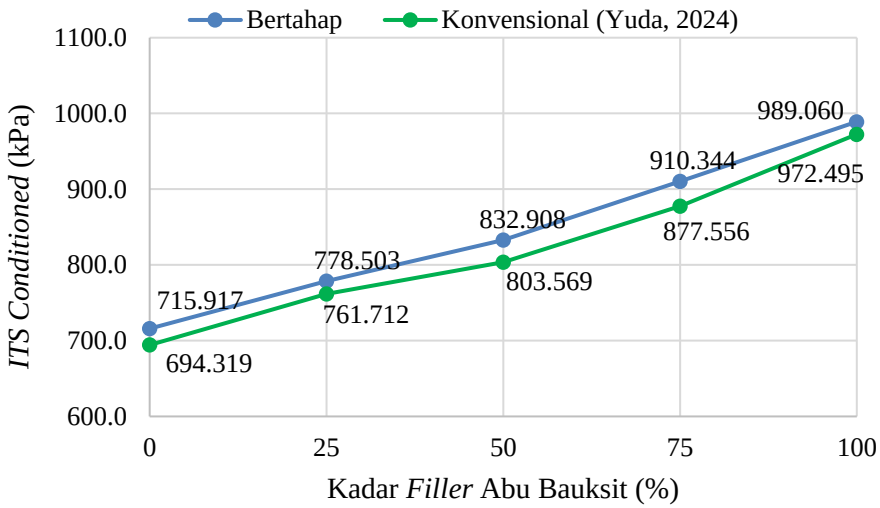
4. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Indirect Tensile Strength (ITS)*.

Pengujian *ITS* dilakukan bertujuan untuk mengetahui kemampuan campuran dalam menerima beban tarik. Pengujian ini terbagi menjadi dua jenis pengujian yaitu pengujian *ITS conditioned* dan *ITS unconditioned. ITS conditioned* dilakukan setelah benda uji direndam dalam *waterbath* menggunakan air suling pada suhu 60±1ºC selama 24 jam. Sedangkan *ITS unconditioned* dilakukan setelah benda uji direndam selama 0,5 jam.

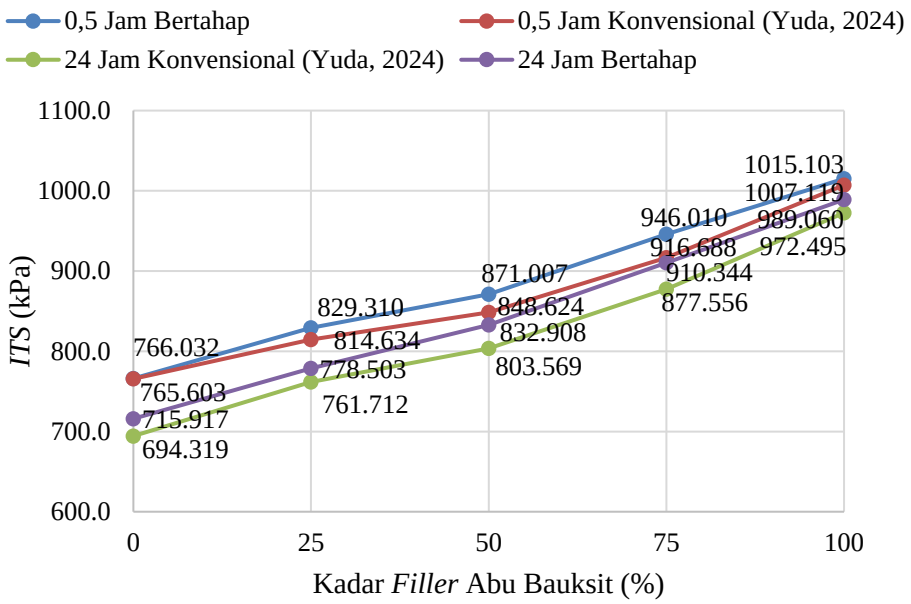
Grafik hasil nilai *ITS* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.18 sampai Gambar 5.20 berikut.



Gambar 5. 18 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ITS Unconditioned*



Gambar 5. 19 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ITS Conditioned*



Gambar 5. 20 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ITS*

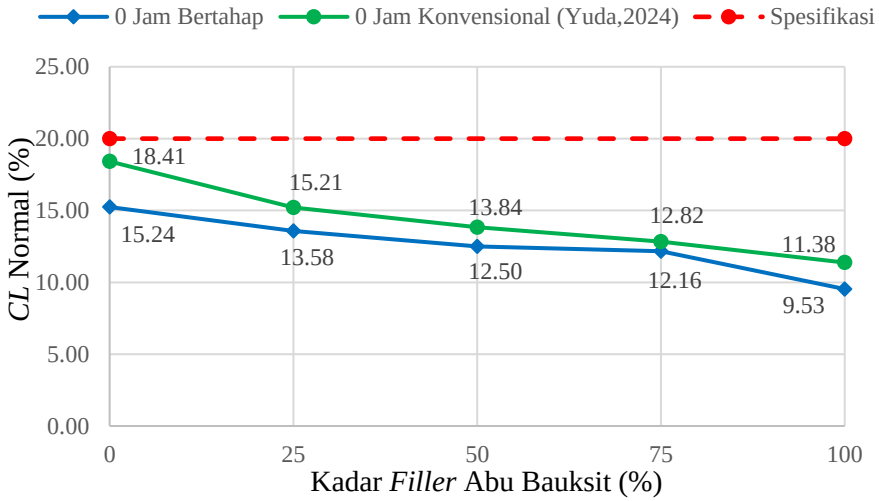
Berdasarkan hasil grafik pada Gambar 5.18 sampai Gambar 5.20, dapat diambil kesimpulan bahwa baik metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap, nilai *ITS* mengalami kenaikan pada setiap kadar substitusi abu bauksit. Nilai *ITS conditioned* mengalami penurunan baik metode konvensional maupun bertahap seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.19. Hal tersebut dikarenakan pengaruh durasi rendaman yang menyebabkan campuran mengalami penurunan kemampuan daya ikat antar partikel agregat dan aspal, sehingga kekuatan campuran menurun dan campuran berpotensi terjadinya keretakan.

Metode pencampuran bertahap menunjukkan nilai *ITS* yang lebih tinggi daripada metode konvensional. Hal ini disebabkan pengaruh modulus kekakuan (*Smix*) yang dihasilkan campuran lebih besar pada penggunaan metode pencampuran bertahap dibandingkan metode konvensional, sehingga campuran memiliki ketahanan terhadap potensi terjadinya keretakan (*fatigue*) akibat beban tarik yang diterimanya. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hidayat (2021), Mahza (2023), dan Ichwan (2023) bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap dapat meningkatkan nilai *ITS*

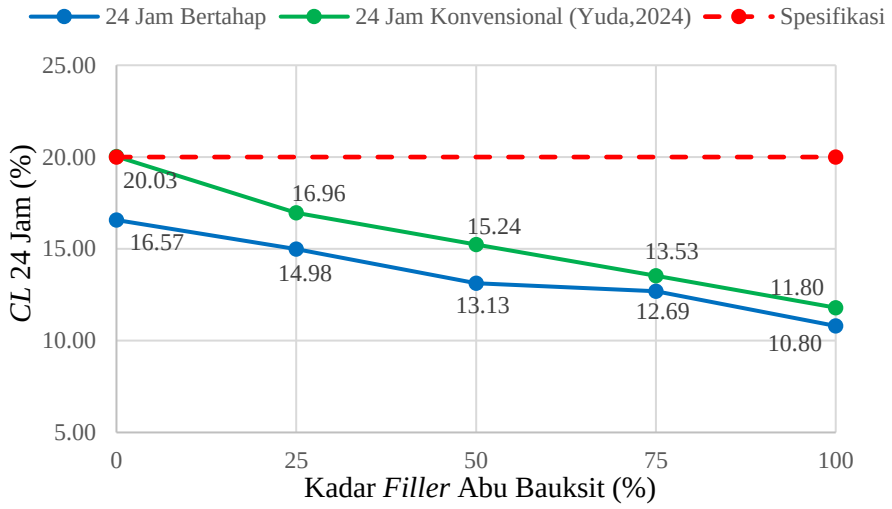
yang signifikan.

5. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Cantabro Loss*

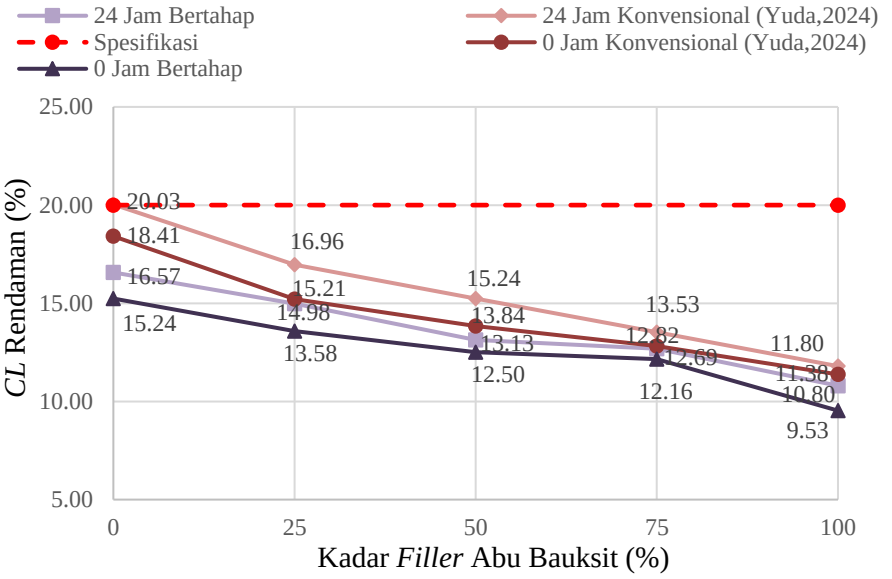
Pengujian *Cantabro Loss* dilakukan untuk mengetahui ketahanan benda uji terhadap keausan dengan menggunakan mesin *Los Angeles* yang diputar sebanyak 300 kali tanpa bola baja. Nilai *CL* dipersentasekan sebagai banyaknya jumlah disintegrasi yang terjadi pada benda uji selama pengujian berlangsung. Grafik hasil nilai *CL* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.21 sampai Gambar 5.23 berikut.



Gambar 5. 21 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *CL* Normal



Gambar 5. 22 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *CL* 24 Jam



Gambar 5. 23 Grafik Perbandingan *CL* Rendaman Normal dan 24 Jam Menggunakan Metode Konvensional dan Bertahap

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.21 sampai 5.23, nilai *Cantabro Loss* menunjukkan penurunan seiringan penambahan kadar abu bauksit. Hal ini disebabkan sifat *pozzolan* pada abu bauksit yang menyebabkan viskositas aspal meningkat, sehingga ikatan antara aspal dengan agregat semakin baik. Sejalan dengan Yuda (2024) yang menyimpulkan bahwa abu

bauksit mampu menciptakan ketahanan yang baik pada campuran terhadap pengaruh beban lalu lintas yang berulang, dibuktikan dengan adanya penurunan nilai *cantabro loss* seiringan dengan penambahan kadar abu bauksit. Pada rendaman 24 jam menghasilkan nilai *cantabro loss* yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa rendaman, serta pada kadar 0% abu bauksit nilai *CL* melebihi yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *SMA* yaitu ≤ 20%. Hal tersebut dikarenakan pengaruh durasi rendaman yang menyebabkan campuran mengalami penurunan kemampuan daya ikat antar partikel agregat dan aspal sehingga saat dilakukan pembebanan mengalami disintegrasi antar partikel.

Disisi lain, penggunaan metode pencampuran bertahap menunjukkan nilai *cantabro loss* yang lebih rendah daripada metode konvensional. Hal tersebut dipengaruhi oleh pelapisan awal antara aspal dengan agregat menciptakan daya lekat yang baik, serta mencegah terjadinya disintergasi partikel yang berlebih saat menerima beban. Penurunan nilai *cantabro loss* mengindikasikan bahwa campuran memiliki kemampuan adhesi antar partikel yang lebih baik.

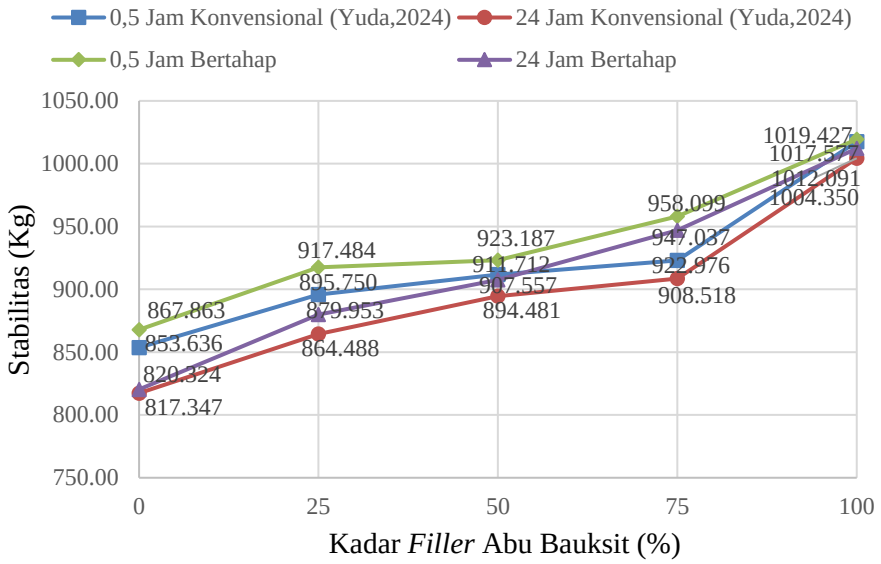
Hasil ini sejalan dengan Hidayat (2021), Ichwan (2023), Iqbal dan Fauziah (2023), dan Firdaus (2023) penggunaan metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan nilai *cantabro loss* yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional.

5.2.10 Pembahasan Durabilitas Campuran *SMA* dengan Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada KAO dengan Metode Pencampuran Bertahap

1. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Index of Retained Strength (IRS)*

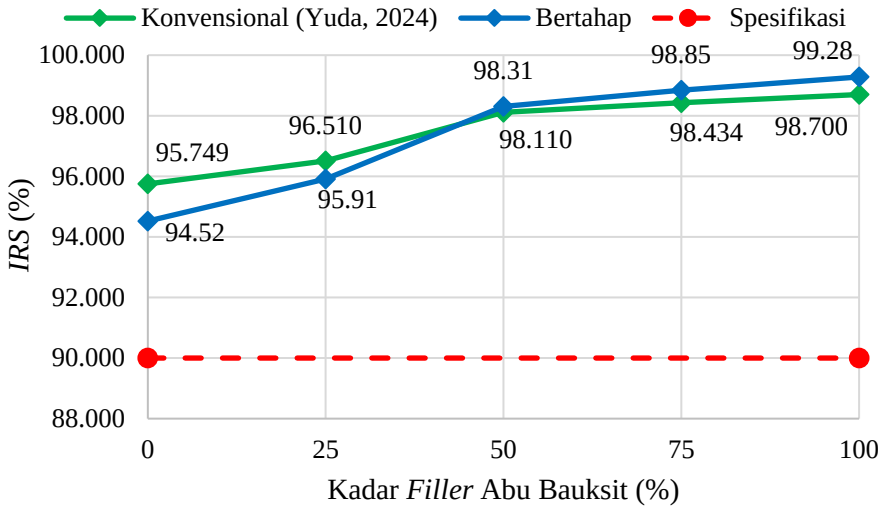
   IRS diperoleh melalui perbandingan nilai stabilitas rendaman 24 jam dengan rendaman 0,5 jam, dan dinyatakan dalam persen. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi durabilitas sekaligus mengukur kekuatan campuran setelah terpapar air saat proses perendaman pada suhu 60±1ºC dalam *waterbath*. Persentase yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi

2 pada pengujian stabilitas *marshall* sisa yaitu ≥ 90%. Berikut adalah grafik pengaruh substitusi abu bauksit melalui perbandingan stabilitas rendaman 0,5 jam dan 24 jam dengan menggunakan metode konvensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.24.



Gambar 5. 24 Grafik Perbandingan Stabilitas Rendaman 0,5 Jam dan 24 Jam Menggunakan Metode Konvensional dan Bertahap

Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.24, nilai stabilitas rendaman selama 24 jam pada campuran *SMA* menghasilkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai stabilitas rendaman selama 0,5 jam pada setiap kadar abu bauksit. Hal tersebut dikarenakan air yang masuk ke dalam pori-pori campuran lebih banyak saat perendaman 24 jam sehingga menyebakan ikatan antara agregat dan aspal menurun. Nilai stabilitas rendaman pada penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai yang lebih tinggi daripada metode konvensional. Hal ini dikarenakan pelapisan awal antara aspal dengan agregat yang membuat pori-pori dalam campuran menjadi lebih sedikit, pernyataan ini sejalan dengan Hidayat (2021) dan Mentari (2023).



Gambar 5. 25 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *IRS*

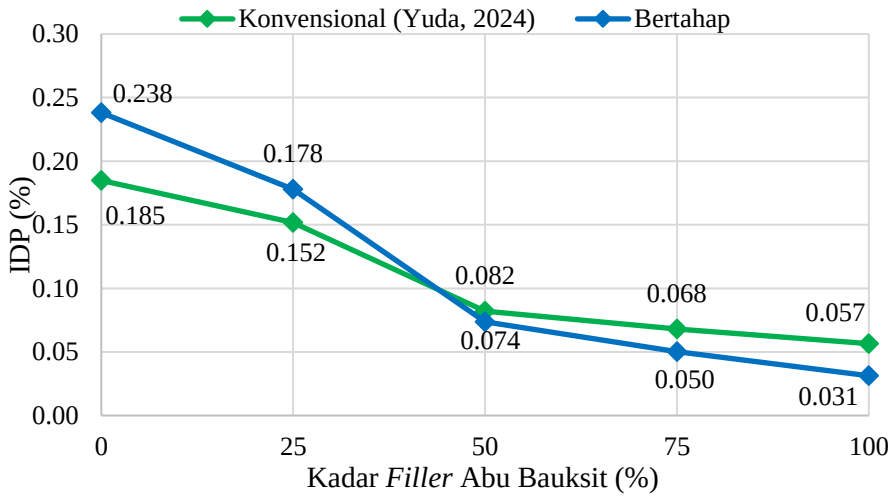
Grafik pada Gambar 5.25, menunjukkan nilai *IRS* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* menggunakan metode pencampuran bertahap terjadi kenaikan pada kadar abu bauksit 50%, 75%, dan 100%. Sedangkan untuk metode konvensional menghasilkan nilai yang lebih tinggi pada kadar abu bauksit 0%, dan 25% . Hal yang menyebabkan penurunan nilai *IRS* pada kadar abu bauksit 0% dan 25% dengan metode pencampuran bertahap dikarenakan rongga dalam campuran belum terdistribusi secara merata oleh agregat dan aspal sehingga ketahanan campuran terhadap paparan air dan perubahan suhu menjadi menurun. Demikian halnya ketika terjadi kenaikan nilai *IRS* pada kadar 50%, 75%, dan 100% dikarenakan pori-pori dalam campuran yang terisi air menjadi lebih sedikit akibat pelapisan awal antara aspal dengan agregat yang terdistribusi dengan optimal sehingga ketahanan campuran terhadap paparan air dan perubahan suhu menjadi meningkat. Meskipun demikian, berdasarkan nilai stabilitas rendaman yang telah dibahas sebelumnya, metode pencampuran bertahap menghasilkan pori-pori campuran yang berisikan air lebih sedikit daripada metode konvensional.

Pernyataan tersebut sejalan dengan Yuda (2024) dan Atthaullah (2024) yang menjelaskan bahwa penggunaan abu bauksit mampu meningkatkan nilai *IRS*. Hal tersebut disebabkan karena selimut aspal yang

tebal akibat dari penambahan abu bauksit dalam campuran. Berbeda dengan pernyataan Prasetya (2024) menyatakan penurunan nilai *IRS* akibat penggunaan *filler* abu ampas tebu. Pada penelitian Hidayat (2021) dan Ichwan (2023) menyimpulkan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan nilai *IRS* yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional sehingga mampu meningkatkan keawetan campuran.

2. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai Indeks Durabilitas Pertama (IDP)

Indeks Durabilitas Pertama (IDP) menunjukkan hilangnya persentase kekuatan campuran selama durasi perendaman yang dapat dilihat dari kelandaian berurutan dari kurva durabilitas. Nilai IDP yang lebih rendah menunjukkan ketahanan campuran yang lebih baik, sedangkan semakin besar nilai IDP maka ketahanan campuran terhadap perendaman air semakin menurun. Grafik hasil nilai IDP akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dilihat pada Gambar 5.26 berikut



Gambar 5. 26 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai IDP

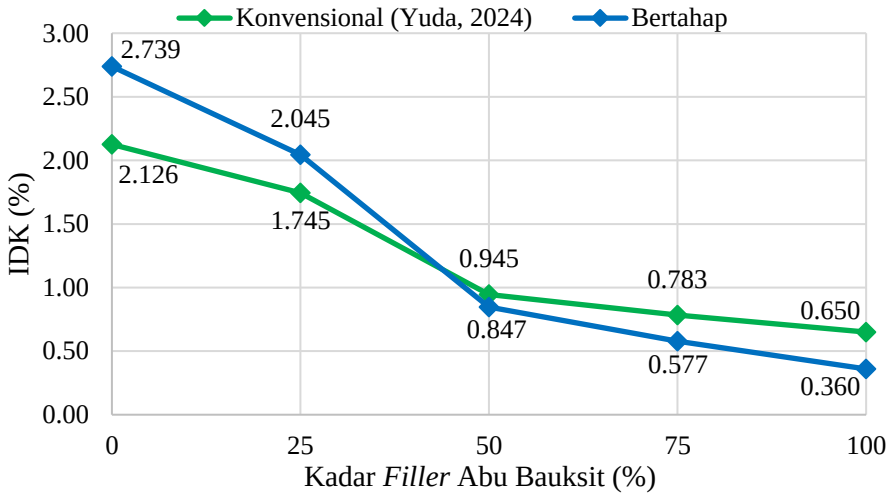
Berdasarkan grafik pada Gambar 5.26, nilai IDP mengalami

penurunan pada setiap kadar substitusi abu baukit baik pada metode pencampuran bertahap maupun konvensional. Pada kadar abu bauksit 50%, 75%, dan 100%, metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan metode kovensional. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kadar tersebut campuran memiliki kekuatan terhadap perendaman yang lebih baik. Sedangkan pada kadar 0% dan 25% menghasilkan nilai IDP yang lebih tinggi menunjukkan bahwa terjadi penurunan kekuatan campuran yang disebabkan oleh banyaknya air yang masuk ke dalam pori-pori campuran akibat lamanya perendaman. Nilai IDP memiliki hubungan dengan nilai *IRS*. Peningkatan nilai *IRS* menghasilkan nilai IDP yang rendah, mengindikasikan kekuatan campuran semakin baik.

Mahza (2023) dan Firdaus (2023) menyatakan bahwa metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai IDP yang lebih baik. Yuda (2024) dalam Atthaullah (2024) menyimpulkan bahwa penggunaan abu bauksit sebagai substitusi campuran mengakibatkan penurunan nilai IDP. Hal ini disebabkan oleh *film* aspal yang tebal membuat pori-pori dalam campuran yang terisi air lebih sedikit sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan campuran. Pada kasus peningkatan nilai IDP untuk metode pencampuran bertahap terhadap metode konvensional tidak ada acuan penelitian sebelumnya, sehingga tidak bisa dibandingkan.

3. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai Indeks Durabilitas Kedua (IDK)

   Indeks Durabilitas Kedua (IDK) didefinisikan sebagai rata-rata luasan kehilangan kekuatan campuran selama durasi perendaman. Sebagaimana nilai IDP, nilai IDK yang lebih rendah menunjukkan kehilangan kekuatannya lebih sedikit, sedangkan semakin besar nilai IDK maka kehilangan kekuatan campuran semakin besar. Grafik hasil nilai IDK akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dilihat pada Gambar 5.27 berikut.



Gambar 5. 27 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai IDP

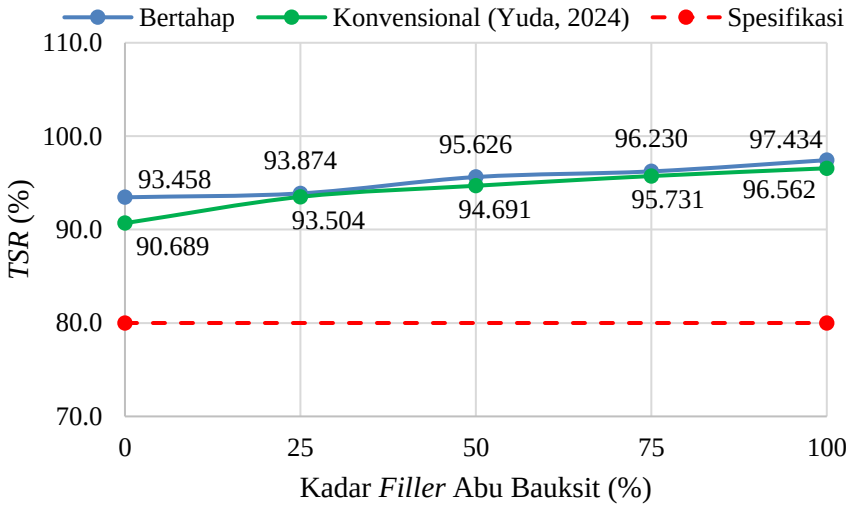
Berdasarkan grafik pada Gambar 5.27, nilai IDK mengalami penurunan pada setiap kadar substitusi abu bauksit baik pada metode pencampuran bertahap maupun konvensional. Pada kadar abu bauksit 50%, 75%, dan 100%, metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan metode kovensional. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kadar tersebut campuran memiliki kekuatan terhadap perendaman yang lebih baik. Sedangkan pada kadar 0% dan 25% menghasilkan nilai IDK yang lebih tinggi menunjukkan bahwa terjadi penurunan kekuatan campuran yang disebabkan oleh banyaknya air yang masuk ke dalam pori-pori campuran akibat lamanya perendaman. Nilai IDK sama halnya dengan nilai IDP yaitu memiliki hubungan dengan nilai *IRS*. Peningkatan nilai *IRS* menghasilkan nilai IDK yang rendah, mengindikasikan kekuatan campuran semakin baik.

Mahza (2023) dan Firdaus (2023) menyatakan bahwa metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai IDK yang lebih baik. Yuda (2024) dalam Atthaullah (2024) menyimpulkan bahwa penggunaan abu bauksit sebagai substitusi campuran mengakibatkan penurunan nilai IDK. Hal ini disebabkan oleh *film* aspal yang tebal membuat pori-pori dalam campuran yang terisi air lebih sedikit sehingga menghasilkan peningkatan

kekuatan campuran. Pada kasus peningkatan nilai IDK untuk metode pencampuran bertahap terhadap metode konvensional tidak ada acuan penelitian sebelumnya, sehingga tidak bisa dibandingkan.

4. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Tensile Strength Ratio (TSR)*

Nilai *TSR* diperoleh melalui rasio nilai *ITS conditioned* dan *ITS unconditioned.* Pengujian *TSR* bertujuan untuk mengetahui durabilitas campuran akibat pengaruh durasi rendaman air pada suhu 60±1ºC yang didasarkan pada nilai kuat tarik. Nilai *TSR* yang disyaratkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yaitu ≥80%. Grafik hasil nilai *TSR* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.28 berikut.



Gambar 5. 28 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *TSR*

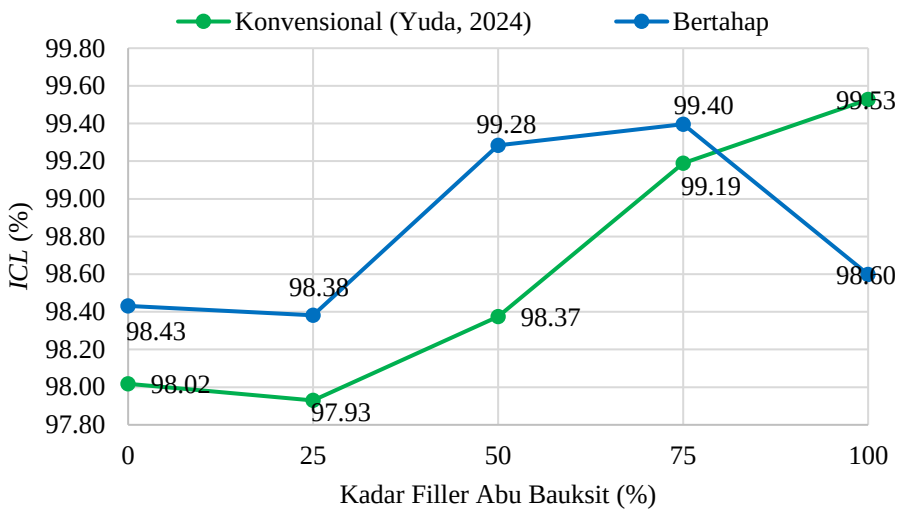
Berdasarkan grafik pada Gambar 5.28 dapat disimpulkan bahwa nilai *TSR* mengalami peningkatan pada setiap kadar substitusi abu bauksit, baik metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap. Penelitian ini sejalan dengan Yuda (2024) yang menyatakan bahwa abu

bauksit mampu meningkatkan nilai *TSR*. Hal tersebut dikarenakan abu bauksit menyebabkan selimut aspal menjadi lebih tebal sehingga mampu mengisi pori-pori dalam campuran.

Penggunaan metode pencampuran bertahap memiliki nilai *TSR* yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap pada substitusi *filler* abu bauksit dapat mengurangi potensi terjadinya keretakan yang disebabkan gaya tarik akibat pengaruh cuaca, iklim dan perubahan suhu. Sejalan dengan penelitian Hidayat (2021), Mahza (2023), dan Ichwan (2023) yang menyatakan bahwa metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan nilai *TSR* yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Berbanding terbalik dengan penelitian Atthaullah (2024) pada campuran *Hot Rolled Asphalt (HRA)* dimana metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih rendah daripada metode konvensional dikarenakan kurangnya indeks penetrasi campuran.

5. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Index of Cantabro Loss (ICL)*

   Nilai *ICL* diperoleh melalui perbandingan nilai *CL* rendaman normal dengan *CL* rendaman 24 jam, dan dinyatakan dalam persen. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi durabilitas sekaligus mengukur seberapa besar campuran mampu menahan disintegrasi akibat keausan setelah terpapar air saat proses perendaman pada suhu 60±1ºC dalam *waterbath* selama 24 jam. Nilai *ICL* tidak disyaratkan secara khusus dalam standar dan peraturan manapun. Grafik hasil nilai *ICL* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.29 berikut.



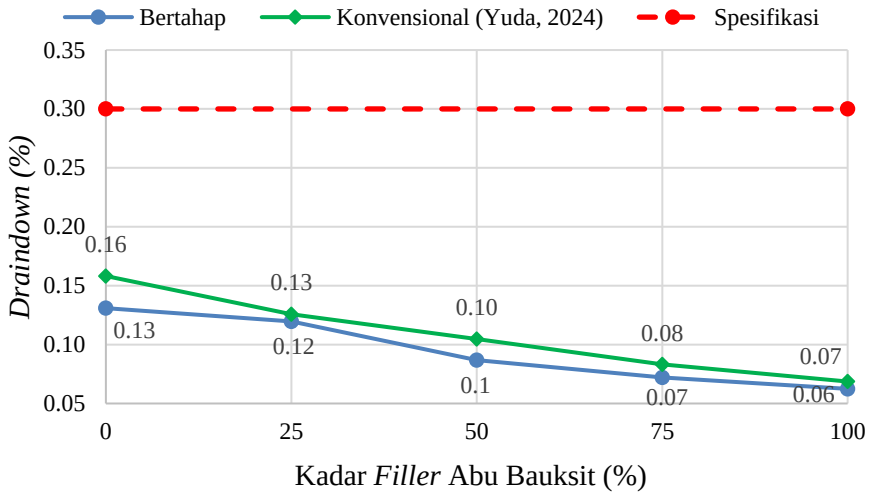
Gambar 5. 29 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *ICL*

Berdasarkan hasil *CL* yang telah diuraikan sebelumnya pada Gambar 5.21 sampai 5.23 pada parameter kekuatan struktur, nilai *CL* pada setiap kadar substitusi *filler* abu bauksit terjadi penurunan, baik dengan menggunakan metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap. Hal ini disebabkan sifat *pozzolan* pada abu bauksit yang menyebabkan viskositas aspal meningkat, sehingga ikatan antara aspal dengan agregat semakin baik. *CL* rendaman menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan *CL* normal.

Berdasarkan Gambar 5.29, terjadi penurunan nilai *ICL* pada metode pencampuran bertahap di kadar substitusi *filler* 100%. Hal tersebut dikarenakan oleh agregat yang tidak terikat dengan baik sehingga menimbulkan rongga pada campuran. Selain itu, keterbatasan jumlah sampel yang diuji juga dapat memengaruhi nilai *ICL*. Hal ini disebabkan karena penyerapan air ke agregat lebih besar sehingga memberikan dampak negatif terhadap sifat kohesi aspal. Sejalan dengan penelitian Liu, dkk (2019), Arrieta dan Maquilon (2014), dan Quesada, dkk (2021) menunjukkan bahwa sampel dalam keadaan basah menghasilkan persentase kehilangan yang lebih tinggi dibandingkan dalam keadaan kering.

6. Analisis Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Draindown*

Grafik hasil nilai *draindown* akibat pengaruh substitusi *filler* abu bauksit melalui perbandingan metode kovensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap pada campuran *SMA* dapat dililihat pada Gambar 5.30 berikut.



Gambar 5. 30 Grafik Pengaruh Kadar Substitusi *Filler* dengan Metode Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Draindown*

Berdasarkan Gambar 5.30, nilai *draindown* pada campuran *SMA* mengalami penurunan pada setiap penambahan kadar *filler* abu bauksit. Hal tersebut disebabkan oleh rekatan (*interlocking*) antar agregat meningkat akibat dari penambahan kadar abu bauksit yang dapat meningkatkan kohesi aspal. Pernyataan ini sejalan dengan Yuda (2024) bahwa penambahan kadar substitusi abu bauksit membuat campuran menjadi lebih homogen sehingga pemisahan aspal dengan agregat dalam campuran semakin kecil.

Penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *draindown* yang lebih rendah daripada metode konvensional, namun tidak begitu signifikan. Sejalan dengan penelitian Firdaus (2023) dan Iqbal dan Fauziah (2023) yang menyatakan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan campuran lebih homogen, serta mampu mengurangi

terjadinya pemisahan aspal pada agregat.

5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap

Rekapitulasi hasil pengujian campuran *SMA* menggunakan metode pencampuran bertahap dan metode konvensional dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut.

Tabel 5. 12 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	Stabilitas Konvensional (Kg)	853,64	895,75	911,71	922,98	1017,58	Semakin besar penambahan substitusi *filler* abu bauksit menyebabkan peningkatan nilai stabilitas.
	Stabilitas Bertahap (Kg)	867,86	917,48	931,01	955,71	1019,43	Semakin besar penambahan substitusi *filler* abu bauksit menyebabkan peningkatan nilai stabilitas. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai stabilitas yang lebih baik dibandingkan metode konvensional.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	*Flow* Konvensional (mm)	3,133	2,900	2,825	2,750	2,675	Semakin besar penambahan substitusi *filler* abu bauksit menyebabkan penurunan nilai *flow* sehingga membuat campuran menjadi keras dan kaku.
	Flow Bertahap (mm)	3,120	2,817	2,765	2,715	2,625	Semakin besar penambahan substitusi *filler* abu bauksit menyebabkan penurunan nilai *flow* sehingga membuat campuran menjadi keras dan kaku. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *flow* yang lebih rendah daripada metode konvensional.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Kekuatan Struktur	*MQ* Konvensional (kg/mm)	272,631	308,805	322,760	336,795	380,476	Nilai *MQ* mengalami peningkatan seiring penambahan kadar abu bauksit. Dengan demikian, campuran lebih tahan terhadap deformasi plastis.
	MQ Bertahap (kg/mm)	278,195	325,790	332,572	358,199	384,841	Nilai *MQ* mengalami peningkatan seiring penambahan kadar abu bauksit. Dengan demikian, campuran lebih tahan terhadap deformasi plastis. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *MQ* yang lebih tinggi.
	ITS Konvensional (kPa)	765,603	814,634	848,624	916,688	1007,119	Nilai *ITS* mengalami peningkatan seiring penambahan kadar abu bauksit. Dengan demikian, campuran memiliki ketahanan terhadap keretakan.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumetrik Campuran	*ITS* Bertahap (kPa)	766,032	829,310	871,007	946,010	1015,103	Nilai *ITS* mengalami peningkatan seiring penambahan kadar abu bauksit. Dengan demikian, campuran memiliki ketahanan terhadap keretakan. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *ITS* yang lebih tinggi.
	VITM Konvensional (%)	3,345	3,611	3,831	3,999	4,121	Semakin besar persentase penambahan abu bauksit, maka rongga dalam campuran semakin besar. Sehingga menyebabkan campuran menjadi *porous*.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumetrik Campuran	*VITM* Bertahap (%)	3,161	3,468	3,676	3,909	4,013	Semakin besar persentase penambahan abu bauksit, maka rongga dalam campuran semakin besar. Sehingga menyebabkan campuran menjadi *porous*. Metode pencampuran bertahap mampu menurunkan nilai *VITM*.
	VMA Konvensional (kPa)	17,557	17,780	17,965	18,104	18,205	Semakin besar penambahan kadar abu bauksit nilai *VMA* mengalami peningkatan. Menandakan bahwa jarak antar agregat dalam campuran semakin berjauhan.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumetrik Campuran	*VMA* Bertahap (kPa)	17,403	17,661	17,836	18,031	18,116	Semakin besar kadar abu bauksit, maka nilai *VMA* mengalami peningkatan sehingga jarak antar agregat dalam campuran semakin berjauhan. Metode pencampuran bertahap menghasilkan ikatan adhesi yang lebih kuat.
	VFWA Konvensional (%)	80,987	79,694	78,673	77,923	77,370	Semakin besar persentase penambahan abu bauksit menyebabkan penurunan nilai *VFWA*. Sehingga menyebabkan campuran menjadi rentan terhadap gangguan air.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumetrik Campuran	*VFWA* Bertahap (kPa)	81,851	80,366	79,387	78,321	77,850	Semakin besar persentase penambahan abu bauksit menyebabkan penurunan nilai *VFWA*. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai yang lebih tinggi.
	Density Konvensional (gr/cc)	2,290	2,283	2,277	2,273	2,269	Nilai *density* semakin menurun seiring dengan penambahan kadar abu bauksit, sehingga kepadatan campuran menjadi menurun.
	Density Bertahap (gr/cc)	2,294	2,286	2,281	2,275	2,272	Nilai *density* semakin menurun seiring dengan penambahan kadar abu bauksit. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *density* yang lebih tinggi.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Volumetrik Campuran	*VCA* Konvensional	0,807	0,811	0,815	0,819	0,821	Nilai *VCA* cenderung meningkat seiring dengan penambahan kadar abu bauksit. Hal ini dipengaruhi berat jenis masing-masing kadar. Namun, nilai *VCA* masih masuk syarat < 1,0.
	VCA Bertahap	0,716	0,722	0,725	0,730	0,732	Nilai *VCA* cenderung meningkat seiring dengan penambahan kadar abu bauksit. Namun, nilai *VCA* masih masuk syarat < 1,0. Metode pencampuran bertahap menghasilkan *stone-on-stone contact* yang lebih baik

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas Campuran	*IRS* Konvensional (%)	95,75	96,51	98,11	98,43	98,70	Nilai *IRS* mengalami peningkatan seiring penambahan kadar abu bauksit. Dengan demikian, campuran lebih tahan terhadap air, cuaca, dan perubahan suhu.
	IRS Bertahap (%)	94,52	95,91	98,31	98,85	99,28	Nilai *IRS* mengalami peningkatan seiring penambahan kadar abu bauksit. Dengan demikian, campuran lebih tahan terhadap air, cuaca, dan perubahan suhu. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *IRS* yang lebih tinggi.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas Campuran	IDP Konvensional (%)	0,185	0,152	0,082	0,068	0,056	Nilai IDP mengalami penurunan pada setiap kadar substitusi abu bauksit. Campuran memiliki kekuatan terhadap perendaman yang lebih baik.
	IDP Bertahap (%)	0,238	0,178	0,074	0,050	0,031	Nilai IDP mengalami penurunan pada setiap kadar substitusi abu bauksit. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai IDP yang lebih baik dibandingkan metode konvensional
	IDK Konvensional (%)	2,126	1,745	0,945	0,783	0,648	Nilai IDK mengalami penurunan pada setiap kadar substitusi abu bauksit. Campuran memiliki kemampuan mempertahankan kekuatannya terhadap perendaman satu hari.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas Campuran	IDK Bertahap (%)	2,739	2,045	0,847	0,577	0,360	Nilai IDK mengalami penurunan pada setiap kadar substitusi abu bauksit. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai IDK yang lebih baik dibandingkan metode konvensional
	TSR Konvensional (%)	90,689	93,504	94,691	95,247	96,562	Nilai *TSR* mengalami peningkatan pada setiap kadar substitusi abu bauksit. Hal ini mengindikasikan bahwa campuran tahan terhadap pengaruh cuaca, iklim dan perubahan suhu.
	TSR Bertahap (%)	93,458	93,874	95,626	96,230	97,434	Metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan nilai *TSR* yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas Campuran	*CL* Konvensional (%)	18,41	15,21	13,84	12,82	11,38	Semakin besar penambahan kadar abu bauksit mengindikasikan bahwa campuran memiliki ketahanan disintegrasi yang baik akibat beban lalu lintas berulang.
	CL Bertahap (%)	15,24	13,58	12,50	12,16	9,53	Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *CL* yang lebih rendah daripada metode konvensional, disintergasi semakin kecil.

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler* Abu Bauksit pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Metode Konvensional oleh Yuda (2024) dan Metode Pencampuran Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi *Filler* Abu Bauksit (%)					Keterangan
		0	25	50	75	100	
Durabilitas Campuran	*Draindown* Konvensional (%)	0,16	0,13	0,11	0,08	0,07	Semakin besar penambahan kadar abu bauksit maka nilai *draindown* mengalami penurunan. Sehingga membuat campuran menjadi lebih homogen.
	Draindown Bertahap (%)	0,13	0,13	0,10	0,07	0,06	Semakin besar penambahan kadar abu bauksit maka nilai *draindown* mengalami penurunan. Metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *draindown* yang lebih rendah daripada metode konvensional, namun tidak begitu signifikan.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis perhitungan yang telah dilakukan tentang pengaruh substitusi *filler* abu bauksti melalui perbandingan metode konvensional oleh Yuda (2024) dan metode pencampuran bertahap terhadap karakteristik campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*, maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Penambahan subsitusi abu bauksit menghasilkan peningkatan rongga dan penurunan kepadatan campuran pada parameter volumetrik campuran. Hal tersebut ditandai dengan nilai meningkatnya nilai *VITM* dan *VMA* serta menurunnya nilai *VFWA* dan *density*. Hasil pada setiap parameter pengujian menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap menghasilkan rongga dalam campuran yang lebih kecil dibandingkan metode konvensional.
2. Penggunaan abu bauksit sebagai substitusi pada campuran *SMA* memiliki pengaruh positif meningkatkan kekuatan struktur. Hal ini ditandai dengan meningkatnya nilai stabilitas, *MQ*, dan kuat tarik tak langsung, serta menurunnya nilai *flow* dan *Cantabro Loss* pada setiap penambahan substitusi abu bauksit, baik dengan menggunakan metode konvensional maupun metode pencampuran bertahap. Hasil pada setiap parameter pengujian kekuatan struktur menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap menghasilkan kekuatan struktur yang lebih baik dibandingkan metode konvensional.
3. Semakin banyak penambahan substitusi *filler* abu bauksit berpengaruh terhadap ketahanan campuran yang lebih baik. Ditandai dengan meningkatnya nilai *IRS*, *TSR*, dan *ICL* serta menurunnya nilai IDP, IDK, dan *Draindown*. Penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai durabilitas yang lebih unggul dibandingkan metode konvensional.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian tentang penggunaan abu bauksit sebagai substitusi *filler* dengan perbandingan metode pencampuran bertahap dan metode konvensional oleh Yuda (2024), maka peneliti memberikan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Perlu diteliti lebih dalam mengenai senyawa kimiawi yang terkandung dalam abu bauksit.
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang penggunaan abu bauksit sebagai substitusi *filler* dengan menggunakan variasi bahan ikat dan berbagai metode pencampuran pada campuran lain.
3. Perlu adanya eksperimen terkait penggunaan abu bauksit sebagai bahan pengganti agregat halus atau *filler*.
4. Penelitian ini tidak menguji stabilitas dinamis campuran, sehingga diharapkan pada penelitian selanjutnya menggunakan pengujian tersebut.
5. Perlu membahas segi keekonomisan penggunaan metode pencampuran bertahap.

DAFTAR PUSTAKA

Abdillah, A.F., Pradani, N., & Batti, J.F. 2018. Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Viatop66 pada Campuran *Stone Matrix Asphalt* Terhadap Titik Lembek Aspal dan Sifat *Drain Down* Campuran. *Jurnal HPJI* (*Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia*), *4*(1), 49-58.

Adji. E.W., 2024. Inilah Jumlah Kendaraan Di Indonesia Dua Bulan Pertama 2024. (https://otodriver.com/berita/2024/inilah-jumlah-kendaraan-di-indonesia-dua-bulan-pertama-2024-iniddjba024 . Diakses tanggal 25 Juli 2024).

Aliyu Yaro, N. S., Napiah, M.B., Sutanto, M.H., Usman, A., dan Saeed, S.M. 2021. *Performance Evaluation of Waste Palm Oil Fiber Reinforced Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Traditional And Sequential Mixing Processes*. Universiti Teknologi PETRONAS, Department of Civil and Environmental Engineering. Malaysia.

American Association of State Highway and Transportation Official. 2013. *Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)*. AASHTO Designation: R 46-08 (2012). Washington , D.C.

American Association of State Highway and Transportation Official. 2015. *Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA)*. AASHTO designation: M 325-08 (2012). Washington , D.C.

Arrieta, V.S., dan Maquilon, J. E. C. 2014. *Resistance to Degradation or Cohesion Loss in Cantabro Test on Specimens of Porous Asphalt Friction Courses*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 162 (2014) : 290 – 299

Banafsaj, H.H. 2018. Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt* Dengan Bahan Ikat Aspal Pertamina Pen 60/70 Dengan *Filler* Abu Sekam Padi Akibat Lama Rendaman Air Laut. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Blazejowski, K. 2011. *Stone Matrix Asphalt – Theory and Practice*. CRC Press. Newyork.

Borra, C.R., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K. dan Van Gerven, T., 2016. *Recovery of Rare Earths and Other Valuable Metals From Bauxite Residue*

(Red Mud): *A Review*. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 365 – 386.

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

Direktorat Jenderal Bina Marga. 2018. *Spesifikasi Umum. Edisi 2018 (Rev. 2*). Penerbit Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.

Fauziah, M., Sukarno., Syaifurrohman, I., Marzuko, A., dan Denny. 2012. Studi Eksperimental Pengunaan *Fly Ash* Sebagai *Additive* Terhadap Kinerja Beton Aspal Sebagai Upaya Pemanfaatan Material Limbah. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS)*, *2*(1), 54-63.

Firdaus, M., 2023. Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Kinerja *Hot Rolled Asphalt* (*HRA*). *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

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

Hesami, E., Birgisson, B., Kringos, N. 2014. *Effect of Mixing Sequence On The Workability and Performance of Asphalt Mixture*. Penelitian. Sweden.

Hidayat, M. I. (2021). Pengaruh Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* Dengan Baan Ikat Aspal Pen 60/70 Dan Aspal *Crumb Rubber*. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

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

Ichwan. M. 2023. Perbandingan Kinerja Campuran *AC – BC* Dengan Metode Pencampuran Konvensional Dan Metode Pencampuran Dua Tahap. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Iqbal., dan Fauziah, M. 2023. Pengaruh Penambahan Serbuk Ban Karet Terhadap Karakteristik Campuran *Hot Rolled Sheet* Dengan Metode Pencampuran Konvensional Dan Bertahap. *Jurnal Teknik*, *44*(2), 167-175.

Kiselev, A., Zhang, H., and Liu, Z. 2021. *The Effect of Two-Phase Mixing on the Functional and Mechanical Properties of TPS/SBS-modified Porous Asphalt Concrete*. *Construction and Building Materials*, 270, 121841.Jacobsson, T., 2009, VVKB Flödesblandad asfalt av typ KGO-III. Stockholm: Swedish Transport Administration.

Kok B V dan Kologlu N. 2011. *Effects of Two-Phase Mixing Method on Mechanical Properties of Hot Mix Asphal*. Firat University, Civil Engineering Department Elazig, Turkey.

Lisantono, A., Husin., Utomo, J., dan Divanta Purba, Y.H. 2018. Pemanfaatan Batu Bauksit Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Beton Geopolimer Berbasis *Fly Ash*. *Konferensi Nasional Sipil 12*, 75 – 82.

Liu, M., Han, S., Wang, Z., Ren, W., dan Li, W. 2019. *Performance Evaluation of New Waterborne Epoxy Resin Modified Emulsified Asphalt Micro-Surfacing*. *Construction and Building Materials*, *214*, 93 – 100.

Mahza, F., 2023. Perbandingan Kinerja *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia.

Metekohy, J.G., Amaheka, S.G., dan Latupeirissa, H.B. 2022. Pengaruh Serat Selulosa Terhadap Nilai Stabilitas *Marshall* pada Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. *DINTEK, 15(1),* 48 – 52.

NAPA. 2002. *Designing and Constructing SMA Mixtures – State of the Practice*. Quality Improvement Series 122. Maryland.

Octavian, R. 2024. Pengaruh Limbah Serbuk Besi Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Prasetya, D., (2024). Pemanfaatan *Fly Ash* Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik *Stone Matrix Asphalt*. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Rabihati, E., Purnama, I.A., Adjie, M.S., dan Rachmawan, V.D. 2020. Pemanfaatan Limbah Bauksit (*Tailing Bauxite*) Sebagai Bahan Pengganti Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Dan Modulus Elastisitas Pada

Beton. *Jurnal Rekayasa Sipil*, *1*(1), 16 – 22.

Ramadhan, F., dan Fauziah, M. 2020. Kinerja Campuran *SMA* Dengan Menggunakan Pasir Pantai Indrayanti Sebagai Pengganti Agregat Halus. *Teknisia*, *15*(1), 34 – 42.

Ratnasari, A.K., Sutoyo, L.A., dan Putri, A.R., 2023. Pengaruh Limbah Abu Kayu Bakar Sebagai *Filler* Pada Campuran *Aspal Concreat - Binder Course* (*AC-BC*). *Seminar Nasional 2023*, 4(2), 199 – 206.

Standar Nasional Indonesia. 2015. Spesifikasi *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Penerbit Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

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

Sukirman, S. 2003. *Beton Aspal Campuran Panas*. Yayasan Obor Indonesia. Jakarta.

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

Subarkah, 2015. *Modul Praktikum Bahan Perkerasan Jalan*. Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Tahir, A., Mashuri., dan Arifin, S. 2018. Karakteristik *Draindown* Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* yang Menggunakan *Filler* Abu – Batu dan Semen. *Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi ke-21, 21*(20), 1 – 12.

Tolab, L.Z. dan Fauziah, M. 2024. *The Effect of Geothermal Waste as Filler Substitution on Stone Matrix Asphalt (SMA) Characteristics*. *Jurnal Rekayasa Sipil*, *18*(3), 172 – 178.

Utami, P. D. 2018. Perancangan Laboratorium Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* Menggunakan Aspal Shell Pen 60/70 dan Aspal Modifikasi Elvaloy. *Tesis*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

Wahyudi, A. T. 2019. Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Campuran *Superpave* dan Aspal Porus. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Yuda, H. N. 2024. Pengaruh Abu bauksit Sebagai Substitusi *Filler* Terhadap Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. *Tugas Akhir*.

Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Yusuf, N. dan Fauziah, M. 2018. Pengaruh Durasi Rendaman Air Laut Terhadap Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt* Yang Menggunakan Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 Dan Starbit E-55. *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil 12*, *12*, 37 – 45.

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)	23,65	20,25
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	46,48	42,81
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	22,83	22,56
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	24,80	21,30
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,15	1,05
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	46,54	42,85
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	21,74	21,55
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	1,09	1,01
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,06	1,04
10	Rata-rata BJ Aspal	1,047	

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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

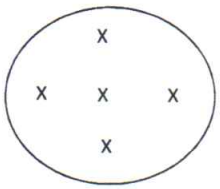
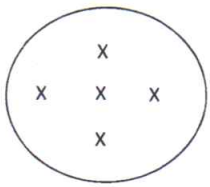
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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	130 ^{o}C	10.30 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	130 ^{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	62	61			
2	70	64			
3	63	65			
4	64	70			
5	68	68			
Rata2	65,4	65,6			
Rata2	65,5				

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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	09.00 WIB	
	Selesai pemanasan	130 ^{o}C	09.15 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	130 ^{o}C	09.15 WIB	
	Selesai	27 ^{o}C	10.20 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	27 ^{o}C	10.20 WIB	
	Selesai	325 ^{o}C	11.00 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	270 ^{o}C	290 ^{o}C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	270 ^{o}C	290 ^{o}C	

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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	28 ^{o}C	9,00 WIB	
	Selesai pemanasan	135 ^{o}C	9,15 WIB	
2	**Didiamkan pada suhu ruang**			
	Mulai	135 ^{o}C	9,30 WIB	
	Selesai	28 ^{o}C	11,00 WIB	
3	**Diperiksa**			
	Mulai	5 ^{o}C	11,00 WIB	
	Selesai	48 ^{o}C	11,14 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	103 detik	103 detik		
3	15 ^{o}C	209 detik	209 detik		
4	20 ^{o}C	301 detik	301 detik		
5	25 ^{o}C	386 detik	386 detik		
6	30 ^{o}C	464 detik	464 detik		
7	35 ^{o}C	664 detik	664 detik		
8	40 ^{o}C	666 detik	666 detik		
9	45 ^{o}C	766 detik	766 detik		
10	50 ^{o}C	823 detik	792 detik	48^{o}C	48^{o}C
11	55 ^{o}C				
12	60 ^{o}C				

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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	27 ^{o}C
		Selesai	13:20 WIB	27 ^{o}C
2	Penimbangan	Mulai	13:30 WIB	27 ^{o}C
3	Pelarutan	Mulai	13:40 WIB	27 ^{o}C
4	Penyaringan	Mulai	13:45 WIB	27 ^{o}C
		Selesai	14:15 WIB	27 ^{o}C
5	Di Oven	Mulai	14:15 WIB	110 ^{o}C
6	Peminbangan	Mulai	14:30 WIB	27 ^{o}C

Hasil pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Benda Uji				Keterangan
		1		2		
1	Berat erlen meyer kosong	63,51	gr	63,590	gr	
2	Berat erlen meyer kosong + Aspal	65,22	gr	65,440	gr	
3	Berat Aspal (2 - 1)	1,710	gr	1,850	gr	
4	Berat kertas saring bersih	0,588	gr	0,580	gr	
5	Berat kertas saring bersih + mineral	0,589	gr	0,600	gr	
6	Berat mineral (5 - 4)	0,001	gr	0,020	gr	
7	Prosentase mineral (6/3x100%)	0,058	%	1,081	%	
8	Aspal yang larut (100% - 7)	99,942	%	98,919	%	
9	Rata-rata Aspal yang larut (%)	99,430			%	

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium/Urusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kelab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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	1631,64	1627,16	1629,40
2	Berat benda uji dalam Air (BA) gr	1000,92	1000,24	1001
3	Berat benda uji dkering oven (BK) gr	1590,57	1589,13	1589,85
4	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(BJ - BA}$	2,522	2,535	2,528
5	Berat jenis (SSD) = $\frac{BJ}{(BJ - BA}$	2,587	2,595	2,591
6	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(BK - BA)}$	2,697	2,699	2,698
7	Penyerapan air = $\frac{(BJ - BK)}{BK} \times 100\%$	2,582	2,393	2,488
8	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,610	2,617	2,613

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berhan 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

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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°C	8:00 WIB	
	Selesai	150°C	8:15 WIB	
2	**Didiamkan Pada Suhu Ruang**			
	Mulai	150°C	8:15 WIB	
	Selesai	25°C	9:45 WIB	
3	**Perendaman benda uji**			
	Mulai	25°C	9:45 WIB	
	Selesai	25°C	10:15 WIB	

Hasil pemeriksaan

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

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh	Mengetahui	Peneliti
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil	Kalab. Jalan Raya	
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.	Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T.	Ibnu Kholid
NIK : 01 511 0101	NIK : 21 511 1307	NIM : 20 511 318

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 *Loss 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	2500,00	
7	12.5 mm (0.5")	09.5 mm (3/8")	2500,00	2500,00	
8	09.5 mm (3/8")	06.3 mm (1/4")			
9	06.3 mm (1/4")	04.75 mm (4")			
10	04.75 mm (No.4)	02.36 mm (No.8)			
11	JUMLAH BENDA UJI (A)		5000,00	4659,00	
12	JUMLAH TERTAHAN DI SIEVE 12(B)		4659,00	3775,00	
13	KEAUSAN 100x = $\frac{(A-B)}{A} \times 100\%$		6,820	18,974	
17	Rata-rata Keausan (%)		12,90		

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 Halus
3 Diuji Pada : 2024

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	501,85	501,05	
2	Berat Vicnometer + Air (B) gr	692,85	668,40	
3	Berat Vicnometer + Air + benda uji (BT) gr	995,24	972,01	
4	Berat benda uji kering oven (BK)	494,55	490,75	
5	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(B+500)-BT}$	2,503	2,499	2,501
6	Berat jenis (SSD) = $\frac{500}{(B+500)-BT}$	2,530	2,546	2,538
7	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(B+BK)-BT}$	2,574	2,622	2,598
8	Penyerapan air = $\frac{(500-BK)}{BK}\times 100\%$	1,102	1,885	1,493
9	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,538	2,561	2,549

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bertian Kushadi, 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

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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	13,24	13,25	
		Selesai	13,35	13,35	
2	Waktu pengendapan (benda uji setelah digojok sebanyak 90x, dan di tambah larutan $CaCl_2$)	Mulai	13,40	13,40	
		Selesai	13,55	13,55	
4	Clay reading (Pembacaan Lumpur) Inchi		5,80	5,65	5,73
5	Sand reading (Pembacaan Pasir)		5,15	5,30	5,23
6	$Sand\ Eqiuvalent = \frac{Sand\ Reading}{Clay\ Reading} \times 100\ \%$		88,79	93,81	91,30
7	Kandungan Lumpur = 100 - SE		11,21	6,19	8,70

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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	20,40	23,78	
2	Berat Vicnometer + Air gr	42,91	46,97	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,51	23,19	
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	28,50	30,36	
5	Berat *Filler* (4-1) gr	8,100	6,580	7,34
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	47,810	50,970	49,39
7	Berat Aquadest (6-4) gr	19,310	20,610	19,96
8	Volume *Filler* (3-7) gr	3,200	2,580	2,89
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	2,531	2,550	2,541

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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* Abu Bauksit

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	24,28	24,08	
2	Berat Vicnometer + Air gr	46,39	47,25	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,11	23,17	
4	Berat Vicnometer + *Filler* gr	27,82	29,32	
5	Berat *Filler* (4-1) gr	3,540	5,240	4,39
6	Berat Vicnometer + *Filler* + Aquadest gr	48,940	48,860	48,90
7	Berat Aquadest (6-4) gr	21,120	19,540	20,33
8	Volume *Filler* (3-7) gr	0,990	3,630	2,31
9	Berat Jenis *Filler* = Berat/Vol (5/8)	3,576	1,444	2,510

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 Sifat Campuran dengan Metode *Marshall*

HASIL PENGUJIAN MARSHALL UNTUK MENENTUKAN KADAR ASPAL OPTIMUM (KAO) ASPAL PEN 60/70

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Sampel	Tinggi (cm)	(%)	(%)	Udara (gram)	*SSD* (gram)	Air (gram)	Volume (gram)	*Density*					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas	Kalibrasi Proving Ring	Arloji Stability	Tebal Koreksi	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	MQ
	t	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		R	S	T
5.5%	69.38	5.82	5.50	1189.25	1210.50	677.21	533.29	2.230	2.401	11.715	81.150	7.135	18.85	62.147	7.14	53	14.31779	758.84	0.89	675.37	3.48	194.07
	71.61	5.82	5.50	1192.12	1202.96	680.20	522.76	2.280	2.401	11.979	82.985	5.036	17.02	70.403	5.04	55	14.31779	787.48	0.83	651.51	3.30	197.43
	67.58	5.82	5.50	1193.74	1205.25	676.14	529.11	2.256	2.401	11.852	82.100	6.048	17.90	66.211	6.05	59	14.31779	844.75	0.91	767.03	2.50	306.81
								2.268					**17.46**	**68.31**	**5.54**					**709.27**	**2.90**	**252.12**
6%	70.26	6.38	6.00	1185.53	1199.41	674.41	525.00	2.258	2.385	12.941	81.739	5.320	18.26	70.865	5.32	55	14.31779	787.48	0.88	689.52	3.45	199.86
	69.45	6.38	6.00	1216.01	1228.32	690.03	538.29	2.259	2.385	12.946	81.771	5.284	18.23	71.015	5.28	57	14.31779	816.11	0.89	726.34	3.55	204.60
	70.36	6.38	6.00	1189.71	1201.60	676.11	525.49	2.264	2.385	12.974	81.951	5.075	18.05	71.882	5.08	60	14.31779	859.07	0.87	748.76	2.60	287.99
								2.260					**18.18**	**71.25**	**5.23**					**721.54**	**3.20**	**230.82**
6.5%	68.00	6.95	6.50	1181.43	1189.74	667.31	522.43	2.261	2.369	14.039	81.422	4.539	18.58	75.568	4.54	62	14.31779	887.70	0.898	796.79	4.30	185.30
	69.56	6.95	6.50	1187.60	1201.54	673.08	528.46	2.247	2.369	13.952	80.913	5.135	19.09	73.095	5.14	56	14.31779	801.80	0.890	713.60	3.25	219.57
	68.75	6.95	6.50	1213.06	1221.50	690.42	531.08	2.284	2.369	14.180	82.240	3.580	17.76	79.844	3.58	54	14.31779	773.16	0.890	688.11	3.80	181.08
								2.273					**18.17**	**77.71**	**4.06**					**742.45**	**4.05**	**183.19**
7.0%	68.50	7.53	7.00	1194.18	1198.74	670.25	528.49	2.260	2.353	15.107	80.922	3.971	19.08	79.185	3.97	56	14.31779	801.80	0.89	713.60	4.60	155.13
	65.24	7.53	7.00	1161.83	1184.46	684.51	499.95	2.324	2.353	15.537	83.224	1.239	16.78	92.613	1.24	59	14.31779	844.75	0.95	802.78	3.90	205.84
	69.36	7.53	7.00	1184.20	1193.41	662.05	531.36	2.229	2.353	14.900	79.812	5.288	20.19	73.806	5.29	57	14.31779	816.11	0.89	726.34	3.70	196.31
								2.292					**17.93**	**85.90**	**2.61**					**758.19**	**4.25**	**180.49**
7.5%	67.51	8.11	7.50	1195.44	1200.57	679.56	521.01	2.294	2.337	16.436	81.728	1.836	18.27	89.953	1.84	52	14.31779	744.53	0.91	677.33	4.70	144.11
	62.82	8.11	7.50	1188.55	1196.02	668.65	527.37	2.254	2.337	16.144	80.277	3.579	19.72	81.855	3.58	54	14.31779	773.16	0.90	696.94	4.50	154.88
	62.51	8.11	7.50	1187.21	1196.64	677.66	518.98	2.288	2.337	16.387	81.483	2.130	18.52	88.495	2.13	51	14.31779	730.21	0.93	681.42	4.25	160.33
								2.279					**18.84**	**86.77**	**2.51**					**685.23**	**4.48**	**153.11**

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berman Kuchari, M.Eng, IPM, ASEAN Eng.
NIK : 21511 0104

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 Sifat Campuran dengan Metode *IRS*

HASIL PENGUJIAN IRS UNTUK MENENTUKAN KADAR ASPAL OPTIMUM (KAO) ASPAL PEN 60/70

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Persen Aspal		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Berat (g)			Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi			
																Tebal Sampel		Koreksi	
		1	2	3	rata2		Udara	Dalam Air	SSD	Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX
5.5%	1	69.71	70.90	69.92	70.18	0.88	1203.42	696.71	1211.31	51	14.31779	730.21	641.80	631.78	600	69.9	71.4	0.89	0.83
	2	67.13	67.01	67.77	67.30	0.91	1186.93	677.44	1196.52	49	14.31779	701.57	641.88			66.7	68.3	0.93	0.89
	3	69.49	68.00	68.30	68.60	0.89	1184.87	678.03	1196.17	48	14.31779	687.25	611.66			68.3	69.9	0.89	0.89
6.0%	1	72.29	71.43	72.14	71.95	0.82	1189.82	681.81	1197.49	52	14.31779	744.53	612.81	658.09	600	71.4	73	0.83	0.81
	2	67.75	69.04	67.84	68.21	0.89	1189.67	683.80	1199.91	53	14.31779	758.84	677.08			66.7	68.3	0.93	0.89
	3	70.59	70.42	70.26	70.42	0.87	1202.62	692.77	1209.74	55	14.31779	787.48	684.37			69.9	71.4	0.89	0.83
6.5%	1	69.32	71.32	70.16	70.27	0.88	1204.14	688.26	1210.65	54	14.31779	773.16	676.77	675.42	600	69.9	71.4	0.89	0.83
	2	70.48	70.87	70.85	70.73	0.86	1193.52	682.72	1199.48	56	14.31779	801.80	686.87			69.9	71.4	0.89	0.83
	3	68.78	68.98	69.43	69.06	0.89	1182.41	681.46	1190.35	52	14.31779	744.53	662.63			68.3	69.9	0.89	0.89
7.0%	1	64.94	64.05	64.34	64.44	0.98	1166.87	668.79	1172.78	52	14.31779	744.53	726.97	713.21	600	63.5	65.1	1	0.96
	2	65.64	65.07	65.50	65.40	0.95	1178.72	674.45	1183.79	53	14.31779	758.84	724.17			65.1	66.7	0.96	0.93
	3	66.99	65.36	65.69	66.01	0.94	1191.45	681.41	1195.78	51	14.31779	730.21	688.49			65.1	66.7	0.96	0.93
7.5%	1	67.18	66.73	66.15	66.69	0.93	1190.62	679.25	1193.99	50	14.31779	715.89	665.96	669.68	600	65.1	66.7	0.96	0.93
	2	66.78	66.31	65.74	66.28	0.94	1198.13	686.84	1202.30	51	14.31779	730.21	684.89			65.1	66.7	0.96	0.93
	3	67.18	65.42	66.19	66.26	0.94	1162.16	668.04	1167.82	49	14.31779	701.57	658.21			65.1	66.7	0.96	0.93

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng.(PM.), ASEAN.Eng.
NIK : 05 511 019

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 Sifat Campuran *VCA*

PEMERIKSAAN KADAR ASPAL DARI VOIDS IN COURSE AGGREGATE (VCA)

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Benda Uji	Berat (gram)		Volume Silinder (cm^3)	Y_s ($gram/cm^3$)	Y_w ($gram/cm^3$)	G_{CA} ($gram/cm^3$)	VCA_{DRC} (%)
	Wadah + Camp. Agg Kasar	Wadah					
A	8137.00	3983.00	2915.79	1.42	0.997	2.53	43.46
B	8157.30	3983.00	2915.79	1.43	0.997	2.53	43.18
C	8143.29	3983.00	2915.79	1.43	0.997	2.53	43.37
Rata-Rata							43.339

Kadar Aspal	Benda Uji	Gmb	GCA	PCA (%)	VCAMIX (%)	VCAMIX/ VCADRC	Spesifikasi
5.5%	1.00	2.230	2.528	76	32.967	0.761	OK
	2.00	2.280	2.528	76	31.451	0.726	OK
	3.00	2.256	2.528	76	32.182	0.743	OK
	Rata-Rata				32.200	0.743	OK
6%	1.00	2.258	2.528	76	32.121	0.741	OK
	2.00	2.259	2.528	76	32.095	0.741	OK
	3.00	2.264	2.528	76	31.945	0.737	OK
	Rata-Rata				32.054	0.740	OK
6.5%	1.00	2.261	2.528	76	32.023	0.739	OK
	2.00	2.247	2.528	76	32.448	0.749	OK
	3.00	2.284	2.528	76	31.340	0.723	OK
	Rata-Rata				31.937	0.737	OK
7.0%	1.00	2.260	2.528	76	32.078	0.740	OK
	2.00	2.324	2.528	76	30.145	0.696	OK
	3.00	2.229	2.528	76	33.009	0.762	OK
	Rata-Rata				31.744	0.732	OK
7.5%	1.00	2.294	2.528	76	31.030	0.716	OK
	2.00	2.254	2.528	76	32.254	0.744	OK
	3.00	2.288	2.528	76	31.237	0.721	OK
	Rata-Rata				31.507	0.727	OK

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 Sifat Campuran *Draindown*

HASIL PENGUJIAN *DRAINDOWN*

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Kadar Aspal (%)	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
5,5%	1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1522.25	1533.01	1538.24
	2	Berat Benda Uji, (C)(gr)	1185.98	1193.42	1192.55
	3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	336.27	339.59	345.69
	4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	336.39	339.72	345.87
	5	*Draindown* (%)	0.01	0.01	0.02
	6	Rata-rata *Draindown*		0.01	
6%	1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1521.32	1538.83	1521.12
	2	Berat Benda Uji, (gr)	1183.04	1193.53	1185.13
	3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	338.28	345.3	335.99
	4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	338.83	345.68	336.15
	5	*Draindown* (%)	0.05	0.03	0.01
	6	Rata-rata *Draindown*		0.03	
6,5%	1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1523.22	1456.55	1534.16
	2	Berat Benda Uji, (gr)	1187.83	1182.83	1194.03
	3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	335.39	273.72	340.13
	4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	335.92	274.13	340.87
	5	*Draindown* (%)	0.04	0.03	0.06
	6	Rata-rata *Draindown*		0.05	
7%	1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1461.12	1513.46	1523.31
	2	Berat Benda Uji, (gr)	1187.54	1177.02	1185.77
	3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	273.58	336.44	337.54
	4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	274.92	337.85	338.76
	5	*Draindown* (%)	0.11	0.12	0.10
	6	Rata-rata *Draindown*		0.11	
7,5%	1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1522.80	1519.75	1458.73
	2	Berat Benda Uji, (gr)	1180.48	1174.51	1184.61
	3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	342.32	345.24	274.12
	4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	344.43	348.10	276.47
	5	*Draindown* (%)	0.18	0.24	0.20
	6	Rata-rata *Draindown*		0.21	

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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

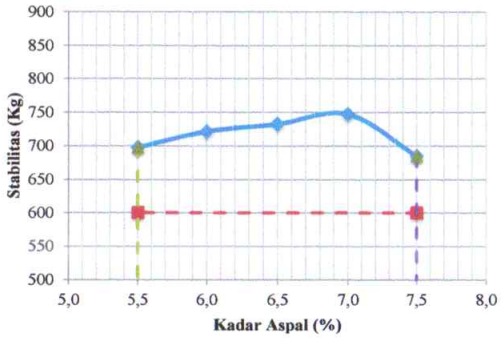
Lampiran 18 Rekapitulasi Perhitungan KAO

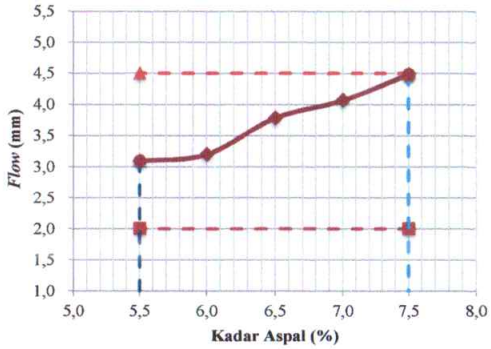
REKAPITULASI PERHITUNGAN KAO

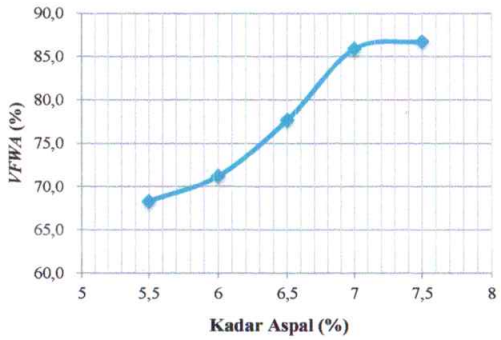
Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

SPESIFIKASI Stone Matrix Asphalt *(SMA)*	Kadar Aspal (%)	Stabilitas (kg)	*Flow* (mm)	VITM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)	*Draindown* (%)
	5.5	697.97	3.09	5.54	17.46	68.31	631.78	90.52	0.01
	6	721.54	3.20	5.23	18.18	71.25	658.09	91.21	0.03
	6.5	732.83	3.78	4.06	18.17	77.71	675.42	92.17	0.05
	7	747.57	4.07	2.61	17.93	85.90	713.21	95.40	0.11
	7.5	685.23	4.48	2.51	18.84	86.77	669.68	97.73	0.21
BINA MARGA 2018		**> 600**	**2-4,5**	**3 - 5**	**> 17**		**>600**	**>90**	**<0,3**







Disahkan Oleh
Manager Laboratorium/Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 001 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

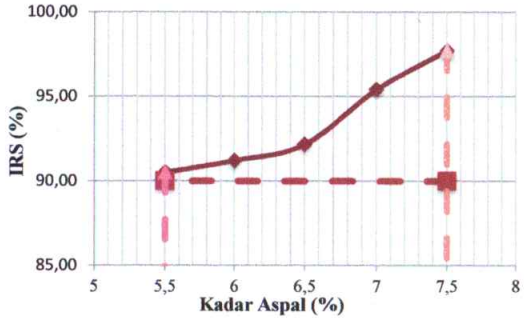
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

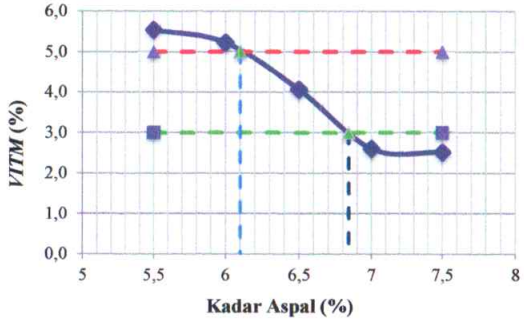
Lampiran 18 Rekapitulasi Perhitungan KAO

REKAPITULASI PERHITUNGAN KAO

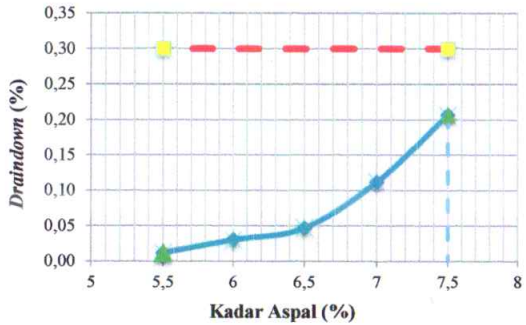
Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

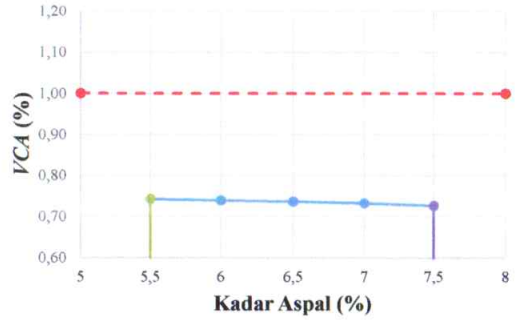
Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

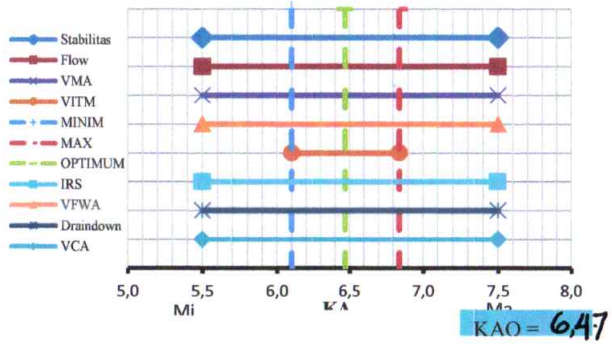












KAO = 6,47

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Bernadeta Tarigan, M.Eng., IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 015110101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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* dengan Metode Pencampuran Bertahap

HASIL PENGUJIAN *MARSHALL* METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Sampel	Tinggi (cm)	(%)	(%)	Udara (gram)	*SSD* (gram)	Air (gram)	Volume (gram)	*Density*					VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)		Kalibrasi *Proving Ring*		Tebal Koreksi	Stab. (kg)	*Flow* (mm)	MQ
	t	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		R	S	T
0.0%	68.15	6.95	6.50	1179.87	1191.27	676.35	514.92	2.291	2.369	14.225	82.500	3.275	17.50	81.288	3.27	68	14.31779	973.61	0.8938	870.25	3.09	281.63
	68.38	6.95	6.50	1173.64	1185.43	672.75	512.68	2.289	2.369	14.212	82.423	3.365	17.58	80.856	3.37	69	14.31779	987.93	0.8900	879.26	3.12	281.81
	68.29	6.95	6.50	1178.61	1191.72	679.64	512.08	2.302	2.369	14.289	82.869	2.842	17.13	83.410	2.84	67	14.31779	959.29	0.8903	854.09	3.15	271.14
25%	68.63	6.95	6.50	1184.41	1196.23	678.37	517.86	2.287	2.368	14.199	82.371	3.430	17.63	80.542	3.43	71	14.31779	1016.56	0.8900	904.74	2.82	320.83
	69.43	6.95	6.50	1176.39	1176.16	661.70	514.46	2.287	2.368	14.196	82.354	3.450	17.65	80.447	3.45	73	14.31779	1045.20	0.8900	930.23	2.78	334.61
	69.22	6.95	6.50	1176.50	1189.45	674.56	514.89	2.285	2.368	14.185	82.293	3.522	17.71	80.110	3.52	72	14.31779	1030.88	0.8900	917.48	2.85	321.92
50.0%	69.03	6.95	6.50	1173.06	1187.58	673.22	514.36	2.281	2.368	14.159	82.160	3.682	17.84	79.363	3.68	74	14.31779	1059.52	0.8900	942.97	2.83	333.20
	67.68	6.95	6.50	1179.98	1191.81	674.48	517.33	2.281	2.368	14.160	82.170	3.670	17.83	79.418	3.67	70	14.31779	1002.25	0.9055	907.53	2.80	324.12
	67.74	6.95	6.50	1182.00	1195.39	677.13	518.26	2.281	2.368	14.159	82.163	3.678	17.84	79.380	3.68	71	14.31779	1016.56	0.9041	919.06	2.70	340.39
75.0%	68.03	6.95	6.50	1168.91	1182.85	669.23	513.62	2.276	2.367	14.129	82.010	3.861	17.99	78.538	3.86	75	14.31779	1073.83	0.897	962.87	2.60	370.34
	69.38	6.95	6.50	1175.99	1188.35	671.41	516.94	2.275	2.367	14.123	81.977	3.900	18.02	78.362	3.90	74	14.31779	1059.52	0.890	942.97	2.75	342.90
	68.60	6.95	6.50	1180.25	1195.28	676.11	519.17	2.273	2.367	14.113	81.921	3.966	18.08	78.064	3.97	76	14.31779	1088.15	0.890	968.46	2.68	361.36
100.0%	69.21	6.95	6.50	1176.95	1191.10	673.26	517.84	2.273	2.367	14.110	81.925	3.965	18.08	78.063	3.97	79	14.31779	1131.11	0.890	1006.68	2.70	372.85
	68.42	6.95	6.50	1175.60	1187.67	670.22	517.45	2.272	2.367	14.105	81.892	4.003	18.11	77.893	4.00	80	14.31779	1145.42	0.890	1019.43	2.65	384.69
	68.99	6.95	6.50	1181.66	1195.79	675.31	520.48	2.270	2.367	14.095	81.835	4.070	18.16	77.594	4.07	81	14.31779	1159.74	0.890	1032.17	2.60	396.99

Yogyakarta, 2025

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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

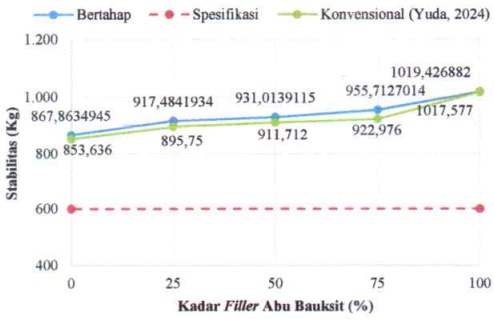
Lampiran 20 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Marshall* dengan Metode Pencampuran Bertahap

REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN *MARSHALL* METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

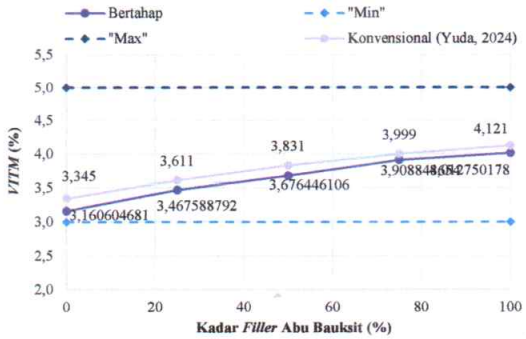
Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

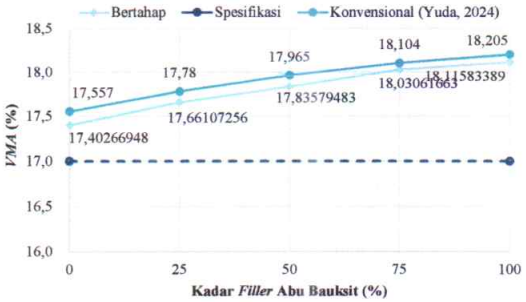
Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

SPESIFIKASI Stone Matrix Asphalt *(SMA)*	Kadar *Filler* (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	*Flow* (mm)	VITM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	*MQ*	*Density* (gr/cc)
	0	867.863	3.120	3.161	17.403	81.851	278.195	2.294
	25	917.484	2.817	3.468	17.661	80.366	325.790	2.286
	50	931.014	2.765	3.676	17.836	79.387	332.572	2.281
	75	955.713	2.715	3.909	18.031	78.321	358.199	2.275
	100	1019.427	2.625	4.013	18.116	77.850	384.841	2.272
BINA MARGA 2018		**> 600**	**2.00**	**3 - 5**	**> 17**			









Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Penelitl

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

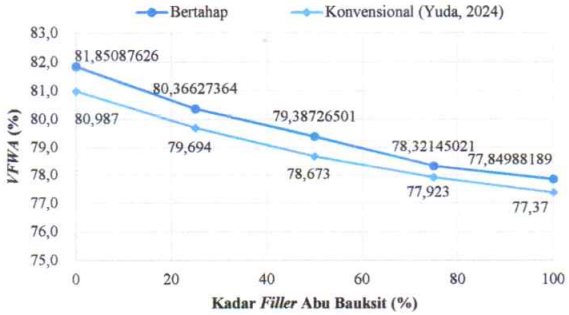
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

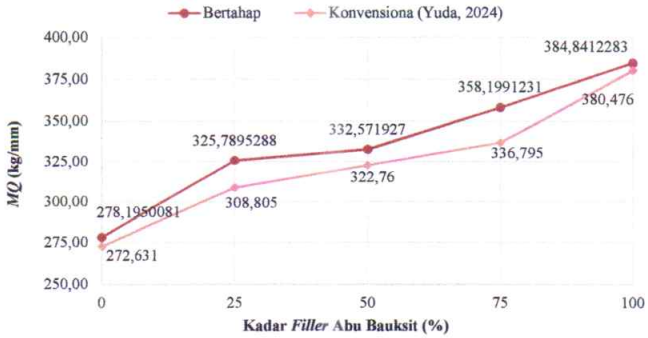
Lampiran 20 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall dengan Metode Pencampuran Bertahap

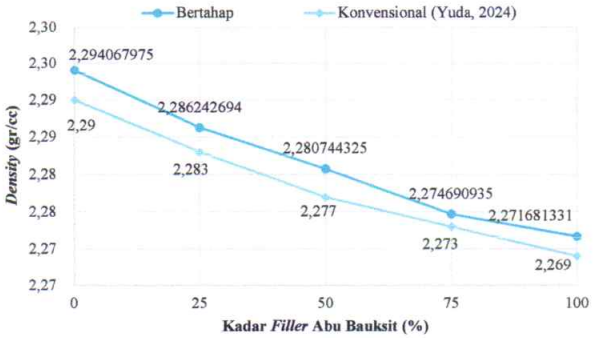
REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN *MARSHALL* METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.







Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 *VCA*

PEMERIKSAAN KADAR FILLER DARI *VOIDS IN COURSE AGGREGATE* (VCA)

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Benda Uji	Berat (gram)		Volume Silinder (cm^3)	Y_s ($gram/cm^3$)	Y_w ($gram/cm^3$)	G_{CA} ($gram/cm^3$)	VCA_{DRC} (%)
	Wadah + Camp. Agg Kasar	Wadah					
A	8137.00	3983.00	2915.79	1.42	0.997	2.53	43.46
B	8157.30	3983.00	2915.79	1.43	0.997	2.53	43.18
C	8143.29	3983.00	2915.79	1.43	0.997	2.53	43.37
Rata-Rata							43.339

Kadar Aspal	Benda Uji	Gmb	GCA	PCA (%)	VCAMIX (%)	VCAMIX/ VCADRC	Spesifikasi
0%	1.00	2.291	2.528	76	31.123	0.718	OK
	2.00	2.289	2.528	76	31.187	0.720	OK
	3.00	2.302	2.528	76	30.815	0.711	OK
	Rata-Rata				31.042	0.716	OK
25%	1.00	2.287	2.528	76	31.250	0.721	OK
	2.00	2.287	2.528	76	31.265	0.721	OK
	3.00	2.285	2.528	76	31.316	0.723	OK
	Rata-Rata				31.277	0.722	OK
50%	1.00	2.281	2.528	76	31.446	0.726	OK
	2.00	2.281	2.528	76	31.437	0.725	OK
	3.00	2.281	2.528	76	31.443	0.726	OK
	Rata-Rata				31.442	0.725	OK
75%	1.00	2.276	2.528	76	31.590	0.729	OK
	2.00	2.275	2.528	76	31.618	0.730	OK
	3.00	2.273	2.528	76	31.665	0.731	OK
	Rata-Rata				31.624	0.730	OK
100%	1.00	2.273	2.528	76	31.681	0.731	OK
	2.00	2.272	2.528	76	31.708	0.732	OK
	3.00	2.270	2.528	76	31.755	0.733	OK
	Rata-Rata				31.715	0.732	OK

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 22 Hasil Pengujian *IRS* Metode Pencampuran Bertahap

HASIL PENGUJIAN *IRS* METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Kadar *Filler*		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Berat (g)			Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi			
																Tebal Sampel		Koreksi	
		1	2	3	rata2		Udara	Dalam Air	SSD	Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX
0.0%	1	68.26	67.42	69.01	68.23	0.89	1187.47	682.74	1199.85	64	14.32	916.34	817.15	820.32	600	66.7	68.3	0.93	0.89
	2	69.47	69.15	67.93	68.85	0.89	1188.52	677.01	1202.31	65	14.32	930.66	828.28			68.3	69.9	0.89	0.89
	3	69.49	68.00	68.30	68.60	0.89	1186.31	676.69	1197.89	64	14.32	916.34	815.54			68.3	69.9	0.89	0.89
25.0%	1	68.05	69.81	69.24	69.03	0.89	1188.66	676.79	1204.66	67	14.32	959.29	853.77	879.95	600	68.3	69.9	0.89	0.89
	2	68.15	69.74	69.36	69.08	0.89	1185.07	674.38	1199.09	68	14.32	973.61	866.51			68.3	69.9	0.89	0.89
	3	67.29	66.42	66.26	66.66	0.93	1185.74	675.29	1198.62	69	14.32	987.93	919.58			65.1	66.7	0.96	0.93
50.0%	1	68.89	69.34	69.08	69.10	0.92	1181.87	672.20	1194.88	71	14.32	1016.56	937.14	907.56	600	69.9	71.4	0.89	0.83
	2	67.90	68.94	69.01	68.62	0.89	1173.21	666.87	1189.47	69	14.32	987.93	879.26			68.3	69.9	0.89	0.89
	3	67.78	67.98	67.43	67.73	0.90	1178.41	668.86	1194.03	70	14.32	1002.25	906.28			66.7	68.3	0.93	0.89
75.0%	1	67.02	67.43	67.87	67.44	0.91	1180.79	673.56	1193.27	72	14.32	1030.88	939.65	947.04	600	66.7	68.3	0.93	0.89
	2	68.07	68.38	69.46	68.64	0.89	1179.92	669.27	1193.28	74	14.32	1059.52	942.97			68.3	69.9	0.89	0.89
	3	66.99	65.36	65.69	66.01	0.94	1182.49	673.25	1194.77	71	14.32	1016.56	958.49			65.1	66.7	0.96	0.93
100.0%	1	68.41	69.19	68.82	68.81	0.89	1176.56	670.42	1194.50	76	14.32	1088.15	968.46	1012.09	600	68.3	69.9	0.89	0.89
	2	66.51	66.62	67.54	66.89	0.93	1177.07	668.57	1190.66	77	14.32	1102.47	1020.06			66.7	68.3	0.93	0.89
	3	67.18	65.42	66.19	66.26	0.94	1179.19	669.85	1192.22	78	14.32	1116.79	1047.76			65.1	66.7	0.96	0.93

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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

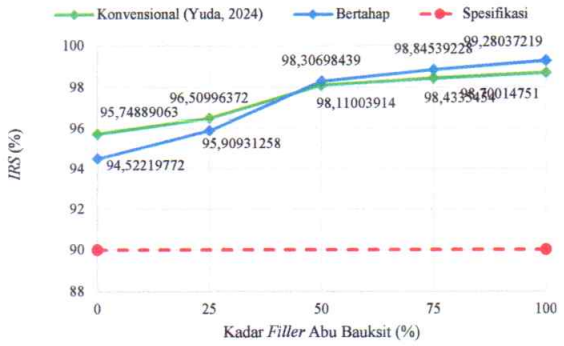
Lampiran 23 Rekapitulasi Hasil Pengujian *IRS* Metode Pencampuran Bertahap

REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN *IRS* METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

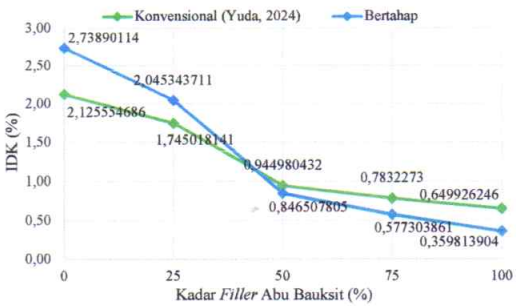
Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

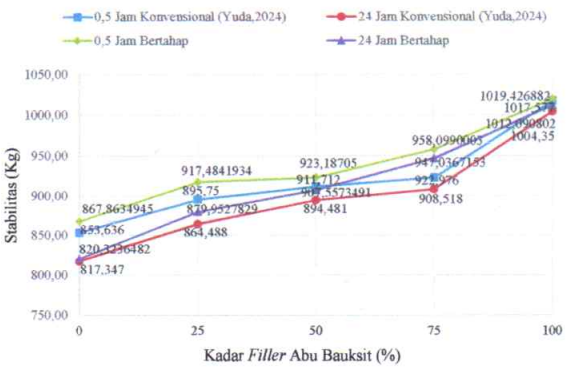
Kadar Substitusi *Filler* (%)	Stabilitas 0,5 Jam (kg)	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS %	Si %	Si+1 %	ti+1 Jam	IDP %	tn Jam	IDK %	Sa %
0	867.863	820.324	94.52	100.00	94.52	24.00	0.238	48.000	2.739	97.261
25	917.484	879.953	95.91	100.00	95.91	24.00	0.178	48.000	2.045	97.955
50	923.187	907.557	98.31	100.00	98.31	24.00	0.074	48.000	0.847	99.153
75	958.099	947.037	98.85	100.00	98.85	24.00	0.050	48.000	0.577	99.423
100	1019.427	1012.091	99.28	100.00	99.28	24.00	0.031	48.000	0.360	99.640











Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kaprodi. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 Pengujian *ITS* Metode Pencampuran Bertahap

HASIL PENGUJIAN *ITS* METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Kadar Aspal	Substitusi		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (Inch)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi Tebal				Angka Koreksi Diameter				ITS 0 JAM Kpa		
																			Tebal Sampel		Koreksi		Tebal Sampel		Koreksi				
			1	2	3	rata2		1	2	3	rata2		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	awal	rata2	MIN
6,5%	0.0%	1	68.59	67.03	68.72	68.11	0.89	4.06	4.03	4.05	4.05	0.154	29	14.32	415.22	371.48	348.95	600	66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	824.37	766.03	600
		2	69.98	68.87	68.35	69.07	0.89	4.04	4.04	4.05	4.04	0.154	26	14.32	372.26	331.31			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	725.71		
		3	68.93	69.46	69.28	69.22	0.89	4.06	4.08	4.05	4.06	0.153	27	14.32	386.58	344.06			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	748.02		
	25.0%	1	68.46	69.17	68.81	68.81	0.89	4.05	4.02	4.04	4.04	0.155	30	14.32	429.53	382.29	381.71	600	68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	841.89	829.31	600
		2	71.57	69.89	68.55	70.00	0.89	4.05	4.07	4.08	4.07	0.153	29	14.32	415.22	367.83			69.9	71.4	0.89	0.83	4	4.1	0.156	0.152	790.10		
		3	69.60	69.86	70.18	69.88	0.89	4.04	4.05	4.03	4.04	0.154	31	14.32	443.85	395.03			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	855.94		
	50.0%	1	66.41	67.69	67.34	67.15	0.92	4.05	4.07	4.04	4.05	0.154	28	14.32	400.90	368.36	374.21	600	66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	827.77	871.01	600
		2	67.85	66.74	67.09	67.23	0.92	4.00	4.05	4.04	4.03	0.155	31	14.32	443.85	406.94			66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	918.92		
		3	67.44	67.59	66.83	67.29	0.92	3.97	3.99	4.01	3.99	0.156	29	14.32	415.22	380.06			66.7	68.3	0.93	0.89	3.9	4	0.16	0.156	866.33		
	75.0%	1	67.87	66.71	67.66	67.41	0.91	4.07	4.05	4.06	4.06	0.154	33	14.32	472.49	430.99	424.00	600	66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	963.01	946.01	600
		2	68.76	67.94	68.56	68.42	0.89	4.04	4.05	4.01	4.03	0.155	34	14.32	486.80	433.26			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	960.46		
		3	68.77	68.19	68.37	68.44	0.89	4.01	3.98	3.97	3.99	0.157	32	14.32	458.17	407.77			68.3	69.9	0.89	0.89	3.9	4	0.16	0.156	914.56		
	100.0%	1	69.49	68.62	67.74	68.62	0.89	4.04	4.07	4.06	4.06	0.154	35	14.32	501.12	446.00	455.29	600	68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	979.93	1015.10	600
		2	70.20	68.95	69.04	69.40	0.89	4.02	4.01	4.03	4.02	0.155	34	14.32	486.80	433.26			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	950.21		
		3	67.37	67.21	66.89	67.16	0.92	3.96	3.98	3.99	3.98	0.157	37	14.32	529.76	486.63			66.7	68.3	0.93	0.89	3.9	4	0.16	0.156	1115.18		

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 313

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 25 Hasil Pengujian *TSR* Metode Pencampuran Bertahap

HASIL PENGUJIAN TSR METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Kadar Aspal	Substitusi		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi Tebal				Angka Koreksi Diameter				ITS 0 JAM Kpa		
			1	2	3	rata2		1	2	3	rata2		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	Tebal Sampel MIN	Tebal Sampel MAX	Koreksi MIN	Koreksi MAX	Tebal Sampel MIN	Tebal Sampel MAX	Koreksi MIN	Koreksi MAX	awal	rata2	MIN
6.5%	0.0%	1	67.54	68.62	68.45	68.20	0.89	4.06	4.03	4.05	4.05	0.154	24	14.32	343.63	306.66	323.10	600	66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	679.62	715.92	600
		2	67.71	68.68	68.60	68.33	0.89	4.04	4.04	4.05	4.04	0.154	25	14.32	357.94	318.57			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	705.32		
		3	68.95	68.23	68.41	68.53	0.89	4.02	4.03	4.03	4.03	0.155	27	14.32	386.58	344.06			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	762.81		
	25.0%	1	68.08	68.59	68.14	68.27	0.89	4.05	4.02	4.04	4.04	0.155	27	14.32	386.58	344.35	346.70	600	66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	764.38	778.50	600
		2	66.34	66.99	65.57	66.30	0.94	4.05	4.07	4.08	4.07	0.153	25	14.32	357.94	335.57			65.1	66.7	0.96	0.93	4	4.1	0.156	0.152	761.08		
		3	67.89	68.22	67.78	67.96	0.90	3.98	4.02	4.01	4.00	0.156	28	14.32	400.90	360.17			66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	810.05		
	50.0%	1	68.34	68.91	68.25	68.50	0.89	4.05	4.07	4.04	4.05	0.154	30	14.32	429.53	382.29	382.29	600	68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	842.10	832.91	600
		2	69.24	68.44	68.74	68.81	0.89	4.00	4.05	4.04	4.03	0.155	29	14.32	415.22	369.54			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	815.31		
		3	69.49	69.55	69.86	69.63	0.89	3.99	4.01	3.98	3.99	0.156	30	14.32	429.53	382.29			68.3	69.9	0.89	0.89	3.9	4	0.160	0.156	841.31		
	75.0%	1	69.73	70.67	71.78	70.73	0.86	4.07	4.05	4.06	4.06	0.154	32	14.32	458.17	392.62	415.52	600	69.9	71.4	0.89	0.83	4	4.1	0.156	0.152	836.18	910.34	600
		2	69.20	68.94	69.35	69.16	0.89	4.04	4.05	4.01	4.03	0.155	33	14.32	472.49	420.51			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	922.19		
		3	68.56	67.94	68.36	68.29	0.89	4.01	3.97	4.00	3.99	0.156	34	14.32	486.80	433.42			66.7	68.3	0.93	0.89	3.9	4	0.16	0.156	972.65		
	100.0%	1	72.03	68.69	71.25	70.66	0.86	4.03	4.06	4.05	4.05	0.154	34	14.32	486.80	418.52	449.94	600	69.9	71.4	0.89	0.83	4	4.1	0.156	0.152	895.33	989.06	600
		2	67.18	66.97	67.62	67.26	0.92	4.04	4.04	4.10	4.06	0.154	37	14.32	529.76	485.30			66.7	68.3	0.93	0.89	4	4.1	0.156	0.152	1086.90		
		3	68.17	68.62	68.72	68.50	0.89	4.04	4.05	4.04	4.04	0.154	35	14.32	501.12	446.00			68.3	69.9	0.89	0.89	4	4.1	0.156	0.152	984.95		

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

Yogyakarta, 2025
Penelit

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 118

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 *ITS* dan *TSR* Metode Pencampuran Bertahap

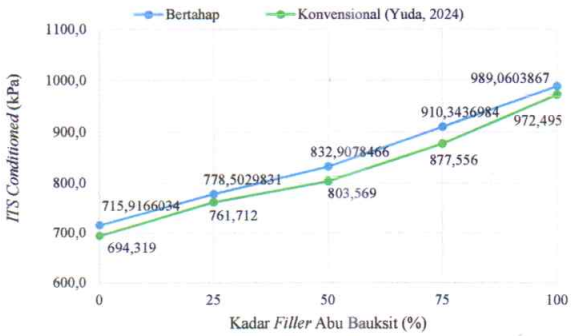
REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN ITS DAN TSR METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

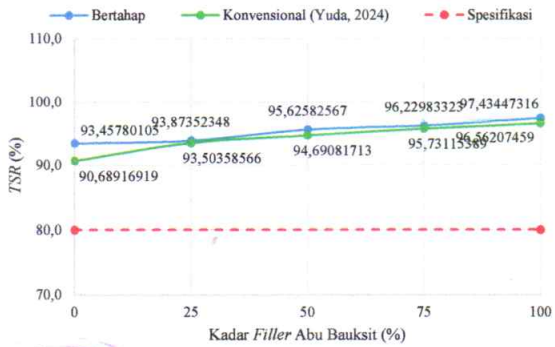
Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

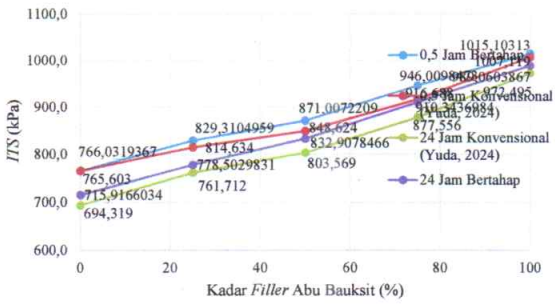
Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Substitusi (%)	KAO (%)	*Uncondition*	*Condition*	TSR (%)
0	6.5%	766.032	715.917	93.458
25		829.310	778.503	93.874
50		871.007	832.908	95.626
75		946.010	910.344	96.230
100		1015.103	989.060	97.434









Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN

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

Lampiran 27 Hasil Pengujian *CL* Normal Metode Pencampuran Bertahap

HASIL PENGUJIAN CANTABRO LOSS NORMAL

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Substitusi	No.	Keterangan	Benda uji			
			Rumus	1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi		1171.47	1175.35	1178.16
	2	Berat Sesudah Abrasi		999.20	998.78	989.75
	3	Persentase Kehilangan Berat		14.71	15.02	15.99
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		15.240		
25%	1	Berat Sebelum Abrasi		1184.63	1186.47	1182.46
	2	Berat Sesudah Abrasi		1030.34	1021.37	1019.23
	3	Persentase Kehilangan Berat		13.02	13.92	13.80
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		13.581		
50%	1	Berat Sebelum Abrasi		1167.14	1164.89	1169.96
	2	Berat Sesudah Abrasi		1016.13	1022.62	1025.33
	3	Persentase Kehilangan Berat		12.94	12.21	12.36
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		12.505		
75%	1	Berat Sebelum Abrasi		1173.19	1175.65	1177.04
	2	Berat Sesudah Abrasi		1029.73	1032.77	1034.61
	3	Persentase Kehilangan Berat		12.23	12.15	12.10
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		12.161		
100%	1	Berat Sebelum Abrasi		1169.14	1166.95	1171.36
	2	Berat Sesudah Abrasi		1080.75	1053.85	1061.58
	3	Persentase Kehilangan Berat		7.56	9.69	9.37
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		9.532		

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 28 Hasil Pengujian *CL* Rendaman Metode Pencampuran Bertahap

HASIL PENGUJIAN *CANTABRO LOSS* RENDAMAN

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

Substitusi	No.	Keterangan	Benda uji			
			Rumus	1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi		1175.23	1191.45	1185.04
	2	Berat Sesudah Abrasi		978.36	996.19	1026.49
	3	Persentase Kehilangan Berat		16.75	16.39	13.38
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		16.570		
25%	1	Berat Sebelum Abrasi		1174.57	1178.77	1183.54
	2	Berat Sesudah Abrasi		992.52	1003.36	1011.22
	3	Persentase Kehilangan Berat		15.50	14.88	14.56
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		14.980		
50%	1	Berat Sebelum Abrasi		1186.09	1184.49	1185.71
	2	Berat Sesudah Abrasi		1045.41	1019.91	1024.03
	3	Persentase Kehilangan Berat		11.86	13.89	13.64
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		13.130		
75%	1	Berat Sebelum Abrasi		1190.41	1189.64	1185.12
	2	Berat Sesudah Abrasi		1042.74	1040.35	1029.65
	3	Persentase Kehilangan Berat		12.40	12.55	13.12
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		12.691		
100%	1	Berat Sebelum Abrasi		1182.57	1189.22	1179.55
	2	Berat Sesudah Abrasi		1055.18	1064.26	1048.37
	3	Persentase Kehilangan Berat		10.77	10.51	11.12
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		10.800		

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

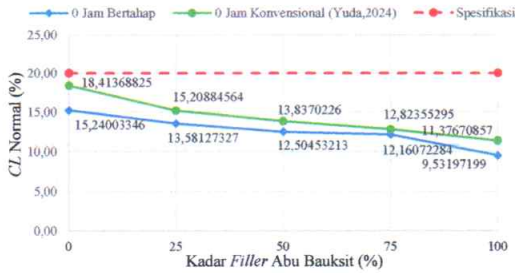
Lampiran 29 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Cantabro Loss* Metode Pencampuran Bertahap

REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN *CANTABRO LOSS* METODE PENCAMPURAN BERTAHAP

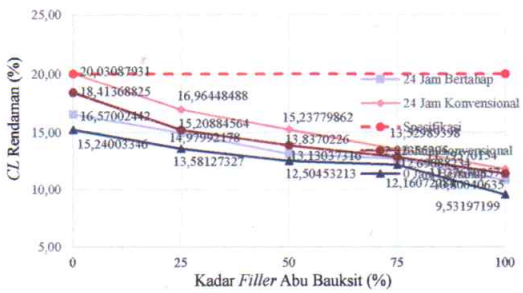
Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

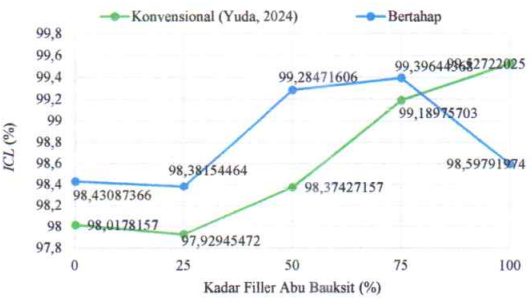
Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

CL NORMAL							
	Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL		Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL
0 Jam Konvensional	0	6.5	18.41	0 Jam Bertahap	0	6.5	15.24
	25		15.21		25		13.58
	50		13.84		50		12.50
	75		12.82		75		12.16
	100		11.38		100		9.53
CL RENDAMAN							
	Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL		Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL
24 Jam Konvensional	0	6.5	20.03	24 Jam Bertahap	0	6.5	16.57
	25		16.96		25		14.98
	50		15.24		50		13.13
	75		13.53		75		12.69
	100		11.80		100		10.80









Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

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 30 Hasil Pengujian *Draindown* Metode Pencampuran Bertahap

HASIL PENGUJIAN *DRAINDOWN*

Tanggal Pengujian : 2024
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Bahan Ikat : Aspal Pen 60/70

Dikerjakan Oleh : Ibnu Kholid
Diperiksa Oleh : Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.

No.	Keterangan	Benda Uji		
		1	2	3
1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1466.01	1380.94	1532.39
2	Berat Benda Uji, (C)(gr)	1191.29	1189.07	1186.71
3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	274.72	191.87	345.68
4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	276.24	193.45	347.25
5	*Draindown* (%)	0.13	0.13	0.13
6	Rata-rata *Draindown*		0.13	
1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1374.24	1533.64	1378.58
2	Berat Benda Uji, (gr)	1182.28	1186.83	1186.42
3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	191.96	346.81	192.16
4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	193.55	348.03	193.6
5	*Draindown* (%)	0.13	0.10	0.12
6	Rata-rata *Draindown*		0.12	
1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1376.09	1464.84	1377.65
2	Berat Benda Uji, (gr)	1184.77	1189.60	1185.92
3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	191.32	275.24	191.73
4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	199.56	276.11	192.92
5	*Draindown* (%)	0.70	0.07	0.10
6	Rata-rata *Draindown*		0.09	
1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1382.78	1379.63	1529.26
2	Berat Benda Uji, (gr)	1190.62	1187.33	1182.62
3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	192.16	192.30	346.64
4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	193.11	193.13	347.43
5	*Draindown* (%)	0.08	0.07	0.07
6	Rata-rata *Draindown*		0.07	
1	Berat Cawan + Benda Uji, (gr)	1524.72	1379.34	1465.16
2	Berat Benda Uji, (gr)	1178.18	1187.85	1189.87
3	Berat Awal Piring Penampung (B), (gr)	346.54	191.49	275.29
4	Berat Akhir Piring Penampung (A), (gr)	347.18	192.20	276.16
5	*Draindown* (%)	0.05	0.06	0.07
6	Rata-rata *Draindown*		0.06	

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng., IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 015110101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Peneliti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318

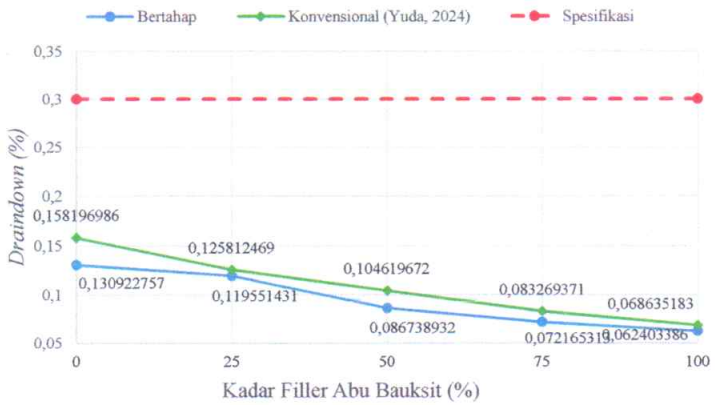
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL & PERENCANAAN
Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

Lampiran 31 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Draindown* Metode Pencampuran Bertahap

REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN *DRAINDOWN*

Tanggal Pengujian	:	2024	Dikerjakan Oleh	:	Ibnu Kholid
Tipe Campuran	:	*Stone Matrix Asphalt (SMA)*	Diperiksa Oleh	:	Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.
Bahan Ikat	:	Aspal Pen 60/70			

Variasi Substitusi (%)	*Draindown* (%)
0	0.13
25	0.12
50	0.1
75	0.07
100	0.06



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, 2025
Penelti

Ibnu Kholid
NIM : 20 511 318