

TUGAS AKHIR

**PEMANFAATAN *FLY ASH* BATU BARA SEBAGAI
FILLER PENGGANTI TERHADAP KARAKTERISTIK
CAMPURAN AC-BC DENGAN METODE
PENCAMPURAN KONVENSIIONAL DAN METODE
PENCAMPURAN BERTAHAP
(*UTILIZATION OF COAL FLY ASH AS A SUBSTITUTE
FILLER ON THE CHARACTERISTICS OF AC-BC
MIXTURES WITH CONVENTIONAL MIXING
METHOD AND STAGED MIXING METHOD*)**

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



Wisnu Priambodo

20511309

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

TUGAS AKHIR

**PEMANFAATAN *FLY ASH* BATU BARA SEBAGAI
FILLER PENGGANTI TERHADAP KARAKTERISTIK
CAMPURAN AC-BC DENGAN METODE
PENCAMPURAN KONVENSIONAL DAN METODE
PENCAMPURAN BERTAHAP
(*UTILIZATION OF COAL FLY ASH AS A SUBSTITUTE
FILLER ON THE CHARACTERISTICS OF AC-BC
MIXTURES WITH CONVENTIONAL MIXING
METHOD AND STAGED MIXING METHOD*)**

Disusun Oleh:

**Wisnu Priambodo
20511309**

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

Diuji pada tanggal 29 Desember 2025

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK: 955110103

Penguji I

Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.
NIK: 145110101

Penguji II

Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK: 215111307



Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

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

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sungguh – sungguh Naskah Tugas Akhir yang telah saya susun sebagai syarat untuk memenuhi persyaratan pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia merupakan hasil dari penulisan saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan Naskah Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh, atau sebagian Naskah Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 29 Desember 2025

Yang membuat pernyataan,

A handwritten signature in black ink is written over a yellow revenue stamp. The stamp features the number '10000' in large red digits, the text 'KELOMPOK BUKU KUDIPAH' vertically on the left, and 'METERAI TEMPEL' in the center. At the bottom of the stamp, the alphanumeric code '13723ANX221811734' is printed.

Wisnu Priambodo

(20511309)

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Naskah Tugas Akhir dengan judul Pemanfaatan *Fly Ash* Batu Bara Sebagai *Filler* Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran AC-BC dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap. Naskah ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Alhamdulillah setelah melalui berbagai macam hambatan, akhirnya tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan bantuan berbagai pihak. Berkaitan dengan itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu yang baru dan nasihat baik serta motivasi yang membangkitkan semangat penulis selama penyusunan Tugas Akhir.
2. Ibu Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc., dan Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP., selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran, arahan, serta masukan untuk menjadikan tugas akhir ini semakin baik.
3. Ibu Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM. selaku kepala Prodi Teknik Sipil yang telah membantu untuk kelancaran dalam masalah akademik selama ini.
4. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP. selaku Kepala Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Ayahanda Untung Supriyadi dan Ibu Eli Purwati selaku kedua orang tua penulis kemudian Cahya Dwi Putra dan Farhan Muhammad selaku saudara kandung penulis yang selalu mendoakan dan mendukung penulis hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Friscka Diantha Yaffa Arella Hermawan, S.T. yang telah memberikan semangat kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir serta telah mendukung hal-hal baik yang dilakukan oleh penulis.
7. Seluruh keluarga saudara serta saudari penulis yang telah memberikan semangat dan doa untuk kelancaran penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman semua angkatan, jurusan, dll, yang tidak dapat ditulis satu persatu penulis yang telah kebersamai serta memberi pertolongan dalam mengerjakan Tugas Akhir.
9. Bapak Sukanto HM, S.T. dan Giri Widhiatmoko, S.T., M.T. selaku laboran di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia yang telah membantu penulis selama penelitian Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa penelitian serta Tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan begitu banyak kekurangan disebabkan keterbatasan dalam penyusunan baik secara keilmuan maupun secara pengalaman. Dengan kekurangan ini penulis menerima kritik, saran, dan komentar yang dapat membangun agar penelitian ini lebih baik. Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat untuk khalayak umum. Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan bagi semua pihak yang dengan ikhlas membantu, membimbing, dan mengarahkan hingga penelitian selesai.

Yogyakarta, 29 Desember 2025

Penulis,



Wisnu Priambodo

(20511309)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI	xv
DAFTAR SINGKATAN	xvii
ABSTRAK	xviii
ABSTRACT	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penggunaan <i>Filler Fly Ash</i> pada Campuran AC-BC	5
2.2 Penggunaan Metode Pencampuran Bertahap pada Campuran Aspal	6
2.3 Penelitian Terkait Substitusi <i>Filler</i> pada Campuran Aspal	8
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Perkerasan Jalan	15
3.2 Perkerasan Lentur (<i>Flexible Pavement</i>)	15
3.3 Karakteristik Perkerasan Lentur	16
3.4 Material Penyusun Campuran	19
3.3.1 Aspal	19
3.3.2 Agregat	21

3.5	Gradasi Agregat	23
3.6	<i>Fly Ash</i> (Abu Batu Bara)	24
3.7	Campuran <i>Asphalt Concrete-Binder Course</i>	25
3.8	Metode Pencampuran Bertahap	26
3.9	Karakteristik Pengujian <i>Marshall</i>	27
3.9.1	Stabilitas (<i>Stability</i>)	28
3.9.2	Kelelehan (<i>Flow</i>)	29
3.9.3	<i>Void in Total Mix</i> (VITM)	29
3.9.4	<i>Voids in Mineral Aggregate</i> (VMA)	30
3.9.5	<i>Void in Filled with Asphalt</i> (VFWA)	31
3.9.6	<i>Marshall Quotient</i> (MQ)	33
3.10	Pengujian <i>Index of Retained Strength</i> (IRS)	34
3.11	Pengujian <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS)	34
3.12	Pengujian <i>Tensile Strength Ratio</i> (TSR)	35
3.13	Pengujian <i>Cantabro Loss</i> (CL)	35
BAB IV METODE PENELITIAN		37
4.1	Metode Penelitian	37
4.2	Metode Pengambilan Sampel	37
4.3	Metode Pengambilan Data	37
4.3.1	Pemeriksaan Material	38
4.3.2	Bahan Campuran Penelitian	38
4.3.3	Peralatan Pengujian	38
4.4	Tahapan Penelitian	40
4.4.1	Persiapan dan Pemeriksaan	40
4.4.2	Persiapan Campuran	43
4.4.3	Pembuatan <i>Sample</i>	51
4.4.4	Uji <i>Marshall</i>	53
4.4.5	Uji IRS	55
4.4.6	Uji ITS	55
4.4.7	Uji TSR	55
4.4.8	Uji CL	56

4.5	Analisis Data	56
4.6	Bagan Alir Penelitian	57
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		60
5.1	Hasil Pengujian Bahan dan Campuran	60
5.1.1	Hasil pengujian Karakteristik Aspal	60
5.1.2	Hasil Pengujian Karakteristik Agregat	60
5.1.3	Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan KAO	61
5.2	Pembahasan	65
5.2.1	Pembahasan Pengujian Karakteristik Aspal	65
5.2.2	Pembahasan Pengujian Karakteristik Agregat Halus	67
5.2.3	Pembahasan Pengujian Karakteristik Agregat Kasar	68
5.2.4	Pembahasan Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (<i>Filler</i>)	69
5.2.5	Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan KAO	70
5.2.6	Pembahasan Substitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C pada KAO Campuran dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap.	78
5.3	Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap	95
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		106
6.1	Kesimpulan	106
6.2	Saran	107
DAFTAR PUSTAKA		108

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penggunaan <i>Filler</i> pada Campuran AC-BC	9
Tabel 2. 2 Penggunaan Metode Pencampuran Bertahap pada Campuran Aspal	11
Tabel 3. 1 Ketentuan untuk Aspal Keras	21
Tabel 3. 2 Ketentuan Agregat Kasar	22
Tabel 3. 3 Ketentuan Agregat Halus	23
Tabel 3. 4 Gradasi Agregat Campuran <i>Asphalt Concrete</i> (AC)	23
Tabel 3. 5 Kebutuhan Kandungan Kimia Abu Terbang	25
Tabel 3. 6 Ketentuan Sifat Campuran Laston (AC)	26
Tabel 3. 7 Ketentuan Sifat Campuran Laston Modifikasi (AC Mod)	26
Tabel 4. 1 Gradasi Agregat Campuran AC-BC	43
Tabel 4. 2 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5%	44
Tabel 4. 3 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5,5%	45
Tabel 4. 4 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6%	45
Tabel 4. 5 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6,5%	46
Tabel 4. 6 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7%	46
Tabel 4. 7 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi <i>Filler</i> 0%	47
Tabel 4. 8 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi <i>Filler</i> 25%	48
Tabel 4. 9 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi <i>Filler</i> 50%	48
Tabel 4. 10 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi <i>Filler</i> 75%	49
Tabel 4. 11 Jumlah Benda Uji untuk Memperoleh Nilai KAO	50
Tabel 4. 12 Benda Uji Metode Konvensional untuk <i>Filler</i> pada KAO	50
Tabel 4. 13 Benda Uji Metode Dua Tahap untuk <i>Filler</i> pada KAO	50
Tabel 5. 1 Hasil pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70	60
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Agregat Kasar	61
Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng	61
Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis <i>Filler</i>	61
Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70	61
Tabel 5. 6 Berat Debu Batu dan <i>Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C	63

Tabel 5. 7 Hasil Pengujian <i>Marshall Test</i> Metode Pencampuran Konvensional	63
Tabel 5. 8 Hasil Pengujian <i>Marshall Test</i> Metode Pencampuran Bertahap	63
Tabel 5. 9 Hasil Pengujian (IRS) pada Metode Pencampuran Konvensional	64
Tabel 5. 10 Hasil Pengujian (IRS) pada Metode Pencampuran Bertahap	64
Tabel 5. 11 Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS) dan <i>Tensile Strength Ratio</i> (TSR) pada Metode Pencampuran Konvensional	64
Tabel 5. 12 Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS) dan <i>Tensile Strength Ratio</i> (TSR) pada Metode Pencampuran Bertahap	64
Tabel 5. 13 Hasil Pengujian <i>Cantabro Loss</i> Normal pada Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap	65
Tabel 5. 14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi <i>Filler</i> FA Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap	96

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Penyebaran Beban Roda Melalui Lapis Perkerasan Jalan	16
Gambar 3. 2 Tahapan Metode Pencampuran	27
Gambar 3. 3 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Stabilitas	28
Gambar 3. 4 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan <i>Flow</i>	29
Gambar 3. 5 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan VITM	30
Gambar 3. 6 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan VMA	31
Gambar 3. 7 Ilustrasi Rongga Agregat yang Terisi Aspal	32
Gambar 3. 8 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan VFWA	33
Gambar 3. 9 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan MQ	34
Gambar 4. 1 Grafik Rencana Gradasi Agregat Campuran AC-BC	43
Gambar 4. 2 Bagan Alir Penelitian	58
Gambar 5. 1 Grafik Kadar Aspal Optimum (KAO)	62
Gambar 5. 2 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas	71
Gambar 5. 3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Flow	72
Gambar 5. 4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai MQ	73
Gambar 5. 5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VITM	74
Gambar 5. 6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VMA	75
Gambar 5. 7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VFWA	76
Gambar 5. 8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai IRS	77
Gambar 5. 9 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai <i>Void in Total Mix</i> (VITM)	79
Gambar 5. 10 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai <i>Void in Mineral Aggregate</i> (VMA)	80
Gambar 5. 11 Grafik Perbandingan Metode pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai <i>Void Filled with Asphalt</i> (VFWA)	81
Gambar 5. 12 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Stabilitas	83

Gambar 5. 13 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai <i>Flow</i>	84
Gambar 5. 14 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai <i>Marshall Quotient</i> (MQ)	85
Gambar 5. 15 Perbandingan Nilai <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS) Normal dengan Rendaman Metode Konvensional	87
Gambar 5. 16 Perbandingan Nilai <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS) 0,5 Jam dengan 24 Jam Metode Bertahap	87
Gambar 5. 17 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS)	88
Gambar 5. 18 Perbandingan Nilai Stabilitas 0 Jam dengan Nilai Stabilitas 24 Jam Metode Konvensional	90
Gambar 5. 19 Perbandingan Nilai Stabilitas 0 Jam dengan Nilai Stabilitas 24 Jam Metode Bertahap	91
Gambar 5. 20 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai <i>Index of Retained Strength</i> (IRS)	91
Gambar 5. 21 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap <i>Tensile Strength Ratio</i> (TSR)	93
Gambar 5. 22 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai <i>Cantabro Loss</i> Normal	94
Gambar 5. 23 Rekapitulasi Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai <i>Cantabro Loss</i>	94

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70	113
Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70	114
Lampiran 3 Pemeriksaan Titik Nyala dan Titik Bakar Aspal Pen 60/70	115
Lampiran 4 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70	116
Lampiran 5 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70	117
Lampiran 6 Pemeriksaan Kelarutan Aspal Pen 60/70 dalam TCE	118
Lampiran 7 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Kasar	119
Lampiran 8 Pemeriksaan Kelekatan Agregat Terhadap Aspal	120
Lampiran 9 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan Mesin <i>Loss Angeles</i>	121
Lampiran 10 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus	122
Lampiran 11 Pemeriksaan <i>Sand Equivalent</i>	123
Lampiran 12 Pemeriksaan Berat Jenis <i>Filler</i> Abu Batu	124
Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis <i>Filler Fly Ash</i>	125
Lampiran 14 Hasil Pengujian <i>Marshall</i> (KAO)	126
Lampiran 15 Hasil Pengujian IRS (KAO)	127
Lampiran 16 Rekapitulasi KAO Aspal Pen 60/70	128
Lampiran 17 Hasil Pengujian <i>Marshall</i> Konvensional	129
Lampiran 18 Hasil Pengujian <i>Marshall</i> Bertahap	130
Lampiran 19 Rekapitulasi Pengujian <i>Marshall</i> Bertahap dan Konvensional	131
Lampiran 20 Hasil Pengujian IRS Konvensional	132
Lampiran 21 Hasil Pengujian IRS Bertahap	133
Lampiran 22 Rekapitulasi Pengujian IRS Konvensional dan Bertahap	134
Lampiran 23 Hasil Pengujian ITS Konvensional	135
Lampiran 24 Hasil Pengujian ITS Bertahap	136
Lampiran 25 Hasil Pengujian TSR Konvensional	137
Lampiran 26 Hasil Pengujian TSR Bertahap	138
Lampiran 27 Rekapitulasi Pengujian ITS dan TSR	139
Lampiran 28 Hasil Pengujian CL Normal Konvensional	140

Lampiran 29 Hasil Pengujian CL Normal Bertahap	141
Lampiran 30 Rekapitulasi Pengujian CL Normal Konvensional dan Bertahap	142

DAFTAR NOTASI

A	= Persen kadar Subtitusi (%)
a	= Berat Jenis <i>Fly Ash</i> Batu Bara (gr/cm^3)
a	= Total kehilangan kekuatan rerata satu hari (%)
b	= Berat Jenis Abu Batu (gr/cm^3)
Ba	= Berat beton aspal padat di dalam air (gr),
Bk	= Berat kering beton aspal padat (gr),
Bssd	= Berat kering permukaan dari beton aspal dipadatkan (gr),
c	= Berat benda uji sebelum direndam (gr),
CA	= Agregat kasar tertahan pada saringan No. 4,
d	= Berat benda uji dalam keadaan jenuh / SSD (gr),
d	= Diameter benda uji (mm)
e	= Berat dalam air (gr), dan
f	= Volume / isi (cm^3).
Gmb	= Berat jenis bulk dari beton aspal padat,
Gmm	= Berat jenis maksimum campuran beton aspal belum dipadatkan,
Ga	= Berat jenis aspal,
Gsb	= Berat jenis bulk agregat total,
h	= Tinggi benda uji (mm)
L	= Persentasi kehilangan berat (%)
Mo	= Berat sebelum abrasi (gr)
Mi	= Berat sesudah abrasi (gr)
p	= Pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat, dan
P	= Nilai Stabilitas (N),
Pb	= Kadar aspal perkiraan,
q	= Angka stabilitas,
r	= Angka koreksi tebal benda uji.
r	= Indeks penurunan stabilitas (%)
Pa	= Kadar aspal terhadap berat beton aspal padat (%),

- P_s = Kadar agregat terhadap berat beton aspal padat (%),
 S_1 = Rata-rata nilai stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 0,5 jam,
 S_2 = Rata-rata nilai stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 24 jam.
 s_i = Persentase kekuatan sisa pada waktu t_i (%)
 S_{i+1} = Persentase kekuatan sisa pada waktu $t_i + 1$, dan
 T_1 = Rata-rata nilai ITS tanpa rendaman (kg), dan
 T_2 = Rata-rata nilai ITS setelah perendaman 24 jam (kg).
 T_i, t_{i+1} = Periode perendaman (dari awal pengujian)
 t_n = Total waktu rendaman (jam)

DAFTAR SINGKATAN

AASHTO	= <i>America Association of State Highway and Transport</i>
AC-BC	= <i>Asphalt Concrete Binder Course</i>
BA	= <i>Bottom Ash</i>
BS	= <i>British Standard</i>
CL	= <i>Cantabro Loss</i>
FA	= <i>Fly Ash</i>
ITS	= <i>Indirect Tensile Strength</i>
IRS	= <i>Index of Retained Strength</i>
KAO	= <i>Kadar Aspal Optimum</i>
MQ	= <i>Marshall Quotient</i>
PLTU	= <i>Pembangkit Listrik Tenaga Uap</i>
SNI	= <i>Standar Nasional Indonesia</i>
TSR	= <i>Tensile Strength Ratio</i>
VITM	= <i>Void in the Total Mix</i>
VFWA	= <i>Void Filled with Asphalt</i>
VMA	= <i>Void in Mineral Agregate</i>

ABSTRAK

Perkembangan infrastruktur jalan mendorong inovasi dalam teknologi perkerasan, khususnya pada teknik pencampuran campuran beraspal dan pemanfaatan material alternatif. Salah satu inovasi yang berkembang adalah metode pencampuran bertahap, yang dinilai mampu meningkatkan ikatan antara aspal dan agregat. Di sisi lain, keterbatasan ketersediaan *filler* abu batu menjadikan *fly ash* batu bara tipe C dari limbah PLTU Cilacap sebagai alternatif *filler* yang berpotensi digunakan. Penelitian ini bertujuan membandingkan pengaruh substitusi *filler fly ash* tipe C terhadap kinerja campuran AC-BC menggunakan metode pencampuran konvensional dan pencampuran bertahap, ditinjau dari parameter volumetrik, mekanik, dan durabilitas.

Penelitian dilakukan melalui pengujian laboratorium yang diawali dengan pengujian sifat material agregat dan aspal. Selanjutnya ditentukan kadar aspal optimum dengan variasi kadar aspal 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7%. Campuran AC-BC kemudian diuji menggunakan variasi substitusi *fly ash* tipe C sebesar 0%, 25%, 50%, dan 75% dengan dua metode pencampuran. Parameter yang dianalisis meliputi VITM, VMA, VFWA, stabilitas, *flow*, MQ, ITS, IRS, TSR, dan CL.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap dengan substitusi *filler fly ash* tipe C menghasilkan kinerja campuran AC-BC yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Campuran dengan metode bertahap memiliki karakteristik volumetrik yang lebih padat, kekuatan mekanik yang lebih tinggi, serta durabilitas yang lebih baik terhadap pengaruh lingkungan dan beban lalu lintas.

Kata kunci: *Asphalt Concrete-Binder Course, filler, fly ash*, metode pencampuran bertahap

ABSTRACT

The development of road infrastructure has driven innovations in pavement technology, particularly in asphalt mixture techniques and the utilization of alternative materials. One of the emerging innovations is the staged mixing method, which is considered capable of improving the bond between asphalt and aggregates. Meanwhile, the limited availability of stone dust filler has encouraged the use of Class C coal fly ash from the Cilacap power plant as a potential alternative filler. This study aims to compare the effect of Class C fly ash filler substitution on the performance of Asphalt Concrete–Binder Course (AC-BC) mixtures using conventional mixing and staged mixing methods, evaluated in terms of volumetric, mechanical, and durability parameters.

This research was conducted through laboratory testing, beginning with the evaluation of aggregate and asphalt material properties. The optimum asphalt content was then determined with asphalt content variations of 5%, 5.5%, 6%, 6.5%, and 7%. The AC-BC mixtures were subsequently tested using Class C fly ash substitution levels of 0%, 25%, 50%, and 75% with both mixing methods. The evaluated parameters included VITM, VMA, VFWA, stability, flow, MQ, ITS, IRS, TSR, and CL.

The results indicate that the staged mixing method with Class C fly ash filler substitution provides better AC-BC mixture performance compared to the conventional method. Mixtures produced using the staged mixing method exhibited denser volumetric characteristics, higher mechanical strength, and improved durability against environmental effects and traffic loading.

Keywords: *Asphalt Concrete–Binder Course, filler, fly ash, staged mixing method*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur jalan merupakan salah satu faktor penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan mobilitas masyarakat. Untuk menunjang kualitas jalan, diperlukan material perkerasan yang mampu menahan beban lalu lintas dan kondisi lingkungan. Salah satu jenis lapisan perkerasan yang umum digunakan adalah *Asphalt Concrete - Binder Course (AC-BC)*, yang berfungsi sebagai lapisan pengikat antara lapisan pondasi bawah dan lapisan aus (*AC-WC*).

Campuran AC-BC terdiri dari agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan aspal sebagai bahan pengikat. Salah satu komponen penting dalam campuran ini adalah *filler*, yang berfungsi mengisi rongga antar agregat dan meningkatkan stabilitas campuran. Umumnya, *filler* yang digunakan berasal dari batu kapur. Namun, ketersediaan material alam yang terbatas serta meningkatnya kesadaran terhadap lingkungan mendorong pencarian alternatif *filler* yang lebih berkelanjutan.

Menurut Alvin dkk. (2024), *fly ash* merupakan material yang terbentuk dari hasil pembakaran atau pemanasan material agregat kasar dan halus, yang menyebabkan terbentuknya abu terbang tersebut. Selain itu, penggunaan *fly ash* sebagai *filler* mampu mempengaruhi nilai kuat tekan beton Setiawan dkk. (2023). Menurut Kalawa dkk (2021), *fly ash* berbentuk partikel halus *pozzolan*, karena bahan penyusun utamanya adalah silikok dioksida, alumunium, dan ferrum oksida, sehingga oksida-oksida tersebut bisa bereaksi dengan kapur bebas dari semen ketika bereaksi dengan air. Pemanfaatan *fly ash* sebagai *filler* tidak hanya memberikan solusi terhadap masalah limbah industri, tetapi juga dapat meningkatkan performa campuran aspal.

Selain penggunaan bahan tambahan dalam campuran, salah satu upaya untuk meningkatkan performa campuran adalah melalui modifikasi metode pencampurannya. Saat ini, telah dikembangkan suatu teknik baru dalam pencampuran beton aspal yang dikenal dengan metode pencampuran bertahap.

Teknik ini bertujuan untuk meningkatkan mutu campuran beton aspal dengan mengubah urutan pencampuran antara aspal dan agregat. Menurut Kok dan Kuloglu (2011), metode pencampuran bertahap didasarkan pada *precoating* agregat kasar dengan bahan ikat aspal sesuai pada kondisi kadar aspal optimum. Selanjutnya dicampur dengan agregat halus dan *filler*. Tujuannya adalah untuk memperkuat sifat adhesi aspal dengan agregat dan menurunkan kecenderungan pengelupasan agregat yang disebabkan oleh kelembaban. Menurut Yaro (2021), metode pencampuran bertahap dianggap lebih efektif karena mampu menghasilkan campuran yang memiliki stabilitas tinggi serta ketahanan yang lebih baik terhadap kelembaban. Teknik pencampuran ini menghasilkan distribusi rongga udara dalam campuran yang lebih merata, sehingga proses pemadatan menjadi lebih mudah. Selain itu, campuran aspal yang dihasilkan menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen dan memiliki nilai kuat tarik tidak langsung yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional (Hidayat, 2021).

Penggunaan *fly ash* dalam campuran AC-BC merupakan solusi inovatif dan berkelanjutan yang dapat meningkatkan kinerja campuran aspal sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari limbah PLTU. Dengan formulasi dan pengujian yang tepat, *fly ash* bisa menjadi alternatif *filler* yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk kebutuhan perkerasan jalan modern. *Fly ash* kelas C diproduksi dari pembakaran batubara *lignite* atau *sub-bituminous* selain mempunyai sifat *pozzolanic* juga mempunyai sifat *self-cementing* (kemampuan untuk mengeras dan menambah *strength* apabila bereaksi dengan air) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur. *Fly ash* kelas F adalah abu terbang hasil pembakaran batu bara *bituminous* yang bersifat *pozzolan* murni dengan kandungan kalsium rendah sehingga memerlukan bahan pengaktif untuk bereaksi dan mengikat. *Fly ash* kelas N adalah abu alami atau material *pozzolan* alami yang berasal dari proses alam seperti abu vulkanik, tanah diatom, atau *opaline shale* yang bersifat *pozzolan* dan bereaksi dengan kapur untuk membentuk ikatan.

Saat ini, belum ada studi lebih lanjut yang telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja campuran AC-BC menggunakan perbandingan metode

pencampuran antara metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap dengan penambahan limbah abu batu bara atau *fly ash*. Oleh sebab itu studi ini bertujuan untuk menganalisis kinerja campuran AC-BC dengan penambahan limbah abu batu bara atau *fly ash* tipe C menggunakan metode konvensional dan bertahap.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh penggunaan *fly ash* tipe C sebagai *filler* pengganti terhadap karakteristik volumetrik campuran AC-BC dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap?
2. Bagaimana pengaruh penggunaan *fly ash* tipe C sebagai *filler* pengganti terhadap karakteristik mekanik campuran AC-BC dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap?
3. Bagaimana pengaruh penggunaan *fly ash* tipe C sebagai *filler* pengganti terhadap durabilitas campuran AC-BC dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan dalam penelitian adalah sebagai berikut.

1. Menganalisis pengaruh penggunaan *fly ash* tipe C sebagai *filler* pengganti terhadap karakteristik volumetrik campuran AC-BC dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap.
2. Mengetahui pengaruh penggunaan *fly ash* tipe C sebagai *filler* pengganti terhadap karakteristik mekanik campuran AC-BC dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap.
3. Memprediksi pengaruh penggunaan *fly ash* tipe C sebagai *filler* pengganti terhadap durabilitas campuran AC-BC dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap.

1.4 Batasan Penelitian

Adapun batasan penelitian yang digunakan penulis adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini hanya memfokuskan pada campuran aspal tipe *asphalt Concrete-Binder Course* AC-BC sesuai dengan spesifikasi umum Bina Marga 2018 Revisi 2.
2. Tidak melakukan pengujian terhadap kandungan unsur mineral dalam *fly ash* batu bara.
3. Limbah *fly ash* batu bara tipe C yang digunakan diperoleh dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Kabupaten Cilacap.
4. Pengujian ini sudah dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Agregat halus dan agregat kasar didapatkan dari Clereng, Kulonprogo yang ada di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
6. Tinjauan karakteristik volumetrik campuran didasarkan dari nilai *density*, *Voids in Total Mix* (VITM), *Voids in Minerale Aggregate* (VMA), dan *Voids Filler with Asphalt* (VFWA).
7. Tinjauan kekuatan struktur campuran didasarkan dari nilai stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient* (MQ), *Indirect Tensile Strength* (ITS) dan *Cantabro Loss* (CL).
8. Tinjauan durabilitas campuran didasarkan dari nilai *Index of Retained Strength* (IRS), dan *Tensile Strength Ratio* (TSR).
9. Bahan pengikat yang digunakan adalah aspal Pertamina penetrasi 60/70.
10. *Filler* yang dipakai yaitu dari *fly ash* batu bara dengan kadar 0%, 25%, 50%, dan 75% dari berat lolos saringan No. 200.
11. Variasi Kadar Aspal yang digunakan yaitu 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, dan 7%.
12. Penelitian ini tidak melakukan pengujian stabilitas dinamis pada campuran.
13. Penelitian ini tidak membahas segi ekonomis dari penggunaan metode pencampuran bertahap.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penggunaan *Filler Fly Ash* pada Campuran AC-BC

Ardiansyah dan Hadi (2023) dalam penelitiannya mengkaji tentang analisa *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC) dengan material substitusi *fly ash* dan *bottom ash*. Dalam penelitian tersebut menggunakan 21 sampel dengan 7 varian komposisi yaitu komposisi normal, komposisi substitusi *fly ash* 50%, komposisi substitusi *fly ash* 50% dan *bottom ash* 50%, komposisi substitusi *fly ash* 50% dan *bottom ash* 60%, komposisi substitusi *fly ash* 60% dan *bottom ash* 60%, komposisi substitusi *fly ash* 60% dan *bottom ash* 50%. Dari semua hasil yang diperoleh dari penelitian yang sudah dilakukan, komposisi yang terbaik pada penelitian *Asphalt Concrete Binder Course* AC-BC kali ini yaitu campuran normal dengan nilai rata-rata tertinggi 535,90%, sedangkan untuk aspal modifikasi disini campuran Abu Batu + *Fly Ash* mendapatkan nilai rata-rata yang cukup tinggi yaitu sebesar 489%.

Ashari dan Veronika (2024) dalam penelitiannya mengkaji tentang pengaruh substitusi *fly ash* batu bara sebagai *filler* pada campuran aspal beton jenis *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC). Hasil uji *Marshall* menunjukkan bahwa pada kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5,7%, campuran mencapai karakteristik *Marshall* yang memenuhi spesifikasi, yaitu densitas 2,238 kg/mm, stabilitas 1.382 kg, *flow* 4,11 mm, rongga dalam agregat (VMA) sebesar 14,7%, rongga yang terisi aspal (VFB) 65,4%, rongga dalam campuran (VIM) 5,3%, dan *Marshall Quotient* sebesar 371 kg/mm. Dari kelima variasi campuran yang diuji, kombinasi 50% *fly ash* dan 50% semen menghasilkan karakteristik *Marshall* terbaik yang memenuhi seluruh parameter, meliputi densitas, VMA, VIM, VFB, stabilitas, *flow*, dan *Marshall Quotient*.

Aviv dkk. (2023) dalam penelitiannya mengkaji tentang pengaruh substitusi limbah bata merah dan *fly ash* sebagai *filler* campuran *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC). Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa kadar aspal optimum sebesar 5,75% memenuhi seluruh spesifikasi karakteristik *Marshall*.

Komposisi *filler* yang paling sesuai adalah campuran 5% bata merah, 5% *fly ash*, dan 90% semen, karena mampu memenuhi semua parameter karakteristik *Marshall* dan layak digunakan sebagai *filler* dalam campuran AC-BC.

Putra (2022) melakukan penelitian mengenai pengaruh penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* terhadap campuran beton aspal lapis (AC-BC). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai stabilitas tertinggi dicapai pada campuran dengan komposisi penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* sebesar 50%, dengan rentang nilai antara 1.670,689 hingga 2.049,010 kg dan nilai rata-rata sebesar 1.946,141 kg. Berdasarkan temuan tersebut, dapat disimpulkan bahwa penggunaan campuran *fly ash* dan *bottom ash* sebesar 50% merupakan komposisi yang paling optimal dalam meningkatkan parameter stabilitas, sehingga memberikan kontribusi terbaik terhadap kinerja campuran AC-BC.

2.2 Penggunaan Metode Pencampuran Bertahap pada Campuran Aspal

Kholid (2025) melakukan salah satu inovasi dalam teknik pencampuran adalah metode pencampuran bertahap. Dalam hal performa mekanik, metode bertahap menunjukkan hasil yang lebih unggul dengan nilai stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient* (MQ), dan kuat tarik tidak langsung (ITS) yang lebih tinggi serta nilai keausan yang lebih rendah, mengindikasikan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap beban dan deformasi. Selain itu, dari segi durabilitas, campuran dengan metode pencampuran bertahap dan substitusi abu bauksit menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh cuaca dan suhu dibandingkan dengan metode konvensional.

Iqbal dan Fauziah (2023) melakukan sebuah kajian penelitian tentang penggunaan bahan tambah serbuk ban karet dengan menggunakan metode pencampuran bertahap untuk mengetahui kinerja campuran HRS – WC. Hasil penelitian 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.

Atthaullah (2024) melakukan penelitian terkait pengaruh substitusi *filler* abu bauksit terhadap karakteristik campuran *Hot Rolled Asphalt* (HRA) dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap. Penelitian tersebut menghasilkan penggunaan abu bauksit sebagai *filler* dalam campuran HRA memberikan performa yang lebih baik pada metode pencampuran bertahap dibandingkan metode konvensional. Dari sisi karakteristik volumetrik, metode bertahap menunjukkan nilai yang lebih rendah, yang menandakan bahwa campuran memiliki rongga yang lebih kecil akibat pengisian aspal yang lebih efektif, sehingga kepadatan campuran meningkat. Dalam hal kekuatan, campuran dengan metode bertahap menghasilkan nilai Stabilitas, *Flow*, MQ, dan ITS yang lebih tinggi, menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam menahan beban, kekakuan yang lebih tinggi, serta ketahanan terhadap retak. Pada aspek durabilitas, metode pencampuran bertahap juga memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan metode konvensional, seperti yang ditunjukkan oleh nilai-nilai pengujian yang mencerminkan ketahanan campuran terhadap perubahan suhu, cuaca ekstrem, serta keausan.

Khoiruddin (2025) melakukan penelitian terkait pengaruh substitusi serbuk besi terhadap karakteristik campuran *Hot Rolled Asphalt* (HRA) dengan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap. Penelitian tersebut menghasilkan kesimpulan bahwa penerapan metode bertahap pada pencampuran HRA dengan *filler* serbuk besi memberikan kinerja volumetrik yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Campuran dengan metode bertahap lebih efektif dalam mengisi rongga antar agregat, menghasilkan rongga yang lebih kecil. Dari sisi kekuatan, metode bertahap juga menunjukkan hasil yang lebih unggul dengan nilai stabilitas, *Marshall Quotient* (MQ), dan ITS yang lebih tinggi, yang mencerminkan kemampuan campuran untuk lebih lentur dan tahan terhadap beban. Dari segi durabilitas, campuran ini memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh suhu, cuaca ekstrem, dan abrasi.

Ichwan (2023) melakukan penelitian tentang perbandingan kinerja campuran AC-BC dengan metode pencampuran bertahap. Hasil dari penelitiannya dapat disimpulkan bahwa metode pencampuran dua tahap memiliki pengaruh ketahanan

campuran yang lebih baik dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional. Hal ini ditunjukkan oleh kenaikan nilai IRS, ITS, dan TSR yang signifikan.

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.

2.3 Penelitian Terkait Substitusi *Filler* pada Campuran Aspal

Adapun perbedaan penelitian penulis dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 1 Penggunaan *Filler Fly Ash* pada Campuran AC-BC

Aspek	Ardiansyah dan Hadi (2023)	Ashari dan Veronika (2024)	Aviv dkk. (2023)	Putra (2022)	Priambodo (2025)
Judul	<i>Analisa Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC) Dengan Material Substitusi Fly Ash dan Bottom Ash</i>	Pengaruh Substitusi <i>Fly Ash</i> Batu Bara Sebagai <i>Filler</i> Pada Campuran Aspal Beton Jenis <i>Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)</i>	Pengaruh Substitusi Limbah Bata Merah dan <i>Fly Ash</i> Sebagai <i>Filler</i> Campuran <i>Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)</i>	Studi Pengaruh Penggunaan <i>Fly Ash</i> dan <i>Bottom Ash</i> Terhadap Campuran Beton Aspal Lapis (AC-BC)	Pemanfaatan <i>Fly Ash</i> Sebagai <i>Filler</i> Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran AC-BC Dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap
Jenis Campuran	AC-BC	AC-BC	AC-BC	AC-BC	AC-BC
<i>Filler</i>	<i>Fly Ash</i> dan <i>Bottom Ash</i>	<i>Fly Ash</i>	Bata Merah dan <i>Fly Ash</i>	<i>Fly Ash</i> dan <i>Bottom Ash</i>	<i>Fly Ash</i>
Pengujian	<i>Marshall Test</i>	<i>Marshall Test</i>	<i>Marshall Test</i>	<i>Marshall Test</i> dan Volumetrik	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, TSR, dan CL
Hasil	Hasil yang diperoleh dari penelitian yang sudah dilakukan, komposisi yang terbaik pada penelitian <i>Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)</i> kali ini yaitu campuran normal dengan	Hasil uji <i>Marshall</i> menunjukkan bahwa pada kadar aspal optimum (KAO) sebesar 5,7%, campuran mencapai karakteristik <i>Marshall</i> yang memenuhi spesifikasi adalah pada kombinasi 50% <i>fly ash</i> dan 50% semen <i>Marshall</i>	Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar aspal optimum sebesar 5,75% memenuhi seluruh spesifikasi karakteristik <i>Marshall</i> . Komposisi <i>filler</i> yang paling sesuai adalah campuran 5% bata merah, 5% <i>fly ash</i> , dan 90%	Dalam aspek kekuatan, nilai stabilitas tertinggi diperoleh dari campuran dengan 50% FABA, berkisar 1.670,689–2.049,010 kg, dan rata-rata 1.946,141 kg. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa komposisi FABA sebesar 50%	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap dengan substitusi <i>filler fly ash</i> tipe C menghasilkan kinerja campuran AC-BC yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Campuran dengan metode bertahap memiliki karakteristik volumetrik yang lebih padat, kekuatan mekanik yang lebih

Sumber: Ardiansyah dan Hadi (2023), Ashari dan Veronika (2024), Aviv dkk. (2023), Putra (2022), dan Priambodo (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Penggunaan *Filler Fly Ash* pada Campuran AC-BC

Aspek	Ardiansyah dan Hadi (2023)	Ashari dan Veronika (2024)	Aviv dkk. (2023)	Putra (2022)	Priambodo (2025)
Hasil	nilai rata-rata tertinggi 535,90%, sedangkan untuk aspal modifikasi disini campuran Abu Batu + <i>Fly Ash</i> mendapatkan nilai rata-rata yang cukup tinggi sebesar 489%.	terbaik yang memenuhi seluruh parameter, meliputi densitas, VMA, VIM, VFB, stabilitas, <i>flow</i> , dan <i>Marshall Quotient</i> (MQ).	semen, karena mampu memenuhi semua parameter Karakteristik <i>Marshall</i> dan layak digunakan sebagai <i>filler</i> dalam campuran AC-BC.	merupakan variasi paling optimal jika ditinjau dari parameter stabilitas, sehingga memberikan kontribusi terbaik dalam kinerja campuran aspal beton lapis antara (AC-BC).	tinggi, serta durabilitas yang lebih baik terhadap pengaruh lingkungan dan beban lalu lintas.

Sumber: Ardiansyah dan Hadi (2023), Ashari dan Veronika (2024), Aviv dkk. (2023), Putra (2022), dan Priambodo (2025)

Tabel 2. 2 Penggunaan Metode Pencampuran Bertahap pada Campuran Aspal

Aspek	Kholid (2025)	Iqbal dan Fauziah (2023)	Atthaullah (2024)	Khoiruddin (2025)
Judul	Pengaruh Substitusi <i>Filler</i> Abu Bauksit Terhadap Campuran <i>Stone Matriks Asphalt</i> (SMA) dengan Metode Pencampuran Bertahap	Pengaruh Penambahan Serbuk Ban Karet Terhadap Karakteristik campuran <i>Hot Rolled Sheet</i> dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap	Pengaruh Substitusi <i>Filler</i> Abu Bauksit Terhadap Karakteristik Campuran <i>Hot Rolled Asphalt</i> (HRA) dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap	Pengaruh Substitusi Serbuk Besi Terhadap Karakteristik Campuran <i>Hot Rolled Asphalt</i> (HRA) dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap
Jenis Campuran	SMA	HRS-WC	HRA	HRA
<i>Filler</i>	Abu Bauksit	Limbah Ban Karet	Abu Bauksit	Serbuk Besi
Pengujian	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, IDP, IDK, TSR, <i>Draindown</i> , dan CL	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, TSR, AFD dan CL	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, IDP, IDK, TSR, <i>Draindown</i> , dan CL	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, IDP, IDK, TSR, <i>Draindown</i> , dan CL
Hasil	Hasil penelitian dalam hal performa mekanik, metode pengujian bertahap lebih unggul dengan nilai stabilitas, <i>flow</i> , <i>Marshall Quotient</i> (MQ), dan kuat tarik tidak langsung (ITS) yang lebih tinggi serta nilai keausan yang lebih rendah, Mengindikasikan bahwa campuran	Hasil kajian tersebut menunjukkan indikator yang baik bahwa penambahan serbuk ban karet pada kadar 2% mampu meningkatkan kinerja karakteristik <i>Marshall</i> dan stabilitas. Penggunaan metode pencampuran bertahap dapat memperbaiki kinerja campuran lebih baik dibandingkan dengan metode konvensional.	. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan abu bauksit sebagai <i>filler</i> dalam campuran HRA memberikan performa yang lebih baik pada metode pencampuran bertahap dibandingkan metode konvensional, seperti yang ditunjukkan oleh nilai-nilai pengujian yang mencerminkan ketahanan campuran terhadap perubahan suhu, cuaca ekstrem, serta keausan.	penerapan metode bertahap pada pencampuran HRA dengan <i>filler</i> serbuk besi memberikan kinerja volumetrik yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Campuran dengan metode bertahap lebih efektif dalam mengisi rongga antar agregat, menghasilkan rongga yang lebih kecil. Dari sisi kekuatan, metode bertahap juga menunjukkan hasil yang lebih unggul dengan nilai

Sumber: Kholid (2025), Iqbal dan Fauziah (2023), Atthaullah (2024), dan Khoiruddin (2025)

Lanjutan Tabel 2.2 Penggunaan Metode Pencampuran Bertahap pada Campuran Aspal

Aspek	Kholid (2025)	Iqbal (2023)	Atthaullah (2024)	Khoiruddin (2025)
Hasil	memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap beban dan deformasi. Selain itu, dari segi durabilitas, campuran dengan metode pencampuran bertahap dan substitusi abu bauksit menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh cuaca dan suhu dibandingkan dengan metode konvensional.			stabilitas, <i>Marshall Quotient</i> (MQ), dan ITS yang lebih tinggi, yang mencerminkan kemampuan campuran untuk lebih lentur dan tahan terhadap beban. Dari segi durabilitas, campuran ini memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh suhu, cuaca ekstrem, dan abrasi.

Sumber: Kholid (2025), Iqbal (2023), Atthaullah (2024), dan Khoiruddin (2025)

Lanjutan Tabel 2.2 Penggunaan Metode Pencampuran Bertahap pada Campuran Aspal

Aspek	Ichwan (2023)	Firdaus (2023)	Priambodo (2025)
Judul	Perbandingan Kinerja Campuran AC-BC dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap	Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Kinerja <i>Hot Rolled Asphalt</i> (HRA)	Pemanfaatan <i>Fly Ash</i> Sebagai <i>Filler</i> Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran AC-BC Dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap
Jenis Campuran	AC-BC	HRA	AC-BC
<i>Filler</i>	-	-	<i>Fly Ash</i>
Pengujian	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, IDP, IDK, TSR, AFD, dan CL	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, IDP, IDK, TSR, AFD, dan CL	<i>Marshall</i> , IRS, ITS, TSR, dan CL
Hasil	Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode pencampuran dua tahap dapat dijadikan alternatif untuk meningkatkan mutu dan kinerja campuran AC-BC. Berdasarkan hasil pengujian karakteristik seperti <i>Marshall Test</i> , IRS, ITS, dan TSR, metode ini memberikan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional. Sebaliknya, pada pengujian CL dan AFD, metode dua tahap justru menghasilkan nilai yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Hal ini disebabkan oleh	Berdasarkan hasil penelitian, metode pencampuran dua tahap pada campuran <i>Hot Rolled Asphalt</i> (HRA) terbukti memberikan pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan kinerja dan daya tahan (<i>durability</i>) campuran terhadap pengaruh air. Pelapisan awal agregat kasar oleh aspal pada tahap pertama pencampuran memungkinkan pengisian pori campuran secara optimal. Akibatnya, struktur campuran menjadi lebih rapat dan lebih kedap air. Hal ini tercermin dari hasil uji Marshall yang menunjukkan rendahnya angka pori dalam campuran, karena rongga-rongga terisi	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap dengan substitusi <i>filler fly ash</i> tipe C menghasilkan kinerja campuran AC-BC yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Campuran dengan metode bertahap memiliki karakteristik volumetrik yang lebih padat, kekuatan mekanik yang lebih tinggi, serta durabilitas yang lebih baik terhadap pengaruh lingkungan dan beban lalu lintas.

Sumber: Ichwan (2023), Firdaus (2023), dan Priambodo (2025)

Lanjutan Tabel 2.2 Penggunaan Metode Pencampuran Bertahap pada Campuran Aspal

Aspek	Ichwan (2023)	Firdaus (2023)	Priambodo (2025)
Hasil	kemampuan agregat dalam melapisi aspal yang berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas, durabilitas, ketahanan terhadap gaya geser, serta kemampuan kedap air dalam campuran dengan metode pencampuran dua tahap.	oleh aspal, sehingga menghasilkan stabilitas yang lebih baik. Selain itu, ketahanan campuran terhadap air meningkat secara signifikan, yang ditunjukkan melalui hasil uji IRS, IDP, IDK, dan TSR dengan nilai yang lebih tinggi. Nilai ITS dan <i>Cantabro Loss</i> juga menunjukkan bahwa campuran dengan metode pencampuran dua tahap memiliki kekuatan lebih tinggi dalam menahan beban. Sementara itu, pengujian AFD menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan, karena jenis aspal yang digunakan sebagai bahan pengikat tetap sama.	perubahan suhu, cuaca, dan keausan dibandingkan metode konvensional.

Sumber: Ichwan (2023), Firdaus (2023), dan Priambodo (2025)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Jalan

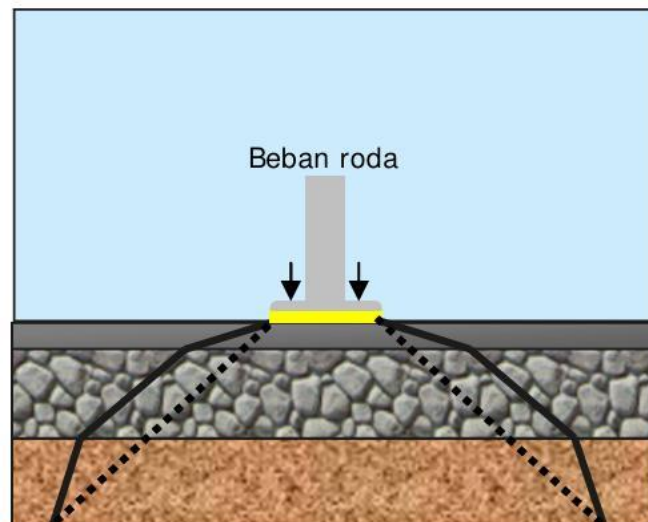
Perkerasan jalan adalah susunan lapisan yang berada di antara tanah dasar dan roda kendaraan, yang berfungsi untuk menyediakan akses transportasi bagi layanan masyarakat, dan selama masa pelayanan diharapkan tidak terjadi kerusakan (Sukirman, 2003). Perkerasan harus memiliki kekuatan dalam menahan beban lalu lintas. Permukaan pada perkerasan harus rata tetapi juga harus mempunyai kekesatan atau tahan licin (*skid resistance*) di permukaan perkerasan. Perkerasan harus dibuat dari berbagai pertimbangan, seperti persyaratan struktur, ekonomis, keawetan, kemudahan, dan pengalaman (Hardiyatmo, 2011). Oleh sebab itu struktur perkerasan perlu memiliki stabilitas tinggi, kokoh selama masa pelayanan jalan dan tahan terhadap pengaruh lingkungan dan cuaca. Kerusakan perkerasan akibat berkurangnya kekokohan jalan seperti retak (*cracking*), lendutan sepanjang lintasan kendaraan (*rutting*), bergelombang, dan berlubang, seharusnya tidak terjadi pada perkerasan jalan.

Jenis perkerasan berdasarkan bahan pengikat yang digunakan dibedakan menjadi perkerasan lentur (*flexible pavement*) adalah perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat, perkerasan kaku (*rigid pavement*) adalah perkerasan yang menggunakan semen portland, dan perkerasan komposit (*composite pavement*) adalah perkerasan kaku yang dikombinasikan dengan perkerasan lentur, contohnya perkerasan lentur di atas perkerasan kaku atau sebaliknya perkerasan kaku di atas perkerasan lentur (Sukirman, 2010).

3.2 Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*)

Perkerasan lentur (*fleksibel pavement*) merupakan jenis perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat utama. Lapisan-lapisan dalam struktur ini dirancang untuk menyebarkan dan meredam tegangan yang dihasilkan oleh kendaraan yang dihasilkan oleh kendaraan yang melintas, sehingga beban tersebut

secara bertahap diteruskan ke lapisan tanah di bawahnya. Jenis perkerasan ini umumnya diaplikasikan pada wilayah dengan intensitas lalu lintas yang tidak terlalu tinggi serta kendaraan berbobot ringan, karena kekuatan struktur perkerasan fleksibel dapat berkurang akibat tekanan beban berat atau kondisi cuaca yang ekstrem (Sukirman, 2010). Perkerasan lentur tersusun atas beberapa lapisan yang ditempatkan di atas tanah dasar yang telah dipadatkan. Beberapa lapisan memiliki fungsi utama untuk menerima beban dari lalu lintas, yang selanjutnya dialirkan ke lapisan di bawahnya (Sukirman, 2010). Adapun distribusi penyaluran beban roda pada perkerasan dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Penyebaran Beban Roda Melalui Lapis Perkerasan Jalan
(Sumber: Sukirman 2010)

3.3 Karakteristik Perkerasan Lentur

Karakteristik perkerasan lentur adalah sekumpulan sifat atau kinerja teknis yang menunjukkan sejauh mana perkerasan jenis ini mampu mendukung beban lalu lintas, beradaptasi terhadap kondisi lingkungan, serta mempertahankan fungsinya selama umur rencana. Karakteristik ini mencakup kemampuan menyalurkan beban secara bertahap dari permukaan ke tanah dasar, ketahanan terhadap deformasi, fleksibilitas terhadap perubahan cuaca, serta tingkat kenyamanan dan keamanan bagi pengguna jalan. Mutu perkerasan lentur sangat ditentukan oleh material penyusunnya (aspal, agregat, dan tanah dasar) serta kualitas perencanaan dan

pelaksanaan konstruksi. Adapun beberapa karakteristik penting yang harus dimiliki oleh perkerasan lentur adalah sebagai berikut.

1. Stabilitas

Stabilitas adalah kemampuan campuran aspal dan agregat dalam lapisan perkerasan untuk mempertahankan bentuk dan posisi strukturnya saat menerima beban berulang dari kendaraan, tanpa mengalami kerusakan seperti *rutting* (alur), *bleeding* (keluarnya aspal ke permukaan), *cracking* (retak), pecah, dan berlubang. Stabilitas perkerasan lentur sangat dipengaruhi oleh kualitas campuran aspal-agregat serta temperatur lingkungan, dan merupakan indikator utama ketahanan terhadap deformasi permanen (Sukirman, 2010).

2. Durabilitas

Durabilitas pada perkerasan lentur adalah kemampuan lapisan perkerasan untuk bertahan terhadap pengaruh cuaca, air, dan beban lalu lintas dalam jangka waktu lama tanpa mengalami kerusakan struktural maupun fungsional yang signifikan. Sukirman (2010) menyatakan durabilitas adalah kemampuan campuran perkerasan untuk mempertahankan kestabilannya terhadap pengaruh air, suhu, dan gaya luar selama masa layan. Durabilitas mencerminkan daya tahan campuran aspal terhadap pelapukan, pengaruh suhu ekstrem, kelembaban, serta proses oksidasi, yang dapat menyebabkan retak, pengelupasan, atau alur pada permukaan jalan. Faktor-faktor yang dapat mempengaruhi durabilitas adalah sebagai berikut.

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

3. Kelenturan (*Flexibility*)

Kelenturan (*Flexibility*) adalah kemampuan campuran perkerasan lentur, terutama campuran aspal dan agregat, untuk menyesuaikan terhadap perubahan bentuk atau pergerakan tanah dasar dan beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan seperti retak atau patah. Sukirman (2010) menyatakan fleksibilitas merupakan salah satu keunggulan utama dari perkerasan lentur karena sifat aspal yang dapat menyesuaikan terhadap deformasi tanpa kehilangan ikatan struktural. Untuk mendapatkan nilai fleksibilitas yang tinggi pada suatu campuran, digunakan agregat bergradasi senjang untuk mendapatkan nilai VMA yang besar dan penggunaan aspal dengan penetrasi tinggi.

4. Tahan Geser (*Skid Resistance*)

Tahan geser atau *skid resistance* adalah kemampuan permukaan perkerasan lentur untuk memberikan gaya gesekan terhadap ban kendaraan, sehingga mencegah tergelincirnya kendaraan terutama saat jalan basah atau licin. Sukirman (2010) menyatakan tahan geser (*skid resistance*) pada perkerasan lentur sangat dipengaruhi oleh tekstur permukaan dan karakteristik agregat. Tahanan geser yang baik akan mengurangi potensi selip kendaraan.

5. Kedap Air

Kedap air pada perkerasan lentur adalah kemampuan lapisan perkerasan, terutama lapisan permukaan beraspal, untuk mencegah masuknya air ke dalam struktur perkerasan. Karakteristik ini sangat penting untuk menjaga keawetan dan kekuatan perkerasan dari kerusakan akibat air. Sukirman (2010) menyatakan kedap air adalah kemampuan lapisan permukaan perkerasan untuk menolak masuknya air, sehingga melindungi lapisan di bawahnya dari kerusakan akibat kelembaban. Kedap air pada perkerasan lentur sangat penting untuk menjamin umur layanan jalan yang panjang, mencegah kerusakan akibat air, dan memastikan stabilitas struktural jalan.

6. Ketahanan Leleh

Ketahanan leleh pada perkerasan lentur adalah kemampuan lapisan perkerasan beraspal untuk menahan deformasi plastis atau alur (*rutting*)

akibat beban lalu lintas dan suhu tinggi, tanpa mengalami perubahan bentuk yang permanen. Sukirman (2010) menyatakan ketahanan leleh adalah kemampuan campuran beraspal untuk mempertahankan bentuknya di bawah beban dan suhu tinggi tanpa mengalami deformasi plastis. Faktor yang mempengaruhi ketahanan terhadap kelelahan adalah sebagai berikut.

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

7. Kemudahan Pelaksanaan (*Workability*)

Kemudahan pelaksanaan (*workability*) pada perkerasan lentur adalah tingkat kemudahan dalam proses pencampuran, pengangkutan, penyebaran, dan pemadatan campuran beraspal di lapangan, sehingga dapat dilakukan secara efisien, cepat, dan tetap menghasilkan mutu perkerasan yang baik. Sukirman (2010) menyatakan kemudahan pelaksanaan merupakan salah satu pertimbangan dalam perencanaan campuran perkerasan lentur agar proses konstruksi dapat dilakukan secara efektif dan efisien tanpa menurunkan mutu akhir perkerasan.

3.4 Material Penyusun Campuran

Bahan penyusun utama pada campuran perkerasan terdiri dari agregat, aspal, bahan pengisi (*filler*), dan bahan adiktif. Berbagai material penyusun pada campuran aspal beton yang digunakan adalah sebagai berikut.

3.3.1 Aspal

Aspal adalah material berwarna hitam atau cokelat tua yang bersifat lengket dan tahan air, yang digunakan sebagai bahan pengikat (*binder*) dalam campuran perkerasan jalan. Aspal berasal dari minyak bumi yang diolah, atau dari sumber alami, dan memiliki sifat plastis saat panas serta keras saat dingin. Menurut Sukirman (2010) aspal adalah bahan pengikat yang diperoleh dari residu penyulingan minyak bumi, yang digunakan dalam konstruksi jalan karena memiliki sifat kedap air dan daya rekat yang baik terhadap agregat. Aspal memiliki sifat daya

rekat (*adhesiveness*), *plastisitas*, kedap air (*waterproofing*), stabil terhadap suhu (*thermal susceptibility*), *elastisitas*, *durabilitas*, dan *viskositas*. Menurut Sukirman (2010) sifat-sifat aspal seperti daya rekat, *plastisitas*, kedap air, dan *elastisitas* sangat penting untuk memastikan mutu dan kinerja perkerasan jalan. Pada umumnya kadar aspal dalam campuran perkerasan berkisar 4 – 10% berdasarkan berat campuran perkerasan, atau 10 – 15% berdasarkan volume campuran perkerasan.

Berdasarkan sumbernya, jenis aspal terdiri dari:

1. Aspal Alam (*Natural Asphalt*)

Aspal alam adalah aspal yang terbentuk secara alami di alam, biasanya melalui proses pelapukan dan migrasi minyak bumi dalam waktu yang sangat lama. Terkandung dalam batuan atau tanah. Aspal merupakan residu berwarna hitam dan bersifat plastis yang terbentuk akibat penguapan komponen ringan dan gas dari minyak karena pengaruh sinar matahari dan angin. Di alam, aspal umumnya ditemukan dalam keadaan tercampur dengan mineral lainnya. Beberapa wilayah yang dikenal sebagai penghasil aspal alam antara lain Trinidad di Karibia, Venezuela di Amerika Serikat, dan Pulau Buton di Indonesia. Aspal alam memiliki kelebihan seperti kandungan aspal murni yang tinggi, tahan terhadap pelapukan dan oksidasi, cocok digunakan untuk jalan sekunder atau jalan lokal.

2. Aspal Minyak (*Aspal Buatan/Petroleum Asphalt*)

Aspal ini merupakan produk sisa dari proses penyulingan minyak bumi. Proses destilasi minyak mentah menghasilkan berbagai jenis produk, termasuk bahan bakar yang digunakan untuk kendaraan dan keperluan pembakaran lainnya. Sisa dari proses ini berupa residu yang dikenal sebagai aspal, meskipun pada tahap awal aspal tersebut masih bersifat lunak dengan nilai penetrasi sekitar 300. Melalui proses lanjutan seperti *semi-blown*, dapat dihasilkan aspal dengan tingkat penetrasi tertentu, seperti aspal penetrasi 60/70 dan jenis lainnya. Aspal minyak merupakan jenis yang paling umum digunakan di seluruh dunia.

3. Aspal Modifikasi

Aspal keras dapat dicampur dengan bahan tambahan tertentu guna meningkatkan ketahanan serta mengurangi sensitivitasnya terhadap perubahan suhu. Salah satu bahan tambahan yang umum digunakan adalah polimer, sehingga aspal hasil modifikasi ini sering disebut sebagai aspal polimer.

Di Indonesia umumnya jenis aspal keras yang dipakai dalam campuran aspal panas adalah aspal dengan tingkat penetrasi 60/70. Hal ini sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Spesifikasi Umum Bina Marga tahun 2018, ketentuan untuk Aspal Keras Penetrasi 60/70 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Ketentuan untuk Aspal Keras

No	Jenis Pengujian	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen. 60/70
1	Penetrasi pada suhu 25°C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60/70
2	Temperatur yang dihasilkan Geser Dinamis ($G^*/\sin\delta$) pada osilasi 10 rad/detik $\geq 1,0$ kPa, (°C)	SNI 06-6442-2000	-
3	Viskositas kinematis 135°C (cSt)	ASTM D2170-10	≥ 3000
4	Titik lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48
5	Daktilitas pada 25°C, (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100
6	Titik nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥ 232
7	Kelarutan dalam Trichloroethylene (%)	AASHTO T44-14	≥ 99
8	Berat jenis	SNI 2441:2011	$\geq 1,0$

Sumber: Bina Marga (2018)

3.3.2 Agregat

Agregat adalah bahan dari batuan atau sejenisnya yang digunakan untuk bahan utama dalam pembuatan perkerasan jalan. Agregat merupakan bahan granular seperti pasir, kerikil, atau batu pecah yang digunakan dalam campuran beton dan perkerasan jalan sebagai kerangka utama (Sukirman, 2010).

Dalam konstruksi jalan, agregat digunakan sebagai kerangka utama dalam campuran beraspal untuk memberikan kekuatan, stabilitas, dan daya tahan terhadap beban lalu lintas. Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 revisi 2, agregat untuk campuran aspal harus memenuhi kriteria bersih dan bebas kotoran, tidak mudah hancur atau lapuk, Memiliki gradasi yang sesuai, kuat tekan tinggi dan daya tahan

aus baik (uji abrasi *Los Angeles* < 40%), dan memiliki bentuk butir bersudut (tidak bulat) untuk meningkatkan daya ikat. Penentuan jenis agregat, kombinasi agregat, serta bahan pengikat merupakan faktor krusial dalam mempengaruhi masa layanan perkerasan. Kesalahan dalam memilih agregat yang sesuai untuk campuran perkerasan dapat menyebabkan kerusakan lebih awal pada struktur perkerasan tersebut.

Berdasarkan ukuran butiran, agregat terbagi menjadi tiga jenis adalah sebagai berikut.

1. Agregat kasar, adalah butiran agregat yang tertahan pada saringan No. 4 (> 4,75 mm).
2. Agregat halus, adalah butiran agregat yang terdiri dari pasir alami atau abu batu yang lolos ayakan pada saringan No. 4 (< 4,75 mm).
3. Bahan pengisi (*filler*), adalah 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*), debu kapur padam atau debu kapur magnesium atau dolomit yang sesuai dengan spesifikasi, atau semen atau abu terbang (*fly ash*) 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 sebagai berikut.

Tabel 3. 2 Ketentuan Agregat Kasar

Pengujian			Metode Pengujian	Nilai
Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan		Natrium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12%
		Magnesium sulfat		Maks. 18%
Abrasi dengan mesin <i>Los Angeles</i> 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 ^{**))}

Lanjutan Tabel 3. 2 Ketentuan Agregat Kasar

Pengujian		Metode Pengujian	Nilai
Partikel pipih dan lonjong	SMA	SNI 8287:2016 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 agregat adalah distribusi ukuran butiran agregat dalam suatu campuran, mulai dari ukuran paling kasar hingga paling halus. Gradasi agregat adalah distribusi ukuran partikel agregat dalam campuran yang mempengaruhi stabilitas, kekedapan, dan daya tahan perkerasan (Sukirman, 2010). Ukuran partikel agregat ditentukan melalui uji analisis saringan yang menggunakan serangkaian ayakan. Ayakan dengan bukaan terbesar ditempatkan di bagian paling atas, sedangkan ayakan dengan bukaan terkecil, yaitu No. 200, terbawah sebelum pan. Gradasi ini memiliki peran penting dalam menentukan mutu akhir dari perkerasan. Ketentuan mengenai gradasi agregat untuk campuran *Asphalt Concrete* (AC) berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 disajikan dalam Tabel 3. 4.

Tabel 3. 4 Gradasi Agregat Campuran *Asphalt Concrete* (AC)

Ukuran Ayakan		% Berat yang Lolos Terhadap Total Agregat		
ASTM	(mm)	WC	BC	Base
1½"	37,5	-	-	100
1"	25	-	100	90-100
¾"	19	100	90-100	76-90

Lanjutan Tabel 3. 4 Gradasi Agregat Campuran *Asphalt Concrete* (AC)

Ukuran Ayakan		% Berat yang Lolos Terhadap Total Agregat		
$\frac{1}{2}$ "	12,5	90-100	75-90	60-78
$\frac{3}{8}$ "	9,5	77-90	66-82	52-71
No.4	4,75	53-69	46-64	35-54
No.8	2,36	33-53	30-49	23-41
No.16	1,18	21-40	18-38	13-30
No.30	0,600	14-30	12-28	10-22
No.50	0,300	9-22	7-20	6-15
No.100	0,150	6-15	5-13	4-10
No.200	0,075	4-9	4-8	3-7

Sumber: Bina Marga (2018)

3.6 *Fly Ash* (Abu Batu Bara)

Bahan pengisi (*filler*) dalam campuran aspal beton merupakan bahan yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm). *Fly ash* atau abu terbang adalah sisa hasil pembakaran batu bara yang berbentuk partikel halus dan biasanya dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). *Fly ash* terbawa bersama gas buang dan ditangkap dengan alat penangkap debu seperti elektrostatis presipitator sebelum dilepaskan ke udara. Menurut Sukirman (2010) serta peraturan ASTM C618, *fly ash* adalah abu sisa pembakaran batu bara yang memiliki sifat *pozzolan* dan banyak dimanfaatkan sebagai material tambahan dalam campuran perkerasan. Berdasarkan SNI 2460:2014, *fly ash* (FA) diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu kelas F dan kelas C. Kelas F merupakan tipe *fly ash* yang memiliki sifat *pozzolan* dan berasal dari pembakaran batu bara jenis *bituminous*. Sedangkan kelas C juga bersifat *pozzolan*, namun dihasilkan dari pembakaran batu bara lignite dan *sub-bituminous*. Menurut penelitian Yuniarti dkk (2019), pemanfaatan limbah industri sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam campuran perkerasan jalan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kinerja perkerasan. Keterbatasan sumber daya alam mendorong pemanfaatan limbah sebagai alternatif bahan pengisi. Namun demikian, dalam pemilihan jenis *filler*, perlu mempertimbangkan beberapa faktor seperti kondisi iklim, karakteristik agregat, serta tipe perkerasan yang akan digunakan.

fly ash kelas C diproduksi dari pembakaran batubara *lignite* atau *sub-bituminous* selain mempunyai sifat *pozzolanic* juga mempunyai sifat *self-cementing*

(kemampuan untuk mengeras dan menambah *strength* apabila bereaksi dengan air) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur. *Fly ash* kelas C bersifat *self-cementing* karena tingginya kandungan CaO, SiO₂, dan Al₂O₃. Menurut Mulyono (2013), *Fly ash* kelas C memiliki kadar karbon sekitar 60% dan kadar kapur diatas 10% yang mana mempunyai sifat seperti semen. Kebutuhan kandungan kimia pada masing-masing kelas *fly ash* dapat dilihat pada Tabel 3. 5 berikut.

Tabel 3. 5 Kebutuhan Kandungan Kimia Abu Terbang

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
<i>Silicon dioxide</i> (SiO ₂) <i>plus aluminium oxide</i> (Al ₂ O ₃) <i>plus iron oxide</i> (Fe ₂ O ₃), min, %	70	70	50
<i>Sulfur trioxide</i> (SO ₃), maks, %	4.0	5.0	5.0
Moisture, maks, %	3.0	3.0	3.0
<i>Loss on ignition</i> (LOI), maks, %	10.0	6.0	6.0

Sumber: ASTM C 618-03 (2003)

3.7 Campuran *Asphalt Concrete-Binder Course*

AC-BC adalah singkatan dari *Asphalt Concrete – Binder Course*, yaitu lapisan perkerasan beraspal panas yang berfungsi sebagai lapisan pengikat (antara) dalam struktur perkerasan lentur. Secara fisik campuran AC-BC merupakan lapisan perkerasan jalan yang terbuat dari campuran agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan aspal sebagai pengikat. Secara visual, AC-BC memiliki warna hitam pekat karena dominasi aspal, dengan tekstur relatif kasar jika dibandingkan dengan lapisan atasnya (wearing course/AC-WC). Komposisi bahan pengikat aspal penetrasi 60/70 sesuai spesifikasi Bina Marga. AC-BC memiliki kandungan agregat kasar sekitar 50-70% dari total agregat, tergantung pada jenis gradasi halus atau kasar. Fraksi agregat kasar umumnya yang tertahan pada ayakan 4,75 mm (No. 4) tetapi dapat ditetapkan sebagai ukuran yang berbeda. Adapun ketentuan campuran laston AC harus memiliki sifat-sifat yang sesuai dengan Spesifikasi Bina Marga 2018 dapat dilihat pada Tabel 3.5 dan Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3. 6 Ketentuan Sifat Campuran Laston (AC)

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		Lapis Aus	Lapis Antara	Fondasi
Jumlah tumbukan perbidang		75		112 ⁽³⁾
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min.	0,6		
	Maks.	1,6		
Rongga dalam campuran (%) ⁽⁴⁾	Min.	3,0		
	Maks.	5,0		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	15	14	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.	65	65	65
Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min.	800		1800 ⁽³⁾
Pelelehan (mm)	Min.	2		3
	Maks.	4		6 ⁽³⁾
Stabilitas <i>Marshall</i> Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min.	90		
Rongga dalam campuran (%) pada Kepadatan membal (refusal) ⁽⁶⁾	Min.	2		

Sumber: Bina Marga (2018)

Tabel 3. 7 Ketentuan Sifat Campuran Laston Modifikasi (AC Mod)

Sifat-sifat Campuran		Laston		
		Lapis Aus	Lapis Antara	Fondasi
Jumlah tumbukan perbidang		75		112 ⁽³⁾
Rasio partikel lolos ayakan 0,075 mm dengan kadar aspal efektif	Min.	0,6		
	Maks.	1,6		
Rongga dalam campuran (%) ⁽⁴⁾	Min.	3,0		
	Maks.	5,0		
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min.	15	14	13
Rongga Terisi Aspal (%)	Min.	65	65	65
Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min.	1000		2250 ⁽³⁾
Pelelehan (mm)	Min.	2		3
	Maks.	4		6 ⁽³⁾
Stabilitas <i>Marshall</i> Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60 °C	Min.	90		
Rongga dalam campuran (%) pada Kepadatan membal (<i>refusal</i>) ⁽⁶⁾	Min.	2		
Stabilitas Dinamis, lintasan/mm ⁽⁷⁾	Min.	2500		

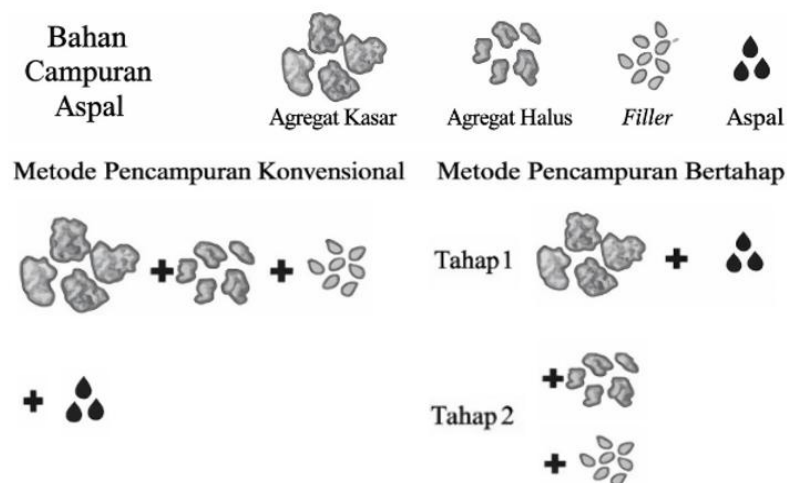
Sumber: Bina Marga (2018)

3.8 Metode Pencampuran Bertahap

Metode pencampuran bertahap adalah teknik yang digunakan untuk meningkatkan performa campuran beton aspal. Berbeda dengan metode pencampuran konvensional, yang mencampurkan agregat kasar, agregat halus, dan bahan pengikat secara serempak, metode ini dilakukan secara bertahap untuk

memperoleh hasil campuran yang lebih optimal. Metode pencampuran bertahap dilakukan dengan mencampurkan terlebih dahulu agregat kasar bersama bahan pengikat (aspal), lalu dilanjutkan dengan penambahan agregat halus dan *filler*. Menurut Kok dan Kuloglu (2011), prinsip dari metode ini adalah melapisi agregat kasar dengan kadar aspal optimum (KAO) sebelum mencampurnya dengan komponen lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini menghasilkan performa campuran yang lebih baik dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional. Hal ini karena aspal mampu menyelimuti permukaan agregat secara menyeluruh, termasuk ke dalam pori-pori agregat, sehingga campuran menjadi lebih tahan terhadap deformasi permanen dan mengurangi risiko pengelupasan akibat kontaminasi debu atau kotoran.

Penggunaan metode pencampuran bertahap mampu meningkatkan kinerja mekanik campuran AC-BC. Gambar 3.2 berikut menunjukkan tahapan metode pencampuran antara metode pencampuran konvensional dan bertahap pada campuran AC-BC.



Gambar 3. 2 Tahapan Metode Pencampuran
(Sumber: Hesami dkk, 2015)

3.9 Karakteristik Pengujian *Marshall*

Pengujian Marshall pertama kali dikembangkan oleh *Bruce Marshall*, seorang ahli teknik dari Departemen Jalan Raya Negara Bagian Mississippi, dan kemudian disempurnakan lebih lanjut oleh *U.S Corps of Engineers* melalui berbagai penelitian. Beberapa parameter penting dalam pengujian *Marshall*

meliputi stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), kepadatan (*density*), rongga udara dalam campuran total (VITM), rongga dalam agregat mineral (VMA), rongga yang terisi aspal (VFWA), serta nilai *Marshall Quotient* (MQ).

3.9.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas dalam perkerasan jalan aspal adalah kemampuan campuran beraspal untuk menahan deformasi atau perubahan bentuk akibat beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan seperti alur (*rutting*), gelombang, atau amblas. Stabilitas merujuk pada kapasitas lapisan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen seperti terbentuknya gelombang atau alur. Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan bahwa perkerasan memiliki ketahanan yang baik terhadap beban berat kendaraan. Meskipun demikian, stabilitas yang terlalu tinggi juga dapat berdampak kurang baik karena menyebabkan perkerasan menjadi terlalu kaku (Sukirman, 2003).

Nilai stabilitas ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1 berikut.

$$q = q \times s \times 0,4536 \quad (3.1)$$

Keterangan:

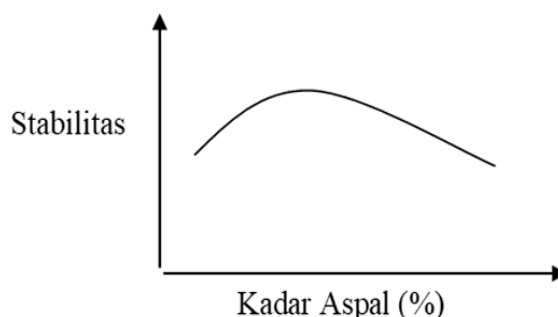
q = stabilitas (kg),

p = pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat,

s = angka koreksi benda uji, dan

0,4536 = angka konversi satuan dari *lb* ke kg.

Grafik hubungan antara kadar aspal dengan stabilitas dapat dilihat pada Gambar 3.3 sebagai berikut.

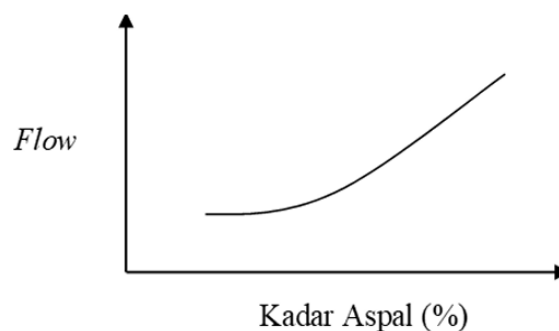


Gambar 3. 3 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan Stabilitas
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.9.2 Kelelehan (*Flow*)

Kelelehan (*flow*) merupakan ukuran deformasi vertikal yang terjadi sejak awal pembebanan hingga titik keruntuhan, dinyatakan dalam satuan milimeter atau 0,01 inci. Besarnya nilai *flow* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kadar aspal, gradasi agregat, bentuk butir agregat, serta suhu saat proses pemadatan. Perkerasan dengan nilai *flow* yang tinggi lebih menunjukkan kecenderungan pada sifat plastis dan mudah mengalami perubahan bentuk jika dibebani. Sedangkan perkerasan dengan nilai *flow* yang rendah maka cenderung bersifat lebih kaku dan getas. Semakin tinggi kadar aspal dalam campuran, maka nilai kelelehan yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Grafik hubungan antara kadar aspal dengan *flow* dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.



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

3.9.3 *Void in Total Mix* (VITM)

VITM (*Void in the Total Mix*) merupakan persentase rongga udara dalam campuran yang dihitung berdasarkan volume total campuran setelah mengalami pemadatan. Rongga ini berada di antara butiran agregat yang telah dilapisi oleh aspal. Keberadaan VITM penting sebagai ruang pergeseran butir agregat selama proses pemadatan, atau sebagai tempat penampungan ketika aspal melunak akibat suhu tinggi. Nilai VITM harus berada dalam batas minimum dan maksimum yang telah ditentukan karena berpengaruh langsung terhadap daya tahan (durabilitas) perkerasan.

Nilai ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.4 dan Persamaan 3.5 berikut.

$$VITM = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (3.4)$$

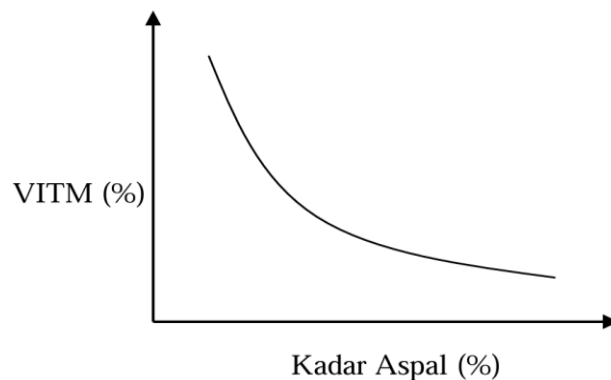
Atau dalam bentuk volume:

$$VITM = \left(\frac{V_{total} - V_{agregat} - V_{aspal}}{V_{total}} \right) \times 100\% \quad (3.5)$$

Keterangan:

- VITM = Volume udara yang tersisa dalam campuran,
- G_{mm} = berat jenis maksimum campuran aspal (rongga tanpa udara),
- G_{mb} = berat jenis *bulk* dari beton aspal padat,
- V_{total} = Total volume benda uji,
- $V_{agregat}$ = Volume agregat, dan
- V_{aspal} = Volume aspal.

Grafik hubungan antara kadar aspal dengan *Void in the Total Mix* (VITM) dapat dilihat pada Gambar 3.6 sebagai berikut.



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

3.9.4 Voids in Mineral Aggregate (VMA)

VMA (Void in Mineral Aggregate) merupakan volume rongga udara yang terdapat di antara butiran agregat dalam campuran aspal yang telah dipadatkan, termasuk rongga yang telah terisi oleh aspal. Nilai ini dinyatakan dalam bentuk persentase terhadap total volume campuran agregat dan aspal. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai VMA adalah gradasi agregat, tekstur pada agregat, serapan air oleh agregat dan kadar aspal. Berdasarkan AASHTO M 325-08 (2012),

nilai minimum VMA yang disyaratkan adalah 17%, yang juga diadopsi dalam SNI 8129:2015 sebagai acuan.

Perhitungan nilai VMA dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.6 berikut.

$$VMA = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb}} \right) P_s \quad (3.6)$$

Keterangan:

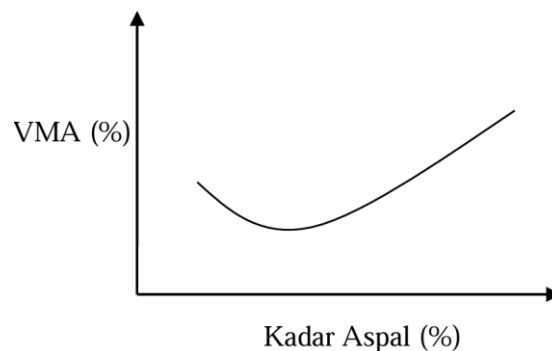
VMA = volume pori antara agregat di dalam beton aspal padat (%),

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

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

P_s = persentase berat agregat terhadap berat campuran (%).

Grafik hubungan antara kadar aspal dengan *Voids in Mineral Aggregate* (VMA) dapat dilihat pada Gambar 3.7 sebagai berikut.



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

3.9.5 *Void in Filled with Asphalt* (VFWA)

VFWA (*Void Filled with Asphalt*) adalah persentase rongga dalam campuran yang telah terisi oleh aspal setelah proses pemadatan berlangsung. Aspal yang mengisi rongga tersebut berperan penting dalam melapisi butiran agregat. Semakin tinggi nilai VFWA, maka semakin banyak rongga yang tertutup oleh aspal, yang berarti tingkat kedekatan campuran terhadap udara dan air semakin baik. Sebaliknya, nilai VFWA yang rendah menunjukkan sedikitnya rongga yang terisi aspal, sehingga potensi penetrasi udara dan air meningkat, yang pada akhirnya dapat mempercepat proses oksidasi aspal dan menurunkan stabilitas serta daya tahan (durabilitas) campuran. Sebaliknya, nilai VFWA yang terlalu tinggi dapat

menyebabkan campuran menjadi terlalu plastis, rentan terhadap deformasi seperti alur (*rutting*). Oleh karena itu, VFWA harus berada pada rentang tertentu untuk menjamin keseimbangan antara stabilitas dan fleksibilitas campuran.

Perhitungan nilai VFWA dilakukan menggunakan Persamaan 3.7 hingga Persamaan 3.11 berikut ini.

1. Perhitungan persentase aspal terhadap campuran

$$h = \frac{a}{100+b} \times 100 \quad (3.7)$$

keterangan:

a = persentase aspal terhadap batuan (%), dan

b = persentase aspal terhadap campuran (%).

2. Perhitungan persentase aspal terhadap agregat

$$m = 100 \times \frac{i}{j} \quad (3.8)$$

$$i = \frac{b \times g}{b_j \text{ Aspal}} \quad (3.9)$$

$$l = 100 - j \quad (3.10)$$

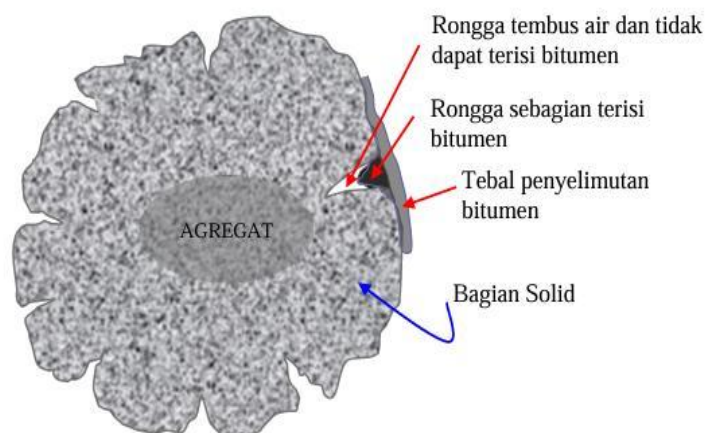
$$j = \left(\frac{(100-b) \times g}{B_j \text{ Agregat}} \right) \quad (3.11)$$

Keterangan:

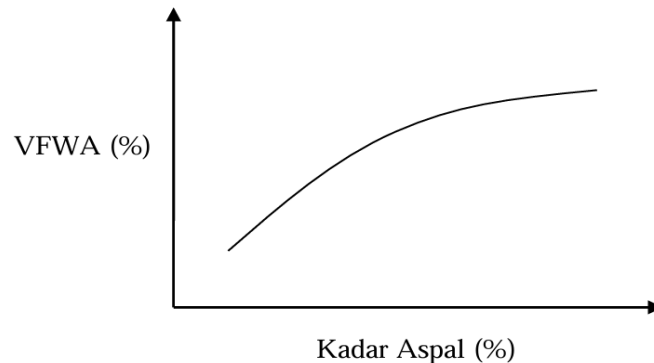
m = nilai VFWA (%),

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

b = persentase aspal terhadap campuran.



Gambar 3. 7 Ilustrasi Rongga Agregat yang Terisi Aspal
(Sumber: Subarkah, 2021)



Gambar 3. 8 Grafik Hubungan Antara Kadar Aspal dengan VFWA
(Sumber: Sukirman, 1992)

3.9.6 Marshall Quotient (MQ)

Marshall Quotient (MQ) merupakan rasio antara nilai stabilitas terhadap nilai *flow*, yang digunakan untuk menilai tingkat kelenturan (fleksibilitas) suatu campuran. Nilai MQ yang tinggi menunjukkan bahwa campuran bersifat lebih kaku dan memiliki fleksibilitas rendah. Sebaliknya, MQ yang rendah mengindikasikan campuran lebih fleksibel, namun biasanya kurang stabil. Dengan demikian, *Marshall Quotient* merupakan indikator penting dalam menilai keseimbangan antara kekakuan dan fleksibilitas campuran aspal beton, yang berpengaruh terhadap kinerja perkerasan jalan. Secara sederhana, MQ menunjukkan seberapa kuat dan kaku campuran aspal saat menerima tekanan. Nilai MQ yang tinggi menandakan bahwa campuran memiliki stabilitas yang baik dengan deformasi kecil, sehingga cenderung lebih tahan terhadap alur (*rutting*) dan beban berat. Sebaliknya, nilai MQ yang rendah menunjukkan campuran yang lebih lunak, mudah berubah bentuk, dan kurang efektif menahan beban lalu lintas.

Perhitungan nilai *Marshall Quotient* dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.12.

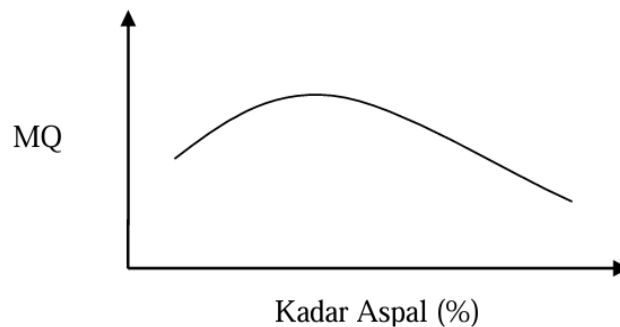
$$MQ = \frac{q}{r} \quad (3.12)$$

Keterangan:

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

q = nilai stabilitas (kg), dan

r = nilai *flow* (mm).



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

3.10 Pengujian *Index of Retained Strength* (IRS)

Immersion Test dilakukan untuk mengevaluasi perubahan sifat campuran akibat pengaruh eksternal seperti air, suhu, udara, dan kondisi cuaca. Berdasarkan standar AASHTO T 165-74 atau ASTM D 1075-54 (1969), pengujian ini terdiri dari dua metode perendaman. Pertama, benda uji direndam dalam water bath bersuhu 60°C selama 30 menit untuk mengukur stabilitas standar. Kedua, perendaman dilakukan pada suhu yang sama selama 24 jam untuk memperoleh stabilitas setelah rendaman.

Nilai *Index of Retained Strength* (IRS) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.13 berikut.

$$\text{Index of Retained Strength} = \frac{S_2}{S_1} \quad (3.13)$$

keterangan:

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

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

3.11 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS)

Indirect Tensile Strength (ITS) merupakan metode uji yang digunakan untuk menilai potensi keretakan (*fatigue*) melalui pengukuran kekuatan tarik tidak langsung pada campuran aspal beton. Pengujian ini dilakukan menggunakan benda uji berbentuk silinder yang diberi beban secara horizontal, sejajar dengan sumbu vertikal diameternya. Umumnya, kegagalan material terjadi di sepanjang bidang diameternya, yang menunjukkan beban maksimum yang mampu ditahan oleh campuran sebagai kekuatan tarik.

Nilai ITS dihitung menggunakan Persamaan 3.14 sebagai berikut.

$$ITS = \frac{2 \times P_{maks}}{\pi \times t \times D} \quad (3.14)$$

keterangan:

ITS = nilai ITS (kg/cm^2),

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

t = tinggi benda uji (cm) dan,

D = diameter benda uji (cm).

3.12 Pengujian *Tensile Strength Ratio* (TSR)

Pengujian *Tensile Strength Ratio* (TSR) bertujuan untuk menentukan rasio kekuatan tarik antara sampel campuran yang telah direndam selama 24 jam dalam waterbath bersuhu 60°C dengan sampel tanpa perendaman. Hasil perbandingan ini dinyatakan dalam bentuk persentase (%). Berdasarkan ketentuan SNI 8129:2015, nilai TSR minimal yang harus dipenuhi adalah lebih dari 80%, dengan kadar VIM sebesar $6\% \pm 1\%$.

Nilai TSR ini dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.15 sebagai berikut.

$$TSR = \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \times 100 \quad (3.15)$$

keterangan:

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

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

3.13 Pengujian *Cantabro Loss* (CL)

Pengujian *Cantabro Loss* bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan campuran terhadap gaya tumbukan atau abrasi, menggunakan alat *Los Angeles Machine*. Dalam praktik lapangan, uji *Cantabro* digunakan untuk menilai daya tahan campuran terhadap beban lalu lintas berulang yang dapat mengakibatkan penurunan mutu lapisan perkerasan. Prosedurnya melibatkan penempatan benda uji ke dalam mesin *Los Angeles*, yang kemudian diputar sebanyak 300 kali putaran dengan kecepatan 30–33 rpm pada suhu ruang, tanpa menggunakan bola baja. Setelah proses pemutaran selesai, benda uji diambil dan ditimbang kembali untuk mengetahui jumlah massa yang hilang akibat abrasi.

Hasil kehilangan massa tersebut dinyatakan dalam bentuk persentase dari berat awal benda uji, dan nilai *Cantabro* dihitung dengan Persamaan 3.16 sebagai berikut.

$$CL = \frac{M_o - M_i}{M_o} \times 100\% \quad (3.16)$$

keterangan:

CL = persentase kehilangan berat (%),

M_o = persentase sebelum diabrasi (gram), dan

M_i = berat setelah diabrasi (gram).

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Metode penelitian dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, yaitu dengan melakukan serangkaian kegiatan percobaan pengamatan untuk memperoleh 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 mangacu pada peraturan *Association of State Highway and Transportation Officials* (ASTHO), Standar Nasional Indonesia (SNI), 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. Pada penelitian ini menggunakan *filler fly ash* (abu batu bara) tipe C yang didapatkan dari limbah PLTU Kota Cilacap, aspal yang digunakan adalah Pertamina Pen 60/70.

4.3 Metode Pengambilan Data

Data primer dikumpulkan selama pelaksanaan penelitian, sedangkan data sekunder diperoleh dari hasil studi atau penelitian terdahulu. Untuk mempermudah proses pengambilan data, pengujian dilakukan berdasarkan sejumlah parameter, yaitu stabilitas, Kelelehan (*Flow*), VITM, VFWA, VMA dan rasio *Marshall*, nilai IRS, ITS, TSR, dan nilai *Cantabro Loss*. Berikut adalah langkah persiapan dan penjelasan tentang pengujian yang akan dilakukan.

4.3.1 Pemeriksaan Material

Penelitian ini merupakan jenis penelitian eksperimental yang melibatkan pengujian sampel di laboratorium sebagai metode pengumpulan data. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dan diolah berdasarkan ketentuan British Standard dan Standar Nasional Indonesia (SNI), dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2020.

4.3.2 Bahan Campuran Penelitian

Bahan yang akan digunakan pada proses pembuatan sampel ini adalah:

1. Aspal penetrasi 60/70
2. Agregat kasar dan halus
3. *Filler fly ash* (abu batu bara) tipe C

4.3.3 Peralatan Pengujian

Peralatan yang akan digunakan untuk membantu penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat uji bahan
 - a. Peralatan yang digunakan untuk menguji berat jenis dan daya serap agregat halus terhadap air meliputi: timbangan dengan kapasitas hingga 1 kg, piknometer berukuran 500 ml, kerucut terpancung berbahan logam, batang penumbuk dengan permukaan rata, saringan, oven, desikator, air suling, pompa vakum, serta talam dan bejana berisi air.
 - b. Peralatan yang digunakan untuk menguji berat jenis dan daya serap agregat kasar terhadap air mencakup keranjang kawat berkapasitas sekitar 5 kg, saringan nomor 4, oven, alat pemisah sampel, timbangan dengan kapasitas hingga 5 kg, serta wadah berisi air dengan bentuk dan ukuran yang sesuai untuk pengujian, dilengkapi dengan pipa pengatur agar tinggi permukaan air tetap konstan.
 - c. Peralatan yang digunakan dalam pengujian analisis saringan untuk agregat halus dan kasar meliputi timbangan, satu set saringan, oven, alat pembagi sampel, mesin 21 pengayak saringan, talam, kuas, sikat berbahan kuningan, sendok, serta perlengkapan pendukung lainnya.

- d. Alat-alat yang dipakai dalam pengujian nilai sand equivalent meliputi silinder ukur berbahan plastik, penutup karet, tabung irigator, pemberat kaki, larutan kalsium klorida (CaCl_2), *formaldehyde*, *glycerin*, perangkat mekanis, corong bermulut lebar, stopwatch atau jam dengan ketelitian hingga detik, serta kaleng berdiameter 57 mm dengan volume 85 ml.
- e. Peralatan yang digunakan dalam uji keausan agregat menggunakan mesin *Los Angeles* mencakup alat *Los Angeles Abrasion*, seperangkat saringan, oven pengering, serta bola-bola baja berdiameter 4,8 cm dengan berat antara 390 hingga 445 gram.
- f. Peralatan yang digunakan dalam pengujian daya lekat aspal terhadap agregat meliputi wadah pencampur berkapasitas 500 ml, timbangan digital dengan kapasitas maksimum 200 gram, pengaduk logam berbahan baja, tabung reaksi kaca, oven pemanas, seperangkat saringan, termometer logam, serta air suling dengan pH berkisar antara 6,0 hingga 7,0.
- g. Peralatan yang digunakan dalam uji penetrasi pada material bitumen meliputi alat penetrasi yang mampu menggerakkan jarum secara vertikal, dudukan jarum, beban pemberat, jarum penetrasi, wadah sampel, bak perendaman, wadah berisi air untuk benda uji, alat pengukur waktu, serta termometer.
- h. Peralatan yang diperlukan untuk menguji daktilitas pada material bitumen mencakup termometer, cetakan daktilitas berbahan kuningan, bak rendaman, alat uji daktilitas, serta bahan kimia seperti *metyl alcohol* teknik dan *sodium klorida*.
- i. Peralatan yang digunakan dalam pengujian titik lembek aspal meliputi termometer, cincin uji berbahan kuningan, dudukan sampel, alat pengarah bola, penjepit, bola baja, serta bejana gelas.
- j. Peralatan yang digunakan untuk menguji titik nyala dan titik bakar terdiri dari termometer, cawan terbuka tipe *Cleveland*, pelat pemanas, sumber pemanas, penahan angin, serta nyala penguji.
- k. Peralatan yang dipakai dalam pengujian kelarutan aspal menggunakan *Tetra Chlorida* meliputi cawan porselin, alas asbes, labu *erlenmeyer*,

kertas saring, labu penyaring, tabung penyaring, serta tabung karet untuk menahan cawan porselin. Selain itu, juga digunakan oven, neraca analitik, pembakar, pompa vakum, desikator, batang pembersih, *Carbon Tetra Chlorida*, dan *Amonium Karbonat*.

4.4 Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Pengumpulan data dilakukan melalui uji *Marshall* untuk memperoleh nilai stabilitas, *flow*, VITM, VMA, VFWA, dan *Marshall Quotient*, uji IRS, uji ITS, uji TSR, dan uji CL. Beberapa metode yang digunakan dalam penelitian dijelaskan sebagai berikut.

4.4.1 Persiapan dan Pemeriksaan

Dalam penelitian pembuatan sampel untuk campuran AC-BC, bahan yang digunakan terdiri dari agregat, *filler*, dan aspal. Penelitian ini merujuk pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2. Tahapan yang dilakukan dalam persiapan dan pemeriksaan bahan meliputi beberapa proses, yaitu.

1. Pengujian Agregat
 - a. Pengujian terhadap berat jenis dan daya serap air agregat kasar dilakukan untuk menentukan nilai berat jenis, berat jenis kering permukaan jenuh, berat jenis semu (*apparent specific gravity*), serta tingkat penyerapan air oleh agregat kasar. Berdasarkan ketentuan Bina Marga (PB0205-76), agregat kasar yang digunakan harus memiliki berat jenis minimum 2,5 dan tingkat penyerapan air maksimal sebesar 3%.
 - b. Pengujian terhadap berat jenis dan daya serap air agregat halus bertujuan untuk mengukur nilai berat jenis, berat jenis kering permukaan jenuh, berat jenis semu (*apparent specific gravity*), serta tingkat penyerapan air oleh agregat halus. Mengacu pada standar Bina Marga (PB 0205-76), agregat halus harus memiliki berat jenis paling rendah 2,5 dengan batas maksimum penyerapan air sebesar 3%.

c. Uji Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai seberapa baik agregat menempel pada aspal. Daya rekat ini dihitung berdasarkan persentase luas permukaan batuan yang dilapisi aspal dibandingkan dengan total luas permukaan batu tersebut. Berdasarkan ketentuan Bina Marga (PB0205-76), nilai minimum yang diperbolehkan untuk daya rekat adalah 95%.

d. Uji *Sand Equivalen*

Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kandungan debu, lanau atau material yang mengandung tanah liat dalam agregat halus. Berdasarkan standar AASHTO (T-176), nilai dukungan yang disyaratkan harus melebihi 50%.

e. Uji Keausan Agregat

Pengujian ini dilakukan untuk menilai ketahanan aus (abrasi) agregat kasar menggunakan mesin *Los Angeles*. Tingkat keausan dinyatakan sebagai perbandingan antara berat material yang lolos saringan No. 12 terhadap berat awal sampel. Berdasarkan ketentuan Bina Marga, nilai maksimum yang diizinkan adalah 40%.

2. Pengujian Aspal

a. Pengujian Berat Jenis Aspal

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui perbandingan massa aspal terhadap massa air suling dengan volume yang setara pada suhu tertentu. Nilai kepadatan aspal penting dalam perencanaan struktur perkerasan, karena digunakan sebagai dasar dalam menentukan kadar aspal yang dibutuhkan dalam campuran.

b. Pengujian Titik Lembek

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan titik lunak (*softening point*) dari aspal dan aspal padat dalam rentang suhu antara 30°C hingga 200°C, menggunakan metode *ring and pellet*. Dalam metode ini, lapisan aspal yang ditekan menjadi sebuah cincin yang ditekan dengan pelat baja, mempunyai berat tertentu hingga terbentuk aspal. Lapisan menyentuh pelat dasar dibawah *ring* pada ketinggian yang telah ditentukan. Hasil

pengujian ini berguna untuk menilai sejauh mana aspal peka terhadap perubahan suhu.

c. Pengujian Daktilitas

Pengujian ini bertujuan untuk menilai sifat adhesi atau daya lekat aspal. Proses pengujian dilakukan dengan mengukur jarak maksimum yang dapat dicapai saat dua cetakan berisi aspal keras ditarik hingga terputus, pada suhu dan kecepatan penarikan tertentu. Aspal yang memiliki tingkat plastisitas lebih tinggi cenderung memberikan daya ikat yang lebih baik terhadap agregat, namun juga menunjukkan *sensitive* yang lebih terhadap perubahan suhu.

d. Pengujian Penetrasi Aspal

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menentukan tingkat kekerasan aspal, guna mengklasifikasikan apakah aspal tersebut tergolong keras atau lembek (solid atau semi-solid). Pengujian ini dilakukan dengan memasukkan jarum tertentu ke dalam sampel aspal menggunakan beban dan waktu tertentu pada suhu yang telah ditetapkan. Nilai penetrasi dan titik lembek yang dihasilkan dapat menunjukkan mengenai sensitivitas aspal terhadap perubahan suhu.

e. Pengujian Kelarutan dalam *Carbon Tetra Chlorida*

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui jumlah aspal yang larut dalam *Carbon Tetra Chlorida*.

f. Pengujian Titik Nyala dan Titik Bakar

Tujuan dilakukan pengujian ini adalah untuk menentukan suhu saat aspal terlihat menyala singkat dipermukaannya (titik nyala) dan suhu saat terlihat menyala sekurang-kurangnya 5 detik (titik bakar).

3. Pengujian *Filler*

Filler merupakan bahan pengisi pada untuk campuran perkerasan yang berbentuk butiran halus. Selain itu, *filler* bisa dikatakan sebagai fraksi debu mineral lolos saringan No.200 (0,074 mm). Pengujian *filler* harus sesuai dengan ketentuan yang sudah ditetapkan.

4.4.2 Persiapan Campuran

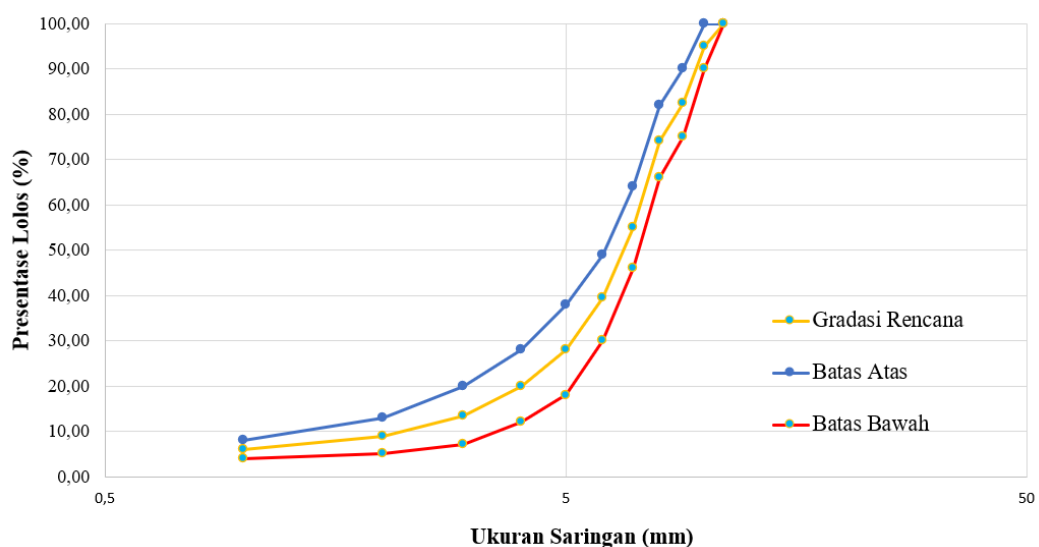
Material yang dipergunakan dalam penelitian tugas akhir ini, yaitu agregat dan aspal, yang telah diuji terlebih dahulu sebelum digunakan sebagai campuran *Asphalt Concrete Binder Course* (AC-BC). Fraksi gradasi agregat untuk campuran AC-BC dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Gradasi Agregat Campuran AC-BC

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Gradasi Rencana	
Inchi	mm	Min.	Maks.	Lolos	Tertahan
1	25	100	100	100	0
3/4	19	90	100	95	5
1/2	12,5	75	90	82,5	17,5
3/8	9,5	66	82	74	26
No. 4	4,75	46	64	55	45
No. 8	2,36	30	49	39,5	60,5
No. 16	1,18	18	38	28	72
No. 30	0,6	12	28	20	80
No. 50	0,3	7	20	13,5	86,5
No. 100	0,15	5	13	9	91
No. 200	0,075	4	8	6	94
Pan					100

Sumber: Bina Marga (2018)

Grafik gradasi rencana yang digunakan dalam campuran AC-BC dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Grafik Rencana Gradasi Agregat Campuran AC-BC

Diperoleh kadar aspal perkiraan (P_b) dengan Persamaan 4.1 sebagai berikut.

$$P_b = 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%filler) + Konstanta \quad (4.1)$$

Keterangan:

P_b = kadar aspal perkiraan,

CA = agregat kasar tertahan pada saringan No. 4,

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

Filler = agregat halus lolos saringan No. 200.

Konstanta = 0,5-1,0 untuk Laston dan Latason

$$\begin{aligned} P_b &= 0,035 (\%CA) + 0,045 (\%FA) + 0,18 (\%filler) + Konstanta \\ &= 0,035 (45\%) + 0,045 (49\%) + 0,18 (6\%) + 1 \\ &= 5,86 \% \text{ dibulatkan ke } 6 \% \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan penentuan kadar aspal perkiraan (P_b), diperoleh KAO perkiraan sebesar 6%. Sehingga kadar aspal yang akan digunakan untuk pengujian ini adalah 5%, 5,5%, 6%, 6,5%, 7% terhadap berat total campuran sebesar 1200 gr. Adapun filler menggunakan kadar substitusi dengan variasi 0%, 25%, 50%, 75%, 100% dari berat total filler. Adapun variasi dari kadar aspal untuk menentukan nilai KAO memiliki kebutuhan agregat yang berbeda pada masing-masing kadarnya, dapat dilihat pada Tabel 4.2, Tabel 4.3, Tabel 4.4, Tabel 4.5, dan Tabel 4.6 berikut.

a. Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5%

Tabel 4. 2 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
1	25	100	100	100	0	0	0
3/4	19	90	100	95	5	57	57
1/2	12,5	75	90	82,5	12,5	142,5	199,5
3/8	9,5	66	82	74	8,5	96,9	296,4
No. 4	4,75	46	64	55	19	216,6	513
No. 8	2,36	30	49	39,5	15,5	176,7	689,7
No. 16	1,18	18	38	28	11,5	131,1	820,8
No. 30	0,6	12	28	20	8	91,2	912
No. 50	0,3	7	20	13,5	6,5	74,1	986,1
No. 100	0,15	5	13	9	4,5	51,3	1037,4
No. 200	0,075	4	8	6	3	34,2	1071,6

Lanjutan Tabel 4. 2 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
Pan					6	68,4	1140
Jumlah						1140	gr

b. Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 5,5%

Tabel 4. 3 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 5,5%

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
1	25	100	100	100	0	0	0
3/4	19	90	100	95	5	56,7	56,7
1/2	12,5	75	90	82,5	12,5	141,75	198,45
3/8	9,5	66	82	74	8,5	96,39	294,84
No. 4	4,75	46	64	55	19	215,46	510,3
No. 8	2,36	30	49	39,5	15,5	175,77	686,07
No. 16	1,18	18	38	28	11,5	130,41	816,48
No. 30	0,6	12	28	20	8	90,72	907,2
No. 50	0,3	7	20	13,5	6,5	73,71	980,91
No. 100	0,15	5	13	9	4,5	51,03	1031,94
No. 200	0,075	4	8	6	3	34,02	1065,95
Pan					6	68,04	1134
Jumlah						1134	gr

c. Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6%

Tabel 4. 4 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6%

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
1	25	100	100	100	0	0	0
3/4	19	90	100	95	5	56,4	56,4
1/2	12,5	75	90	82,5	12,5	141	197,4
3/8	9,5	66	82	74	8,5	95,88	293,28
No. 4	4,75	46	64	55	19	214,32	507,6
No. 8	2,36	30	49	39,5	15,5	174,84	682,44
No. 16	1,18	18	38	28	11,5	129,72	812,16
No. 30	0,6	12	28	20	8	90,24	902,4
No. 50	0,3	7	20	13,5	6,5	73,32	975,72
No. 100	0,15	5	13	9	4,5	50,76	1026,48

Lanjutan Tabel 4. 4 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 6%

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
No. 200	0,075	4	8	6	3	33,84	1060,32
Pan					6	67,68	1128
Jumlah						1128	gr

d. Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 6,5%

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

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
1	25	100	100	100	0	0	0
3/4	19	90	100	95	5	56,1	56,1
1/2	12,5	75	90	82,5	12,5	140,25	196,35
3/8	9,5	66	82	74	8,5	95,37	291,72
No. 4	4,75	46	64	55	19	213,18	504,9
No. 8	2,36	30	49	39,5	15,5	173,91	678,81
No. 16	1,18	18	38	28	11,5	129,03	807,84
No. 30	0,6	12	28	20	8	89,76	897,6
No. 50	0,3	7	20	13,5	6,5	72,93	970,53
No. 100	0,15	5	13	9	4,5	50,49	1021,02
No. 200	0,075	4	8	6	3	33,66	1054,68
Pan					6	67,32	1122
Jumlah						1122	gr

e. Kebutuhan Agregat Pada Kadar Aspal 7%

Tabel 4. 6 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7%

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
1	25	100	100	100	0	0	0
3/4	19	90	100	95	5	55,8	55,8
1/2	12,5	75	90	82,5	12,5	139,5	195,3
3/8	9,5	66	82	74	8,5	94,86	290,16
No. 4	2,36	30	49	55	19	212,04	502,2
No. 8	1,18	18	38	39,5	15,5	172,98	675,18
No. 16	0,6	12	28	28	11,5	128,34	803,52
No. 30	0,3	7	20	20	8	89,28	892,8

Lanjutan Tabel 4. 6 Kebutuhan Agregat pada Kadar Aspal 7%

Ukuran Saringan		Spesifikasi (%)		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah Tertahan
No. 50	0,15	5	13	13,5	6,5	72,54	965,34
No. 100	0,075	4	8	9	4,5	50,22	1015,56
No. 200	2,36	30	49	6	3	33,48	1049,04
Pan					6	66,96	1116
Jumlah						1116	gr

Setelah dilakukan pengujian terhadap masing-masing *filler* didapatkan jenis *filler* abu batu sebesar 2,55 gr/cm³ dan *fly ash* batu bara tipe C sebesar 2,07 gr/cm³. Sehingga untuk penyetaraan volume sebagai berikut.

$$\text{Berat Volume Fly Ash Batu Bara} = \frac{a \times (b \times A)}{b} \quad (4.2)$$

Keterangan:

- A = Persen Kadar Substitusi (%),
a = Berat Jenis *Fly Ash* Batu Bara (gr/cm³), dan
b = Berat Jenis Abu Batu (gr/cm³).

Setelah dilakukan penyetaraan volume didapatkan kebutuhan agregat setiap variasi substitusi *filler* dengan Kadar Aspal (KAO) sebesar 6%. Kebutuhan agregat setiap variasi substitusi *filler* dapat dilihat pada Tabel 4.7 hingga Tabel 4.11 berikut.

Tabel 4. 7 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi Filler 0%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara (Gr)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara dalam Volume (gr)	Berat Tertahan Kumulatif (gr)
inch	mm	Min	Max				
1	25	100	100	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	56,40	0,00	0,00	56,40
1/2	12,5	75	90	141	0,00	0,00	197,4
3/8	9,5	66	82	95,88	0,00	0,00	293,28
#4	2,36	30	49	214,32	0,00	0,00	507,6
#8	1,18	18	38	174,84	0,00	0,00	682,44
#16	0,6	12	28	129,72	0,00	0,00	812,16
#30	0,3	7	20	90,24	0,00	0,00	902,4
#50	0,15	5	13	73,32	0,00	0,00	975,72

Lanjutan Tabel 4. 7 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi *Filler* 0%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara (Gr)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara dalam Volume (gr)	Berat Tertahan Kumulatif (gr)
inch	mm	Min	Max				
#100	0,075	4	8	50,76	0,00	0,00	1026,48
#200	2,36	30	49	33,84	0,00	0,00	1060,32
PAN		0	0	67,68	67,68	0,00	1128
Jumlah						1128	

Tabel 4. 8 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi *Filler* 25%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara (Gr)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara dalam Volume (gr)	Berat Tertahan Kumulatif (gr)
inch	mm	Min	Max				
1	25	100	100	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	56,40	0,00	0,00	56,40
1/2	12,5	75	90	141,00	0,00	0,00	197,40
3/8	9,5	66	82	95,88	0,00	0,00	293,28
#4	2,36	30	49	214,32	0,00	0,00	507,6
#8	1,18	18	38	174,84	0,00	0,00	682,44
#16	0,6	12	28	129,72	0,00	0,00	812,16
#30	0,3	7	20	90,24	0,00	0,00	902,40
#50	0,15	5	13	73,32	0,00	0,00	975,72
#100	0,075	4	8	50,76	0,00	0,00	1026,48
#200	2,36	30	49	33,84	0,00	0,00	1060,32
PAN		0	0	50,76	16,92	13,74	1124,82
Jumlah						1125	

Tabel 4. 9 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi *Filler* 50%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara (Gr)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara dalam Volume (gr)	Berat Tertahan Kumulatif (gr)
inch	mm	Min	Max				
1	25	100	100	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	56,40	0,00	0,00	56,40
1/2	12,5	75	90	141,00	0,00	0,00	197,40
3/8	9,5	66	82	95,88	0,00	0,00	293,28

**Lanjutan Tabel 4. 9 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi *Filler*
50%**

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara (Gr)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara dalam Volume (gr)	Berat Tertahan Kumulatif (gr)
inch	mm	Min	Max				
#4	2,36	30	49	214,32	0,00	0,00	507,6
#8	1,18	18	38	174,84	0,00	0,00	682,44
#16	0,6	12	28	129,72	0,00	0,00	812,16
#30	0,3	7	20	90,24	0,00	0,00	902,40
#50	0,15	5	13	73,32	0,00	0,00	975,72
#100	0,075	4	8	50,76	0,00	0,00	1026,48
#200	2,36	30	49	33,84	0,00	0,00	1060,32
PAN		0	0	33,84	33,84	27,48	1121,64
Jumlah						1122	

Tabel 4. 10 Kebutuhan Agregat pada KAO 6% Substitusi *Filler* 75%

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara (Gr)	Berat Tertahan <i>Fly Ash</i> Batu Bara dalam Volume (gr)	Berat Tertahan Kumulatif (gr)
inch	mm	Min	Max				
1	25	100	100	0,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90	100	56,40	0,00	0,00	56,40
1/2	12,5	75	90	141,00	0,00	0,00	197,40
3/8	9,5	66	82	95,88	0,00	0,00	293,28
#4	2,36	30	49	214,32	0,00	0,00	507,6
#8	1,18	18	38	174,84	0,00	0,00	682,44
#16	0,6	12	28	129,72	0,00	0,00	812,16
#30	0,3	7	20	90,24	0,00	0,00	902,40
#50	0,15	5	13	73,32	0,00	0,00	975,72
#100	0,075	4	8	50,76	0,00	0,00	1026,48
#200	2,36	30	49	33,84	0,00	0,00	1060,32
PAN		0	0	16,92	50,76	41,21	1118,45
Jumlah						1118	

Dalam memperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dilakukan pengujian *marshall* dan IRS. Rincian jumlah benda uji yang digunakan untuk mencari Kadar Aspal Optimum (KAO), dapat dilihat pada Tabel 4.11 sebagai berikut.

Tabel 4. 11 Jumlah Benda Uji untuk Memperoleh Nilai KAO

Kadar Aspal (%)	Pengujian	
	<i>Marshall</i>	IRS
5,5	3	3
6	3	3
6,5	3	3
7	3	3
7,5	3	3
Jumlah Benda Uji	30	

Setelah didapatkan nilai KAO maka dilakukan pengujian untuk setiap nilai yang didapatkan. Jumlah benda uji untuk setiap pengujian KAO dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4. 12 Benda Uji Metode Konvensional untuk *Filler* pada KAO

Pengujian	Kadar <i>Filler Fly Ash</i> (%)			
	0	25	50	75
<i>Marshall</i>	0	3	3	3
IRS	0	3	3	3
ITS	3	3	3	3
TSR	3	3	3	3
CL	3	3	3	3
Jumlah	9	15	15	15
Total	54			

Tabel 4. 13 Benda Uji Metode Dua Tahap untuk *Filler* pada KAO

Pengujian	Kadar <i>Filler Fly Ash</i> (%)			
	0	25	50	75
<i>Marshall</i>	3	3	3	3
IRS	3	3	3	3
ITS	3	3	3	3
TSR	3	3	3	3
CL	3	3	3	3
Jumlah	15	15	15	15
Total	60			

4.4.3 Pembuatan *Sample*

Setelah diperoleh nilai berat tertahan pada masing-masing kadar aspal, dilakukan proses penyaringan agregat. Penyaringan ini bertujuan untuk memisahkan butiran agregat berdasarkan ukuran sesuai nomor saringan yang digunakan. Selanjutnya, setiap fraksi butiran agregat ditimbang sesuai dengan berat tertahan pada masing-masing kadar aspal. Setelah proses penyaringan dan penimbangan selesai, agregat kasar, agregat halus, dan *filler* dibungkus menggunakan plastik.

Pada penelitian ini digunakan dua metode pencampuran agregat dengan aspal, yaitu metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran dua tahap. Pencampuran dua tahap dilakukan setelah diperoleh nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Metode ini bertujuan untuk membentuk ikatan yang lebih kuat antara aspal dengan agregat kasar serta menghasilkan pengikatan yang optimal, sehingga mampu mengatasi permasalahan debu maupun kelembapan pada agregat kasar.

Tahap berikutnya adalah pembuatan benda uji campuran. Prosedur pembuatan sampel dapat dilakukan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

1. Aspal Pen 60/70 dipanaskan hingga mencapai suhu 160°C.
2. Pada tahap pencampuran aspal panas dengan agregat panas terdapat perbedaan antara sebelum mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) dan setelah mendapatkan nilai Kadar Aspal Optimum (KAO). Perbedaan kedua proses pencampuran tersebut antara lain:

- a. Penentuan Nilai KAO

Proses pembuatan sampel yang digunakan sebelum mendapatkan nilai KAO dibuat dengan metode pencampuran konvensional yaitu dengan mencampurkan agregat kasar, agregat halus, *filler*, yang telah dipanaskan mencapai suhu 170°C dalam satu wajan dengan bahan ikat aspal panas sesuai dengan nilai kadar aspal optimum (KAO), kemudian mengaduk campuran secara merata.

- b. Campuran pada KAO

Setelah KAO diperoleh, dibuat spesimen dengan 2 metode pencampuran, yaitu:

- 1) Untuk membandingkan sampel yang digunakan pada dua metode pencampuran, campuran utama dibuat dengan cara metode pencampuran konvensional sama seperti proses pembuatan sampel penentuan nilai KAO.
- 2) Metode campuran kedua dibuat dengan metode pencampuran dua tahap. Metode pencampuran dua tahap didasarkan pada pelapisan awal agregat kasar dengan jumlah aspal sesuai dengan kadar aspal optimal sebelum pencampuran agregat halus dan *filler*.

Berikut ini tahapan yang digunakan untuk metode pencampuran dua tahap:

- a) Memanaskan agregat kasar yang sebelumnya telah dipisahkan dengan agregat halus dan *filler* dengan wajan yang berbeda hingga masing-masing agregat kasar, agregat halus dan *filler* mencapai suhu 170°C.
 - b) Mencampurkan agregat kasar terlebih dahulu dengan aspal sesuai dengan nilai kadar aspal optimum (KAO) dan mengaduk secara merata hingga aspal menutupi seluruh permukaan agregat kasar.
 - c) Agregat kasar yang telah terlapisi oleh aspal kemudian dicampurkan dengan agregat halus, *filler*, dan serat selulosa yang sebelumnya telah dipanaskan pada wajan yang berbeda. Kemudian mengaduk campuran secara merata. Peninjauan sampel yang dibuat menggunakan metode pencampuran dua tahap disusun menjadi dua kelompok. Kelompok pertama menggunakan bahan ikat aspal Pen 60/70.
3. Membersihkan cetakan benda uji *mold* dan mengolesi bagian dalamnya dengan minyak pelumas.
 4. Meletakkan selembur kertas / kertas penghisap yang sudah digunting sesuai dengan ukuran cetakan dibagian bawah cetakan, kemudian memasukkan benda uji 1/3 dari volume cetakan dan dipukul menggunakan spatula sebanyak 25x (15x pukulan di pinggir, dan 10x pukulan di tengah), kemudian memasukkan benda uji hingga 2/3 dari volume cetakan dan dipukul menggunakan spatula sebanyak 25x, dengan cara tersebut memasukkan benda uji kembali hingga penuh dalam volume cetakan dan dipukul menggunakan spatula sebanyak 25x dan menaruh kertas penghisap di permukaan.

5. Meletakkan cetakan *mold* diatas dudukannya (landasan) pemadatan. Memadatkan sebanyak 50 x pukulan di sisi pertama dan menumbuk 50 x pukulan di sisi kedua.
6. Mendinginkan benda uji sesudah pemadatan selesai sampai mencapai suhu ruang, kemudian mengeluarkan benda uji dari cetakan dengan menggunakan *ejector hydrolic pump* lalu mendinginkan sampel sampai mencapai suhu ruang. Setelah dingin ambil kertas penghisap di kedua sisi untuk memberikan kodefikasi terhadap sampel tersebut.

4.4.4 Uji *Marshall*

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan tingkat kestabilan campuran terhadap deformasi plastis. Pengujian ini mengacu pada AASHTO T-245-74 dan ASTM D-1559-62 T. Tahapan pengujian dijelaskan sebagai berikut.

1. Prosedur Pengujian yang dilakukan dalam pengujian *Marshall* meliputi langkah-langkah berikut ini.
 - a. Menyiapkan agregat dipisahkan menggunakan saringan sesuai dengan gradasi yang telah ditentukan, kemudian ditimbang dan disimpan di tempat terpisah sesuai dengan variasi kadar aspal yang akan diuji,
 - b. Meletakkan agregat kasar, agregat halus, dan *filler* dipanaskan hingga suhu 150 °C,
 - c. Meletakkan aspal Pen 60/70 dipanaskan sampai suhu 160 °C – 170 °C,
 - d. Selanjutnya agregat dan aspal yang sudah panas dicampurkan, lalu aduk agregat dan aspal tersebut sampai agregat terlapisi dengan merata,
 - e. Setelah temperatur pemadatan tercapai, campuran dimasukkan kedalam cetakan (*mold*) yang sudah diolesi oli terlebih dahulu dan bagian bawahnya dilapisi selembat kertas minyak yang ukurannya menyesuaikan ukuran cetakan sambil ditumbuk-tumbuk dengan spatula sebanyak 15 kali dibagian tepi dan 10 kali untuk bagian tengah,
 - f. Meletakkan objek untuk dipadatkan menggunakan alat penumbuk dengan melakukan 75 kali tumbukan pada bagian permukaan atas, lalu

membalikkan objek dan melakukan 75 kali pemukulan pada bagian bawah dengan jumlah tumbukan yang sama,

- g. Setelah selesai proses pemadatan, benda uji disimpan sampai suhunya turun sampai suhu ruangan. Setelah dingin, benda uji dikeluarkan menggunakan *ejector* dan diberi kode,
- h. Selanjutnya benda uji dibersihkan dari kotoran dan debu yang menempel,
- i. Lalu benda uji diukur dimensinya pada tiga sisi yang berbeda, lalu di rata-rata menggunakan alat pengukur dengan tingkat penelitian 0,1 mm,
- j. Meletakkan benda uji untuk ditimbang dalam keadaan kering,
- k. Meletakkan benda uji untuk direndam selama kurang lebih 24 jam pada suhu ruangan agar nantinya benda uji dalam keadaan jenuh air,
- l. Kemudian benda uji ditimbang dalam air,
- m. Selanjutnya benda uji dikeluarkan dari bak perendaman dan dikeringkan dengan kain pada permukaannya agar kondisinya menjadi kering permukaan jenuh (SSD), lalu melakukan penimbangan,
- n. Kemudian benda uji direndam dalam waterbath selama 30 menit pada suhu $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,
- o. Setelah itu benda uji dibersihkan dan melumasi batang penuntun (*guide road*) dan permukaan dalam kepala penekan (*test head*) agar kepala penekan dapat berjalan tanpa hambatan,
- p. Kemudian benda uji dikeluarkan dari *waterbath* dan dipasangkan ring lalu diletakan pada piston pendorong,
- q. Selanjutnya arloji kelelahan (*flow meter*) dipasangkan pada posisi di atas salah satu batang penuntun (*guide road*),
- r. Memasang kepala penekan benda uji dinaikan supaya menyentuh alas cincin penguji, lalu mengatur kedudukan arloji tekan pada angka nol,
- s. Melakukan pembebanan dengan kecepatan yang tetap di 50 mm/menit, sampai pembebanan maksimum tercapai atau pembebanan menurun seperti ditunjukkan oleh jarum arloji tekan dan mencatat pembebanan maksimum yang tercapai (stabilitas) serta angka pada arloji kelelahan (*flow*),

- t. Setelah selesai, benda uji dilepas dan dicatat hasil yang didapat dilanjutkan dengan menganalisis data tersebut.

4.4.5 Uji IRS

Uji ini dilakukan untuk mengetahui nilai durabilitas pada campuran yang dilakukan rendaman dalam *waterbath* selama 24 jam. Berikut langkah pengujian IRS.

1. Pertama rendam sampel yang sebelumnya sudah melalui proses rendaman selama 24 jam pada suhu ruang agar benda uji dalam kondisi jenuh.
2. Kemudian timbang sampel pada kondisi jenuh,
3. Selanjutnya lap sampel sampai kering, lalu sampel ditimbang didalam air,
4. Lalu rendam kembali sampel dalam water bath dengan suhu 60°C selama 24 jam,
5. Langkah akhir dari pengujian ini yaitu melakukan uji *Marshall*.

4.4.6 Uji ITS

Langkah-langkah yang dilakukan pada pengujian ini adalah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan bahan-bahan,
2. Selanjutnya membuat sampel dengan kadar aspal optimum yang telah didapatkan dari pengujian *Marshall*,
3. Meletakkan sampel pada alat uji *Indirect Tensile Strength*,
4. Lalu catat nilai dial dari hasil pengujian,
5. Melakukan analisis data dan membuat pembahasan dan kesimpulan ITS.

4.4.7 Uji TSR

Pengujian TSR bertujuan untuk mengetahui daya tahan tarik sampel. Berikut merupakan langkah-langkah pengujian.

1. Membersihkan sampel dari kotoran,
2. Selanjutnya ukur sampel pada setiap sisi dan diambil tebal rata-rata,
3. Lalu rendam benda uji selama 30 menit dan benda uji menjadi jenuh,
4. Setelah di rendam benda uji diambil lalu ditimbang saat keadaan jenuh,
5. Selanjutnya benda uji direndam dalam waterbath selama 24 jam sengan, suhu konstan 60°C,

6. Setelah dilakukan perendaman, benda uji didiamkan selama 24 jam dalam suhu ruang 25°C.
7. Selanjutnya benda uji diletakkan pada alat pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS),
8. Kemudian sampel diberikan pembebanan hingga mencapai beban maksimum yang ditandai dengan arloji pembebanan berhenti dan berbalik arah,
9. Melakukan pencatatan pada hasil pembebanan,
10. Terakhir nilai tarik terkoreksi dihitung dan dilakukan analisis.

4.4.8 Uji *Cantabro Loss* (CL)

Sampel yang digunakan adalah sampel yang sudah didiamkan selama 7 hari pada suhu ruang. Kemudian dalam alat uji abrasi *Los Angeles* dengan putaran sebanyak 300 putaran tanpa bola baja. Sampel dikeluarkan dan timbang berat sebelum dan sesudah melakukan pengujian, kemudian dicatat dan dihitung menggunakan rumus CL.

4.5 Analisis Data

1. Karakteristik *Marshall*

Setelah pengujian *Marshall*, kemudian dilakukan analisis data. Data yang diperoleh dari hasil pengujian adalah sebagai berikut.

- a. Berat benda uji sebelum direndam (gram).
- b. Berat benda uji di dalam air (gram).
- c. Berat benda uji dalam keadaan jenuh air (gram).
- d. Tebal benda uji (cm).
- e. Pembacaan arloji stabilitas (kg).
- f. Pembacaan arloji kelelahan *flow* (mm).

Nilai karakteristik *Marshall* diperoleh dengan menghitung berat jenis aspal dan menghitung berat jenis agregat dapat dilihat dari Persamaan 4.3 dan Persamaan 4.4 berikut ini.

$$B_j \text{ Aspal} = \frac{\text{Berat}}{\text{Volume}} \quad (4.3)$$

$$B_j \text{ Agregat} = \frac{(A.F1)+(B.F2)}{100} \quad (4.4)$$

Keterangan:

- A = peresentasi agregat kasar,
- B = persentasi agregat halus,
- F1 = berat jenis agregat kasar, dan
- F2 = berat jenis agregat halus.

Nilai *stability*, *flow*, MQ, VITM, VFWA, VMA dan *density* dapat diperoleh dari data diatas.

2. ITS

Nilai *Indirect Tensile Strength* (ITS) adalah nilai kuat tarik maksimum dihitung dari puncak beban, dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan (3.15).

3. TSR

Didapatkan dari perbandingan nilai ITS setelah dilakukan rendaman, dapat dihitung menggunakan Persamaan (3.16).

4. CL

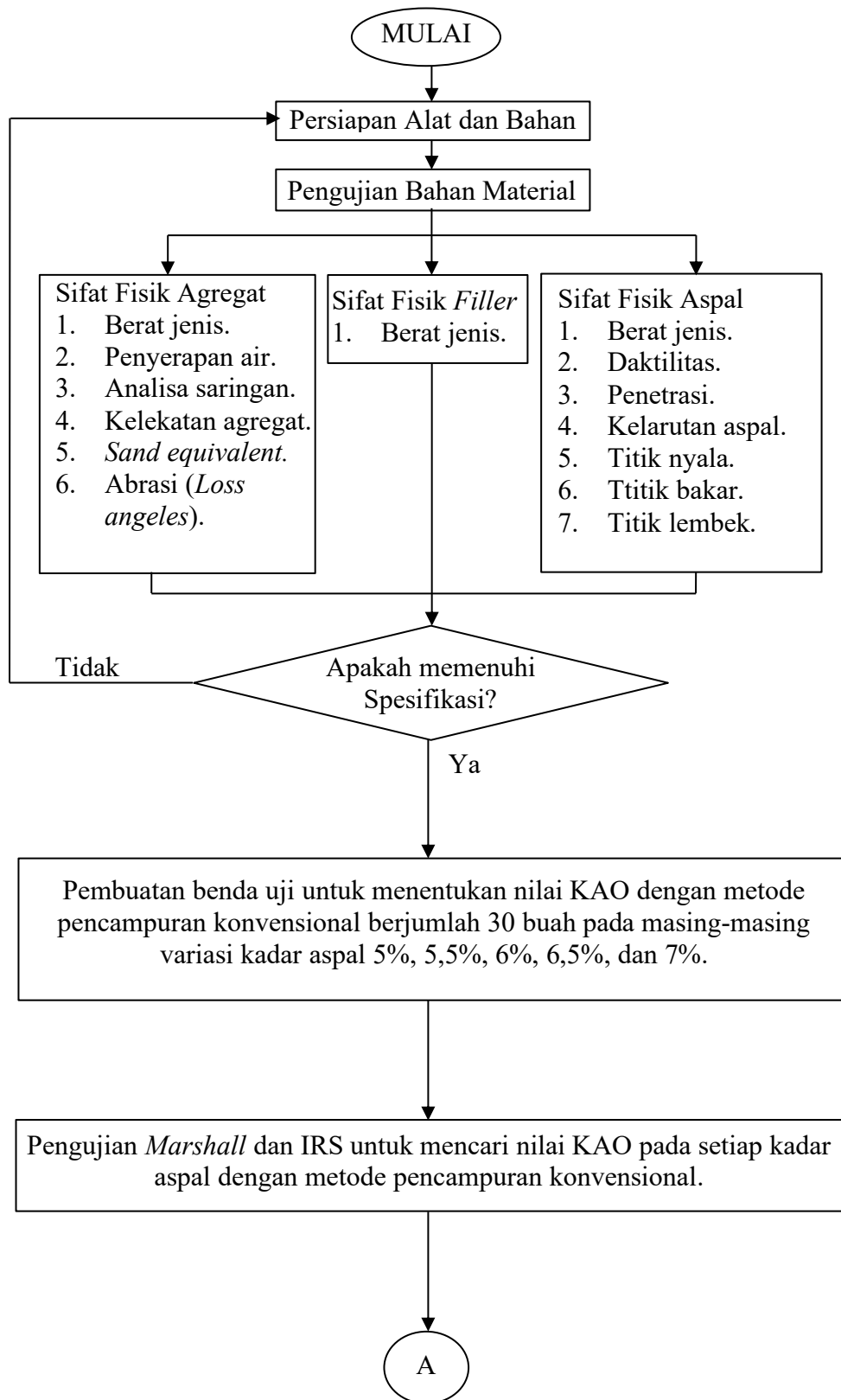
Bertujuan untuk mengetahui berapa persentase kehilangan berat sampel setelah melalui tes keausan mesin *Los Angeles*. Dapat dihitung dengan Persamaan (3.17).

5. IRS

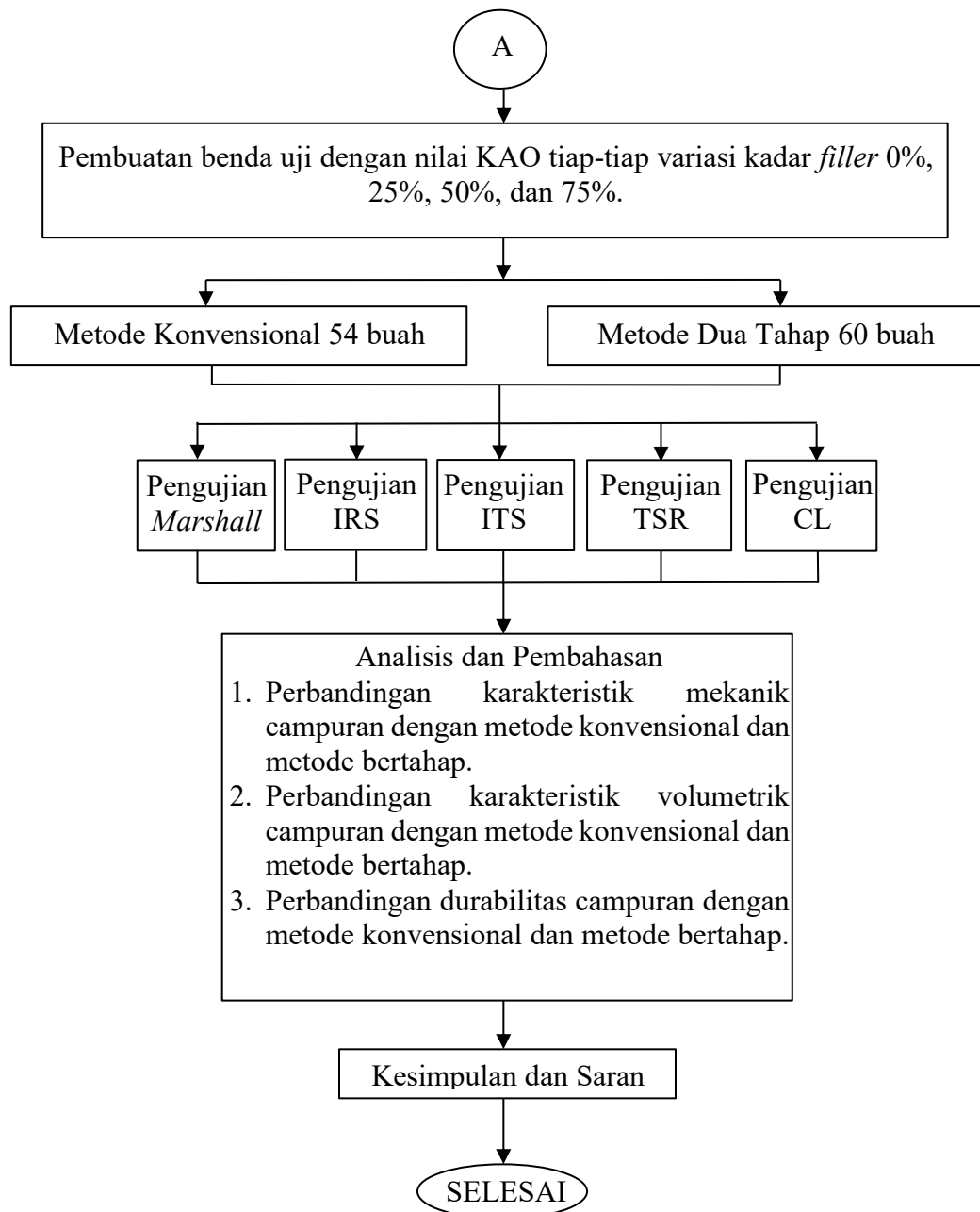
Nilai *Index of Retained Strength* dapat diperoleh dari hasil *Immersion Test*, kemudian dihitung menggunakan Persamaan (3.14).

4.6 Bagan Alir Penelitian

Dalam penelitian ini dibuat bagan alir atau *flowchart* yang menunjukkan urutan atau tahap – tahap pekerjaan yang akan dilakukan selama penelitian. Adapun bagan alir atau *flowchart* dapat dilihat pada Gambar 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4. 2 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian Bahan dan Campuran

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

5.1.1 Hasil pengujian Karakteristik Aspal

Jenis aspal yang digunakan adalah aspal Pen 60/70. Pengujian terhadap karakteristik aspal dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data yang diperoleh sudah memenuhi persyaratan spesifikasi yang ditetapkan. Proses pengujian ini mengacu pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini.

Tabel 5. 1 Hasil pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat jenis	$\geq 1,0$	1,051	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	60-70	66,5	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	≥ 100	168,8	Memenuhi
4	Titik bakar (°C)	≥ 232	310	Memenuhi
5	Titik nyala (°C)	≥ 232	290	Memenuhi
6	Titik lembek (°C)	≥ 48	48	Memenuhi
7	Kelarutan pada TCE (%)	≥ 99	99,51	Memenuhi

5.1.2 Hasil Pengujian Karakteristik Agregat

Uji karakteristik agregat melibatkan serangkaian tes, di antaranya pengujian agregat kasar, agregat halus, dan *filler*. Pengujian karakteristik agregat dilaksanakan di Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data yang didapat telah sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Prosedur pengujian ini merujuk pada Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.2, Tabel 5.3, dan Tabel 5.4 berikut.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	$\geq 2,5$	2,61
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 3	1,83
3	Kelekatan agregat terhadap aspal (%)	≥ 95	98
4	Keausan agregat dengan mesin <i>Los Angeles</i> (%)	≤ 40	13,11

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Agregat Halus Clereng

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	$\geq 2,5$	2,53
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 3	0,39
3	<i>Sand equivalent</i> (%)	≥ 50	93,35

Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis *Filler*

No	Jenis Pengujian	Hasil
1	Berat jenis <i>filler</i> abu batu	2,55
2	Berat jenis <i>filler fly ash</i> batu bara tipe C	2,07

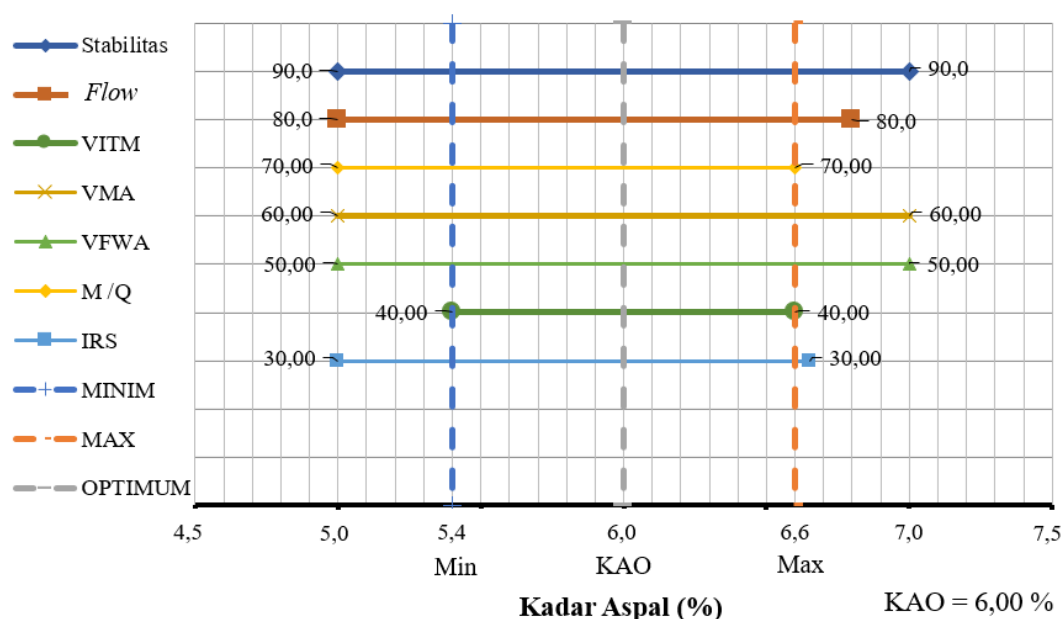
5.1.3 Hasil Pengujian Campuran untuk Menentukan Kadar Aspal Optimum

Pengujian ini dilaksanakan untuk memperoleh nilai KAO pada campuran AC-BC dengan menggunakan aspal Pen 60/70. Hasil pengujian yang diperoleh adalah nilai stabilitas, *flow*, MQ, VMA, VITM, VFWA, dan IRS.

Tabel 5. 5 Hasil Pengujian Aspal Pertamina Pen 60/70

Pengujian	5	5,5	6	6,5	7	Spesifikasi
Stabilitas 0 jam (kg)	898	978	1040	984	830	> 800
Stabilitas 24 jam (kg)	810	891	959	891	739	> 800
<i>Flow</i> (mm)	3,223	3,563	3,790	3,883	4,077	> 2-4
MQ (kg/mm)	278,62	274,44	274,62	253,49	203,64	> 250
VITM (%)	5,543	4,774	3,935	3,102	2,557	> 3-5
VFWA (%)	66,02	71,29	76,71	81,94	85,70	> 68
VMA (%)	16,31	16,63	16,90	17,17	17,70	> 14
IRS (%)	90,16	91,15	92,15	90,48	89,06	> 90

Berdasarkan Tabel 5.5, Hasil pengujian untuk mencari Kadar Aspal Optimum (KAO) yang dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Didapatkan nilai KAO campuran AC-BC melalui perhitungan secara grafis. Nilai Kadar Aspal Optimum (KAO) pada campuran AC-BC dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5. 1 Grafik Kadar Aspal Optimum (KAO)

Berdasarkan Gambar 5.1, Kadar Aspal Optimum berada pada 6,00%, Kadar Aspal Optimum (KAO) digunakan untuk menentukan variasi substitusi *filler*, pada penelitian ini variasi substitusi *filler* bermula pada 0%, 25%, 50%, dan 75%. Kadar substitusi *filler* didapatkan berdasarkan pengujian pada kadar substitusi 50% dan 75%, pada pengujian tersebut didapatkan batas maksimum atau batas atas pada kadar substitusi 75% sehingga kadar substitusi hanya berada pada substitusi 75%. Pada penelitian ini substitusi *filler* yang digunakan adalah campuran antara abu batu dan *fly ash* batu bara tipe C sebagai pengganti *filler* pada variasi substitusi. Untuk penentuan berat volume didasarkan dari berat jenis masing-masing *filler fly ash* tipe C dan berat jenis abu batu Clereng tersebut, dilakukan proses perhitungan konversi berdasarkan berat jenis dengan berat jenis *fly ash* tipe C sebesar 2,07 dan berat jenis

abu batu Clereng sebesar 2,55. Hasil dari perhitungan perbandingan kedua *filler* tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut ini.

Tabel 5. 6 Berat Debu Batu dan *Fly Ash* Batu Bara Tipe C

Kadar Variasi Substitusi <i>Filler</i> (%)	Berat <i>Filler</i> Abu Batu (gr)	Berat <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (gr)	Kadar Aspal Optimum (%)
0	67,68	0	6,00
25	50,76	13,74	
50	33,84	27,48	
75	16,92	41,21	

Tabel 5. 7 Hasil Pengujian *Marshall Test* pada Metode Pencampuran Konvensional

Substitusi <i>Filler</i> (%)	Stabilitas (Kg)	<i>Flow</i> (mm)	VITM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	MQ (Kg/mm)
0	1040,36	3,34	3,94	16,90	76,67	311,60
25	967,10	3,43	4,03	16,95	76,20	281,69
50	915,95	3,66	4,40	17,23	74,47	250,59
75	879,34	3,92	4,84	17,58	72,49	224,71
Spesifikasi	>800	2-4	3-5	>14	>65	>250

Tabel 5. 8 Hasil Pengujian *Marshall Test* pada Metode Pencampuran Bertahap

Substitusi <i>Filler</i> (%)	Stabilitas (Kg)	<i>Flow</i> (mm)	VITM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	MQ (Kg/mm)
0	1106,23	3,15	3,65	16,64	78,09	351,58
25	1024,27	3,25	3,75	16,70	77,57	314,83
50	970,44	3,51	4,07	16,94	75,99	276,50
75	926,85	3,78	4,49	17,28	73,99	245,53
Spesifikasi	>800	2-4	3-5	>14	>65	>250

Tabel 5. 9 Hasil Pengujian *Index of Retained Strength* (IRS) pada Metode Pencampuran Konvensional

Substitusi <i>Filler</i> (%)	Stabilitas Normal (Kg)	Stabilitas Rendaman (Kg)	IRS (%)
0	1040,36	1000,82	96,20
25	967,10	911,44	94,24
50	905,03	839,54	92,76
75	879,34	808,28	91,92
Spesifikasi	>800	>800	>90

Tabel 5. 10 Hasil Pengujian *Index of Retained Strength* (IRS) pada Metode Pencampuran Bertahap

Substitusi <i>Filler</i> (%)	Stabilitas Normal (Kg)	Stabilitas Rendaman (Kg)	IRS (%)
0	1106,23	1083,79	97,97
25	1024,27	982,30	95,90
50	970,44	915,63	94,35
75	926,85	865,54	93,38
Spesifikasi	>800	>800	>90

Tabel 5. 11 Hasil Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS) dan *Tensile Strength Ratio* (TSR) pada Metode Pencampuran Konvensional

Substitusi <i>Filler</i> (%)	ITS Normal (kPa)	ITS Rendaman (Kpa)	TSR (%)
0	883,04	860,26	97,42
25	862,01	830,91	96,39
50	842,10	800,23	95,03
75	820,73	768,99	93,70
Spesifikasi	-	-	>80

Tabel 5. 12 Hasil Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS) dan *Tensile Strength Ratio* (TSR) pada Metode Pencampuran Bertahap

Substitusi <i>Filler</i> (%)	ITS Normal (Kpa)	ITS Rendaman (Kpa)	TSR (%)
0	889,83	881,58	99,07
25	874,49	863,19	98,71
50	859,40	835,10	97,17
75	843,46	809,13	95,93
Spesifikasi	-	-	>80

Tabel 5. 13 Hasil Pengujian *Cantabro Loss* Normal pada Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap

Substitusi <i>Filler</i> (%)	Kehilangan Berat Konvensional (%)	Kehilangan Berat Bertahap (%)
0	3,94	3,27
25	4,97	4,32
50	6,08	5,28
75	7,32	6,24
Spesifikasi	< 20	< 20

5.2 Pembahasan

5.2.1 Pembahasan Pengujian Karakteristik Aspal

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

1. Berat Jenis Aspal

Berat jenis aspal merupakan perbandingan antara massa bitumen dengan volume air suling pada suhu tertentu, dengan kondisi volume yang serupa. Nilai berat jenis bitumen cenderung berubah-ubah, tergantung pada faktor seperti tingkat penetrasi serta suhu bitumen itu sendiri. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diperoleh nilai berat jenis sebesar 1,051, yang mana angka tersebut telah memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni lebih dari 1,00.

2. Penetrasi Aspal

Uji penetrasi aspal bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan material aspal. Semakin kecil nilai penetrasi yang diperoleh, semakin keras aspal tersebut. Aspal dengan kekerasan yang lebih tinggi umumnya memiliki daya lekat yang lebih baik serta nilai kohesi yang lebih tinggi, yang sangat penting untuk kestabilan dan daya tahan permukaan jalan. Berdasarkan hasil pengujian, aspal Pertamina Pen 60/70 tercatat dengan nilai penetrasi sebesar 66,50 mm, yang sesuai dengan standar yang tercantum dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu berkisar antara 60 hingga 70 mm.

3. Daktilitas Aspal

Pengujian daktilitas aspal dilakukan untuk menilai sejauh mana aspal dapat mengalami perubahan bentuk (deformasi) tanpa mengalami keretakan ketika diberikan tekanan atau tarikan. Tes ini memberikan gambaran mengenai tingkat kelenturan aspal dan kemampuannya untuk tahan terhadap pembentukan retakan, yang sangat penting untuk kestabilan jalan dalam kondisi beban dan suhu yang bervariasi. Berdasarkan hasil pengujian, aspal menunjukkan nilai daktilitas sebesar 168,8 cm, yang memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni minimal 100 cm.

4. Titik Lembek Aspal

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

5. Titik Nyala Aspal dan Titik Bakar Aspal

Uji titik nyala aspal bertujuan untuk menentukan suhu maksimum di mana aspal dapat dipanaskan tanpa berisiko menghasilkan uap yang mudah terbakar atau memercikkan api. Pengujian ini penting untuk memastikan keselamatan dalam pengolahan aspal pada suhu tinggi. Hasil uji menunjukkan bahwa titik nyala aspal tercatat pada suhu 290 °C, yang memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 232 °C. Sementara itu, uji titik bakar aspal dilakukan untuk mengetahui suhu di mana aspal mulai memercikkan api yang dapat terlihat menyala selama sekitar lima detik di permukaannya. Hasil uji menunjukkan bahwa titik bakar aspal tercatat pada suhu 310 °C, yang juga memenuhi standar Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu lebih dari 232 °C.

6. Kelarutan dalam *Trychloroethylene* (TCE)

Uji kelarutan dalam TCE bertujuan untuk mengukur seberapa baik aspal dapat larut dalam Trychloroethylene (TCE), yang berfungsi sebagai indikator tingkat kemurnian aspal tersebut. Hasil dari uji ini memberikan informasi tentang kualitas aspal, di mana semakin banyak aspal yang larut, semakin tinggi tingkat kemurniannya. Hal ini menandakan bahwa kandungan zat pengotor atau mineral dalam aspal sangat rendah, sehingga dapat meminimalkan potensi gangguan terhadap kekuatan ikatan antara aspal dan agregat dalam campuran aspal. Berdasarkan hasil uji, diperoleh nilai kelarutan sebesar 99,51%, yang memenuhi persyaratan dari Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 99%.

5.2.2 Pembahasan Pengujian Karakteristik Agregat Halus

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

1. Berat Jenis Agregat Halus

Berat jenis merupakan perbandingan antara massa per satuan volume suatu material dengan massa air yang memiliki volume yang sama pada suhu tertentu. Pengujian berat jenis pada agregat halus Clereng, Kulon Progo menghasilkan nilai sebesar 2,53. Nilai ini sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menetapkan batas minimal berat jenis agregat halus sebesar 2,5%.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Halus

Penyerapan air oleh agregat mengacu pada kemampuan material untuk menyerap air melalui pori-pori atau rongga yang ada di dalamnya. Semakin besar rongga atau pori pada agregat, semakin banyak aspal yang diperlukan untuk mencapainya, karena tingkat penyerapannya yang tinggi. Hasil pengujian penyerapan air pada agregat halus Clereng, Kulon Progo menunjukkan nilai sebesar 0,39 yang sesuai dengan standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu maksimal 2%.

3. *Sand Equivalent*

Uji sand equivalent digunakan untuk menilai tingkat kebersihan agregat dari kandungan debu, lumpur, atau kotoran lainnya yang dapat mempengaruhi kualitas campuran aspal. Hasil uji *sand equivalent* pada agregat halus Clereng, Kulon Progo menunjukkan nilai sebesar 93,35%. Nilai ini telah memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yang mengharuskan nilai minimal sebesar 50%. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa agregat halus Clereng memiliki tingkat kebersihan yang baik dan relatif bebas dari kandungan kotoran yang dapat mengurangi daya lekat aspal terhadap agregat.

5.2.3 Pembahasan Pengujian Karakteristik Agregat Kasar

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

1. Berat Jenis Agregat Kasar

Berat jenis agregat kasar mengacu pada rasio antara massa agregat kasar dan volume yang ditempatinya pada suhu tertentu, dan biasanya diukur dalam satuan gram per sentimeter kubik (gr/cm^3). Agregat kasar dengan berat jenis yang lebih tinggi umumnya memiliki kerapatan yang lebih besar, yang dapat memberikan dampak positif terhadap kekuatan serta stabilitas campuran aspal. Selain itu, berat jenis agregat kasar juga memberikan gambaran mengenai sifat fisik agregat, seperti tingkat porositas dan kemampuannya untuk menahan deformasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis agregat kasar tersebut mencapai 2,61, yang sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 2,5.

2. Penyerapan Air oleh Agregat Kasar

Uji penyerapan air oleh agregat dilakukan untuk mengukur sejauh mana agregat dapat menyerap air yang masuk melalui pori-pori atau rongga dalam strukturnya, mulai dari kondisi kering hingga mencapai titik jenuh. Agregat dengan pori yang lebih besar cenderung memiliki kemampuan penyerapan yang lebih tinggi, yang mengarah pada kebutuhan aspal yang lebih banyak

untuk mengisi rongga-rongga tersebut. Sebaliknya, agregat dengan pori-pori yang lebih kecil akan menyerap air lebih sedikit, sehingga memerlukan aspal dalam jumlah yang lebih rendah. Hasil pengujian menunjukkan nilai penyerapan sebesar 1,83%, yang memenuhi standar Bina Marga 2018 Revisi 2, yang menetapkan nilai maksimal penyerapan air sebesar 2%.

3. Kelekatan Agregat Terhadap Aspal

Uji kelekatan agregat terhadap aspal dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana agregat dapat membentuk ikatan yang kuat dan stabil dengan aspal. Pengujian ini memberikan wawasan mengenai kemampuan agregat untuk berikatan secara efektif dengan aspal, yang sangat penting untuk memastikan bahwa campuran aspal dapat mempertahankan kinerjanya dengan baik di berbagai kondisi lapangan. Hasil pengujian menunjukkan nilai kelekatan sebesar 98%, yang memenuhi standar yang ditetapkan dalam Bina Marga 2018 Revisi 2, yaitu minimal 95%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat memiliki kemampuan ikatan yang sangat baik dengan aspal, memastikan ketahanan campuran aspal dalam jangka panjang.

4. Keausan Agregat Kasar dengan Mesin *Los Angeles*

Uji keausan menggunakan mesin Los Angeles bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana agregat dapat bertahan terhadap proses pengikisan yang terjadi selama penggunaannya. Agregat dalam campuran aspal memiliki peran penting dalam menopang beban lalu lintas yang melewati permukaan jalan, sehingga ketahanan terhadap keausan menjadi faktor yang sangat krusial. Agregat yang tahan terhadap gesekan dari roda kendaraan akan memiliki umur pakai yang lebih panjang dan mempertahankan kualitas jalan lebih lama. Berdasarkan hasil pengujian, nilai keausan yang diperoleh adalah 13,11%, yang memenuhi batasan yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, yakni maksimal 40%.

5.2.4 Pembahasan Pengujian Karakteristik Bahan Pengisi (*Filler*)

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

1. Pengujian Berat Jenis *Filer* Abu Batu

Berat jenis agregat merupakan rasio antara massa agregat per unit volume dengan massa air pada suhu yang telah ditentukan. Nilai berat jenis ini berpengaruh langsung terhadap jumlah pori dalam agregat. Agregat dengan berat jenis yang lebih tinggi cenderung memiliki lebih sedikit pori, yang pada gilirannya mengurangi jumlah aspal yang dibutuhkan dalam campuran. Sebaliknya, agregat dengan berat jenis rendah akan memiliki lebih banyak pori, sehingga memerlukan lebih banyak aspal untuk mengisi rongga-rongga tersebut. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai berat jenis yang diperoleh adalah 2,55.

2. Pengujian Berat Jenis *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C

Berat jenis *filler fly ash* batu bara tipe C adalah rasio antara massa per unit volume *filler fly ash* batu bara tipe C tersebut dengan massa air yang memiliki volume yang sama pada suhu tertentu. Uji berat jenis ini memberikan gambaran mengenai kerapatan material, yang penting untuk menentukan sifat-sifat fisik material tersebut dalam aplikasinya. Berdasarkan hasil pengujian, nilai berat jenis yang diperoleh adalah 2,07.

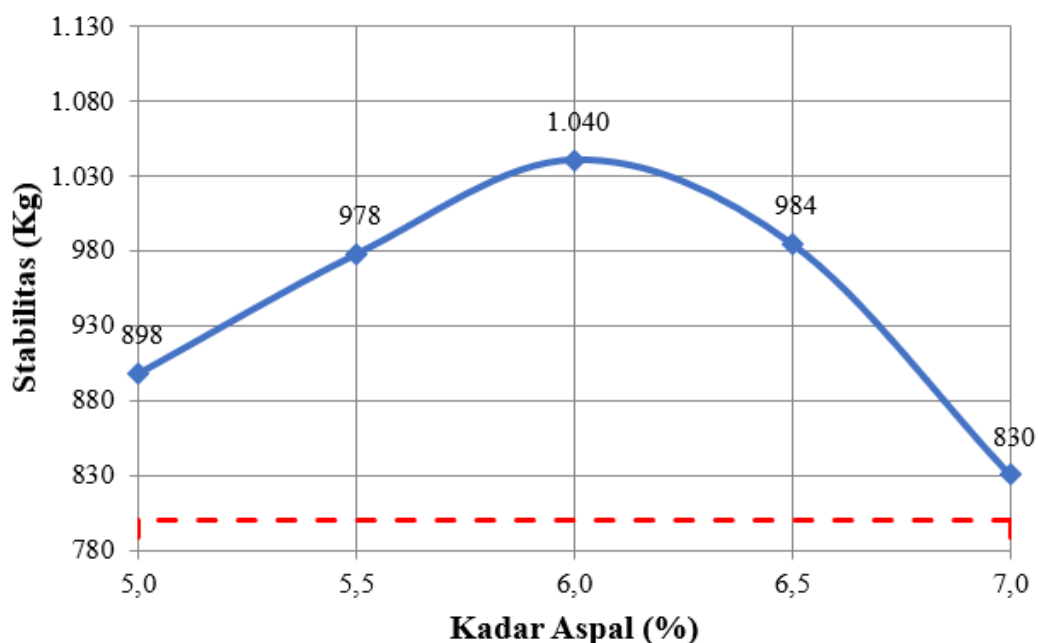
Menentukan berat volume memerlukan pemahaman mengenai berat jenis setiap jenis *filler*. Ini penting untuk membandingkan volume antar *filler* agar bisa disesuaikan dengan volume yang sama. Karena, berat jenis *fly ash* batu bara tipe C sebagai pengganti *filler* berbeda dibandingkan dengan berat jenis *filler* abu batu.

5.2.5 Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Campuran Untuk Menentukan KAO

1. Analisis Pengaruh Nilai Stabilitas untuk Menentukan KAO

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

rendah, serta kelembaban yang fluktuatif. Nilai stabilitas tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.



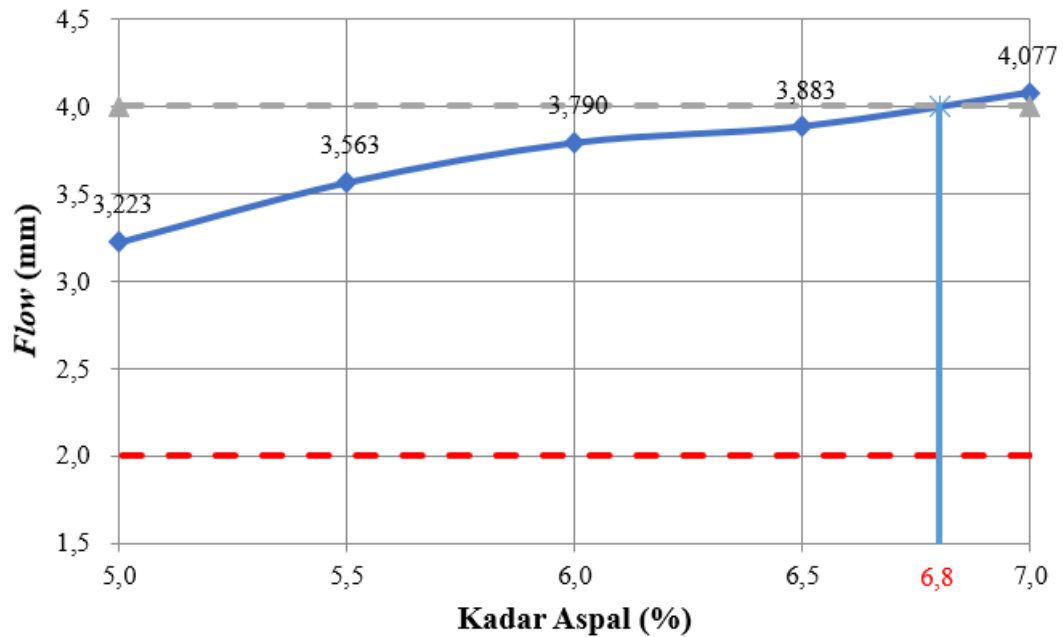
Gambar 5. 2 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Stabilitas

Pada Gambar 5.2, terlihat bahwa nilai stabilitas campuran meningkat seiring dengan peningkatan kandungan aspal. Namun, setelah mencapai puncaknya, stabilitas mulai menurun. Titik optimalnya tercatat pada kadar aspal 6%, setelah itu nilai stabilitas mengalami penurunan. Peningkatan stabilitas ini berkorelasi dengan penambahan kadar aspal hingga mencapai batas optimal, setelah itu stabilitas akan berkurang jika kadar aspal terus bertambah. Fenomena ini terjadi karena semakin tingginya kadar aspal, menyebabkan lapisan aspal menjadi lebih tebal, sehingga mengurangi gesekan antar partikel agregat. Berdasarkan persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2, campuran AC-BC harus memenuhi nilai stabilitas minimal sebesar 800 kg. Campuran dengan kadar aspal antara 5,0% hingga 7,0% telah memenuhi standar minimum yang ditetapkan.

2. Analisis Pengaruh Nilai *Flow* untuk Menentukan KAO

Kelelahan (*flow*) mengacu pada sejauh mana campuran aspal mengalami perubahan bentuk atau deformasi ketika diberikan beban. Parameter ini sangat penting dalam mengevaluasi kinerja campuran aspal, terutama pada

penggunaan jalan raya, karena menggambarkan seberapa baik campuran tersebut dapat menahan tekanan tanpa mengalami kerusakan bentuk yang signifikan. Nilai kelelahan dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut.



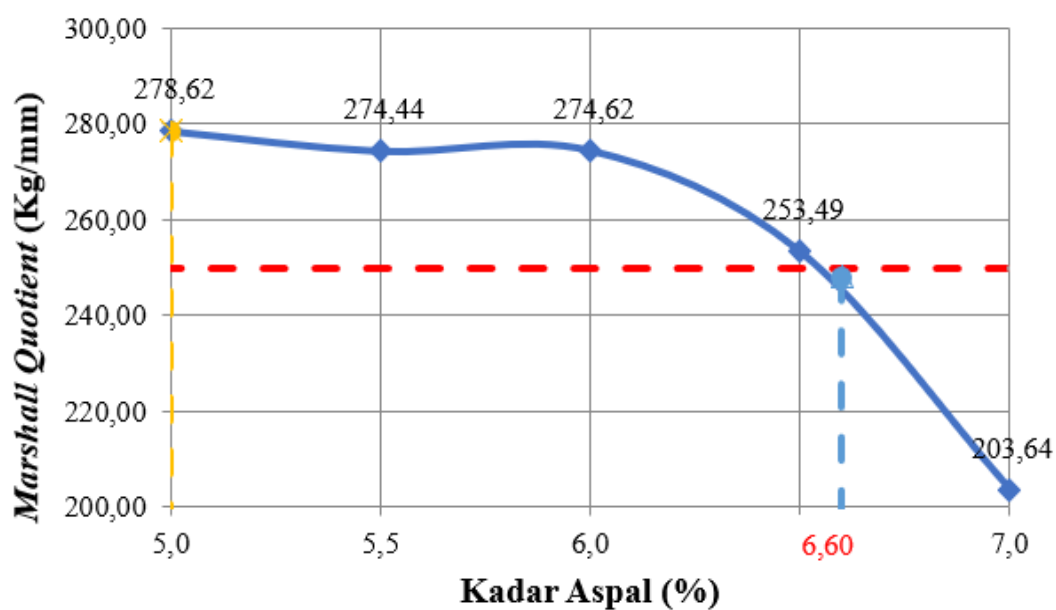
Gambar 5. 3 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai Flow

Pada Gambar 5.3 terlihat bahwa nilai *flow* meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal dalam campuran, yang disebabkan oleh penebalan lapisan aspal. Peningkatan kadar aspal akan memperbesar nilai *flow*, yang pada gilirannya membuat campuran menjadi lebih plastis. Kondisi ini menyebabkan campuran lebih mudah mengalami deformasi atau perubahan bentuk ketika diberikan beban. Menurut spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, nilai *flow* yang diharapkan berada dalam rentang 2 hingga 4 mm. Campuran dengan kadar aspal antara 5,0% hingga 6,8% sudah memenuhi kriteria minimum yang ditetapkan, sedangkan campuran dengan kadar aspal 6,8%-7% sudah tidak memenuhi kriteria yang telah ditetapkan.

3. Analisis Pengaruh Nilai MQ untuk Menentukan KAO

Marshall Quotient (MQ) adalah rasio antara nilai stabilitas dan kelelahan (*flow*), yang digunakan untuk mengukur keseimbangan antara kekakuan dan kelenturan suatu campuran. Semakin tinggi nilai MQ, maka campuran

cenderung lebih kaku, sedangkan nilai MQ yang lebih rendah menunjukkan campuran yang lebih lentur atau fleksibel. Nilai MQ dapat dilihat pada Gambar 5.4 berikut.

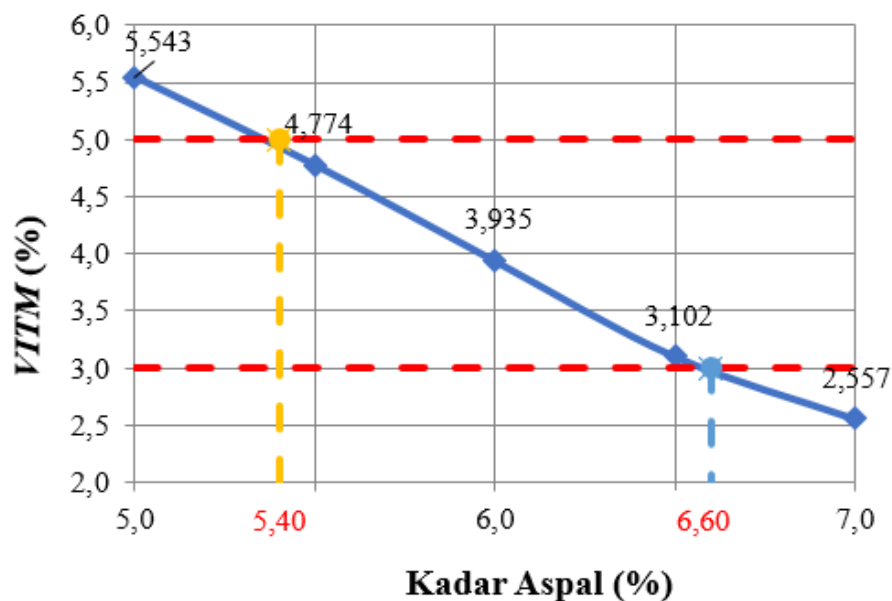


Gambar 5. 4 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai MQ

Pada Gambar 5.4, terlihat bahwa nilai *Marshall Quotient* (MQ) cenderung menurun seiring dengan bertambahnya kadar aspal. Penurunan ini dipengaruhi oleh beberapa faktor yang berhubungan dengan struktur dan komposisi campuran aspal dan agregat. Peningkatan kadar aspal juga berimbas pada naiknya nilai *flow*, yang mengindikasikan bahwa campuran menjadi lebih rentan terhadap deformasi saat diberi beban. Faktor ini menyebabkan nilai MQ menurun, karena nilai *flow* yang tinggi mengarah pada ketahanan campuran yang lebih rendah terhadap tekanan. Selain itu, pada kadar aspal 5% hingga 7% ketika kadar aspal terlalu tinggi, interaksi antar partikel agregat berkurang, mengurangi gesekan di antara partikel, dan menurunkan kekuatan struktural campuran. Campuran dengan kadar aspal antara 5,0% hingga 6,55% telah memenuhi standar minimum yang ditetapkan, sedangkan pada campuran kadar aspal 6,60% hingga 7% sudah tidak memenuhi kriteria yang telah ditentukan. Untuk *Marshall Quotient* syarat yang ditetapkan pada ketentuan Bina Marga 2018 Revisi 2 yaitu lebih dari 250 kg/mm.

4. Analisis Pengaruh Nilai VITM untuk Menentukan KAO

VITM (*Void in Total Mix*) adalah persentase yang menggambarkan perbandingan antara ruang kosong atau rongga udara dengan volume total campuran setelah proses pemadatan. Seiring dengan bertambahnya kadar aspal, nilai VITM cenderung menurun, karena ruang kosong antara partikel agregat semakin terisi oleh aspal. Hal ini terjadi karena aspal mengisi rongga yang ada dalam campuran, mengurangi volume udara yang tersisa. Nilai VITM dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut.



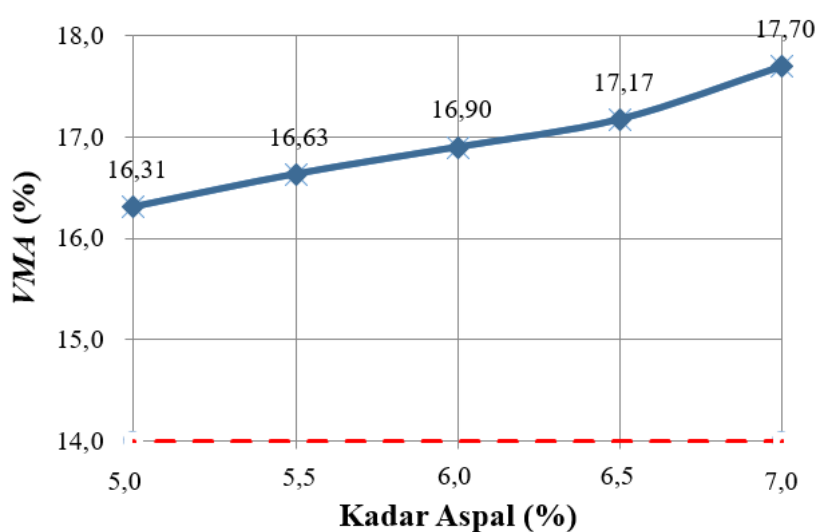
Gambar 5. 5 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VITM

Pada Gambar 5.5, dapat dilihat bahwa nilai VITM cenderung menurun seiring dengan meningkatnya kadar aspal dalam campuran. Penurunan ini disebabkan oleh semakin banyaknya aspal yang mengisi rongga udara antara partikel agregat, yang dikenal sebagai VFWA (*Void Filled with Asphalt*). Proses ini mengurangi ruang kosong dalam campuran. Pada kadar aspal 5% hingga 5,35% dan 6,55% hingga 7%, campuran tersebut tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh Bina Marga 2018 Revisi 2, karena nilai VITM untuk campuran AC-BC harus berada antara 3% (batas bawah) dan 5% (batas atas). Peningkatan kadar aspal akan menurunkan nilai VITM, yang berimbas pada kedepannya campuran terhadap air. Hal ini menyebabkan

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

5. Analisis Pengaruh Nilai VMA untuk Menentukan KAO

VMA (*Void in Mineral Aggregate*) merupakan indikator yang menunjukkan volume rongga dalam agregat mineral yang terisi oleh aspal, yang dihitung dalam bentuk persentase. Nilai VMA ini dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut.



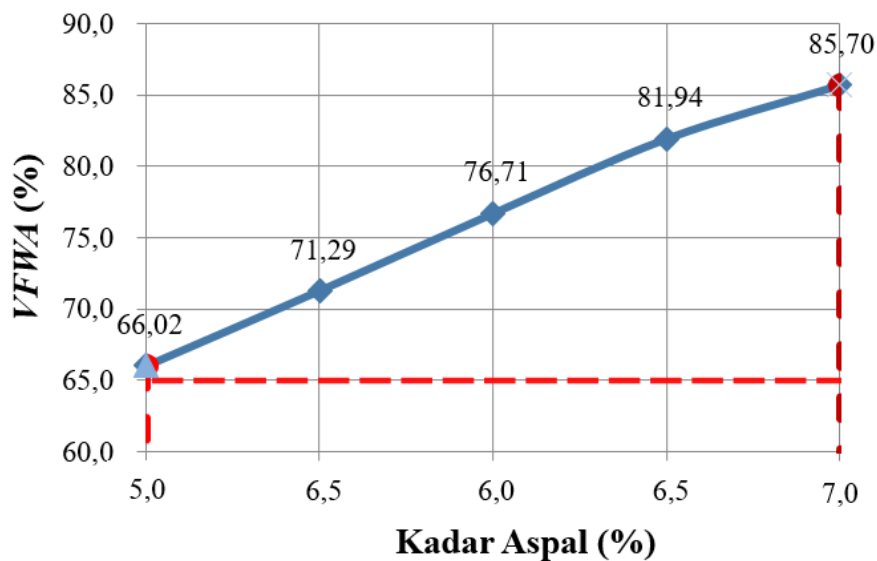
Gambar 5. 6 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VMA

Pada Gambar 5.6 Grafik tersebut menunjukkan hubungan antara kadar aspal dengan nilai *Void in Mineral Aggregate* (VMA) pada campuran aspal beton. Terlihat bahwa semakin tinggi kadar aspal yang ditambahkan, nilai VMA juga mengalami peningkatan secara konsisten dari 16,31% pada kadar 5,0% hingga mencapai 17,70% pada kadar 7,0%. Kenaikan ini berlangsung bertahap, di mana peningkatan terkecil terjadi pada interval 5,5%–6,0% dengan selisih hanya 0,27%, sedangkan kenaikan terbesar terdapat pada interval 6,5%–7,0% dengan perbedaan sebesar 0,53%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kadar aspal pada rentang tinggi lebih berpengaruh terhadap pertambahan rongga antar mineral dalam campuran. Kondisi ini mengindikasikan bahwa campuran yang diuji sudah memenuhi ketentuan syarat Bina Marga 2018 Revisi 2 dengan nilai batas minimum VMA sebesar 14%. Grafik ini memperlihatkan bahwa kadar aspal pada rentang

5,0% hingga 7,0% masih menghasilkan nilai VMA yang sesuai dan dapat mendukung kinerja perkerasan.

6. Analisis Pengaruh Nilai VFWA untuk Menentukan KAO

VFWA (*Voids Filled with Asphalt*) adalah persentase rongga dalam agregat (VMA) yang terisi oleh aspal atau rongga udara yang tersisa dalam campuran. Nilai VFWA dapat dilihat pada Gambar 5.7 berikut ini.



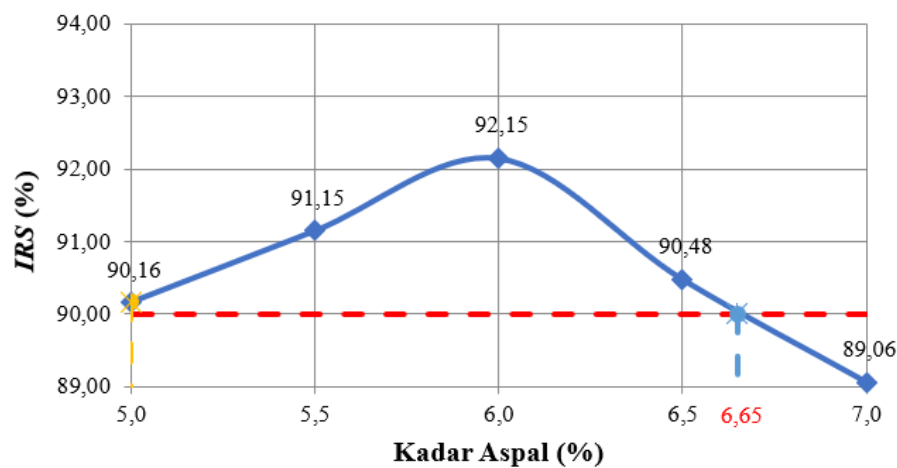
Gambar 5. 7 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai VFWA

Pada Gambar 5.7 tersebut menampilkan hubungan antara kadar aspal (%) dengan nilai *Void Filled with Asphalt* (VFWA) pada campuran aspal beton. Dari grafik terlihat bahwa nilai VFWA meningkat secara signifikan seiring bertambahnya kadar aspal dari 5,0% hingga 7,0%. Pada kadar aspal 5,0% nilai VFWA sebesar 66,02%, kemudian meningkat menjadi 71,29% pada kadar 5,5%, selanjutnya naik lagi menjadi 76,71% pada kadar 6,0%, lalu mencapai 81,94% pada kadar 6,5%, hingga akhirnya pada kadar aspal 7,0% nilai VFWA tertinggi yaitu 85,70%. Garis hijau horizontal menunjukkan batas minimum VFWA sebesar 65%, dan hasil uji pada semua kadar aspal sudah melampaui persyaratan tersebut. Hal ini membuktikan bahwa rongga dalam agregat telah terisi aspal dengan baik sehingga dapat memberikan stabilitas yang cukup terhadap campuran. Pada Gambar 5.7 menunjukan bahwa nilai VFWA meningkat seiring bertambahnya kadar aspal. Pada

kadar aspal 5%-7% telah memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, campuran AC-BC harus memiliki nilai VFWA lebih dari 65%.

7. Analisis Pengaruh Nilai IRS untuk Menentukan KAO

Nilai IRS dihitung dengan membandingkan stabilitas campuran setelah direndam selama 24 jam dalam waterbath pada suhu 60°C dengan stabilitas campuran yang direndam selama 0,5 jam. Menurut Spesifikasi Bina Marga Revisi 2 Tahun 2018, campuran SMA harus memiliki nilai IRS lebih dari 90%. Hasil pengujian IRS dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



Gambar 5. 8 Grafik Pengaruh Kadar Aspal Terhadap Nilai IRS

Pada Gambar 5.8 Grafik hubungan antara *Index of Retained Strength* (IRS) dan kadar aspal pada campuran AC-BC menunjukkan bahwa nilai IRS meningkat seiring dengan bertambahnya kadar aspal hingga mencapai titik optimum, kemudian mengalami penurunan kembali. Pada kadar aspal 5,0% nilai IRS sebesar 90,16%, masih memenuhi syarat minimum 90% menurut Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Ketika kadar aspal dinaikkan menjadi 5,5% dan 6,0%, nilai IRS meningkat masing-masing menjadi 91,15% dan 92,15%, di mana kadar aspal 6,0% merupakan kondisi optimum karena menghasilkan IRS tertinggi. Namun, setelah melewati kadar tersebut, nilai IRS mulai menurun, yaitu 90,48% pada kadar aspal 6,5% dan turun lebih jauh menjadi 89,06% pada kadar aspal 7,0%, sehingga tidak lagi memenuhi persyaratan. Pola ini menunjukkan bahwa kadar aspal yang terlalu rendah menghasilkan lapisan film aspal yang tipis sehingga ikatan kurang optimal,

sedangkan kadar aspal yang terlalu tinggi menyebabkan lapisan film aspal berlebih dan mudah terkelupas oleh air (*stripping*). Dengan demikian, rentang kadar aspal yang masih memenuhi syarat IRS berada pada 5,0%–6,65%, sedangkan kadar aspal optimum dari segi ketahanan terhadap pengaruh air adalah sekitar 6,0%.

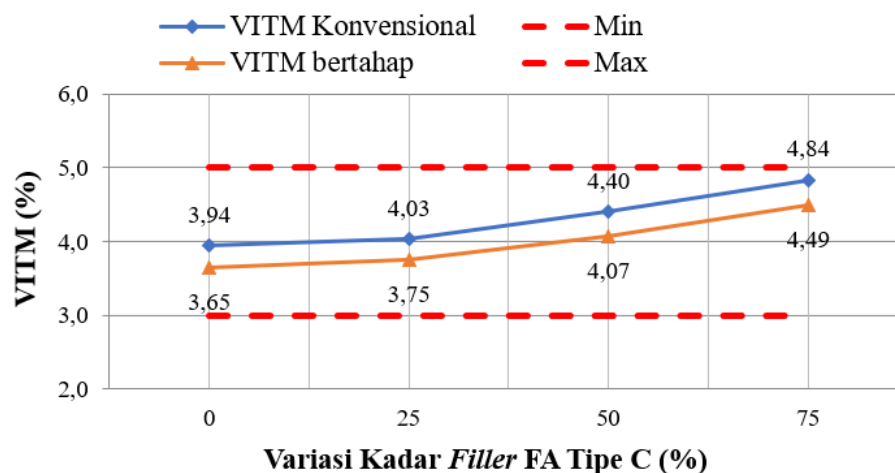
5.2.6 Pembahasan Substitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C pada KAO Campuran dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap.

Berdasarkan hasil pengujian-pengujian diatas pada campuran *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC), didapatkan nilai KAO campuran sebesar 6,0% dengan berat jenis pada *filler* abu batu Clereng sebesar 2,55 sedangkan berat jenis *filler fly ash* batu bara tipe C sebesar 2,07. Berikut merupakan hasil pengujian pengaruh substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap.

1. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* terhadap Nilai Volumetrik Campuran Aspal dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap.
 - a. Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap terhadap Nilai VITM (*Void in Total Mix*).

Analisis dilakukan untuk melihat bagaimana substitusi *filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C mempengaruhi nilai VITM pada campuran beraspal. Nilai VITM menjadi indikator penting karena berhubungan langsung dengan kepadatan dan durabilitas campuran. Perbandingan dua metode pencampuran konvensional dan bertahap digunakan untuk mengetahui pengaruh distribusi material terhadap besarnya rongga udara dalam campuran.

Grafik pengaruh variasi substitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan menggunakan perbandingan metode pencampuran konvensional dan metode pencampuran bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.9 berikut.



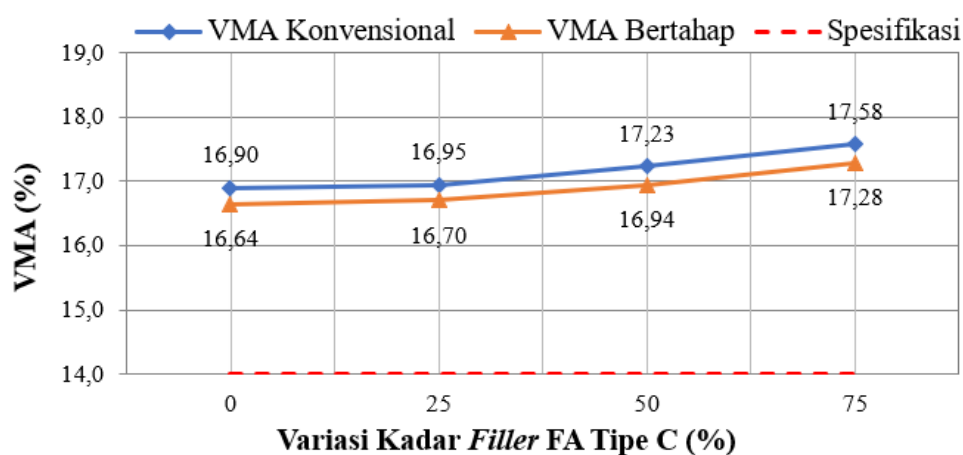
Gambar 5. 9 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai *Void in Total Mix* (VITM)

Pada penelitian Kok dan Kologlu (2011) menunjukkan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap dapat menembus rongga terkecil pada agregat saat pelapisan awal agregat kasar sehingga membuat rongga pada campuran lebih kecil dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional dilihat terjadi penurunan nilai VITM. Hal ini sejalan dengan grafik perbandingan pada Gambar 5.9, menunjukkan bahwa nilai VITM pada kedua metode pencampuran mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar *filler fly ash* batu bara tipe C. Pada setiap variasi *filler*, metode konvensional menunjukkan nilai VITM yang lebih tinggi dibandingkan metode pencampuran bertahap. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai VITM konvensional sebesar 3,94% mengalami presentase penurunan nilai VITM sebesar 8% dengan nilai VITM bertahap sebesar 3,65%. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai VITM konvensional sebesar 4,03% mengalami presentase penurunan nilai VITM sebesar 7% dengan nilai VITM bertahap sebesar 3,75. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai VITM konvensional sebesar 4,40% mengalami presentase penurunan nilai VITM sebesar 8% dengan nilai VITM bertahap sebesar 4,07%. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai VITM konvensional sebesar 4,84% mengalami presentase penurunan nilai VITM sebesar 7% dengan nilai VITM bertahap sebesar 4,49%. Hasil ini sejalan dengan studi sebelumnya oleh Iqbal dan Fauziah (2023), Ichwan (2023), dan Atthaullah (2024) yang menunjukkan penurunan pada nilai

VITM dengan menggunakan metode pencampuran bertahap. Meskipun demikian, seluruh nilai VITM dari kedua metode masih berada dalam rentang Spesifikasi Bina Marga 2018, yaitu 3% - 5%.

- b. Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai VMA (*Void in Mineral Aggregate*).

Grafik pengaruh variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode pencampuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.10 berikut.



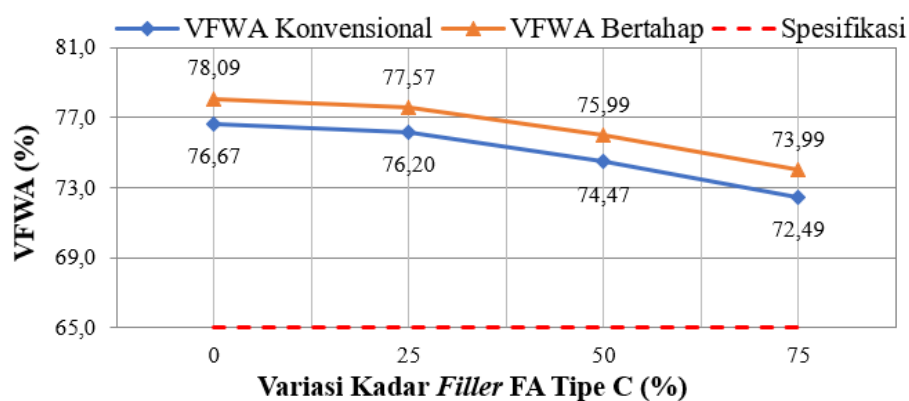
Gambar 5. 10 Grafik Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai *Void in Mineral Aggregate* (VMA)

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.10 hasil pengujian VMA, menunjukkan bahwa nilai VMA pada kedua metode pencampuran konvensional dan bertahap mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kadar *filler fly ash* tipe C. Grafik diatas menunjukkan bahwa metode bertahap dapat menghasilkan nilai VMA yang lebih rendah karena pelapisan awal menghasilkan ikatan adhesi pada aspal mengalami peningkatan dan membuat campuran dapat mengikat agregat dengan baik. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai VMA konvensional sebesar 16,90% mengalami presentase penurunan nilai VMA sebesar 2% dengan nilai VMA bertahap sebesar 16,64%. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai VMA konvensional

sebesar 16,95% mengalami presentase penurunan nilai VMA sebesar 1% dengan nilai VMA bertahap sebesar 16,70%. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai VMA konvensional sebesar 17,23% mengalami presentase penurunan nilai VMA sebesar 2% dengan nilai VMA bertahap sebesar 16,94%. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai VMA konvensional sebesar 17,58% mengalami presentase penurunan nilai VMA sebesar 2% dengan nilai VMA bertahap sebesar 17,28%. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Fauziah dan Anggraini (2017) bahwa nilai VMA yang lebih rendah mengakibatkan lapisan kurang dapat mengikat aspal dan menyebabkan mudah retak. Sebaliknya, jika nilai VMA yang tinggi mengakibatkan aspal pada campuran akan naik dan mengalami bleeding. Sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hidayat (2021), Ichwan (2023), Mentari (2023), Atthaullah (2024), dan Kholid (2025). Hasil penelitian ini sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *Asphalt Concrete – Binder Course* (AC - BC) yaitu $> 14 \%$.

- c. Pengaruh Variasi Subtitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai VFWA (*Void Filled with Asphalt*).

Grafik pengaruh variasi subtitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode pencampuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.11 berikut.

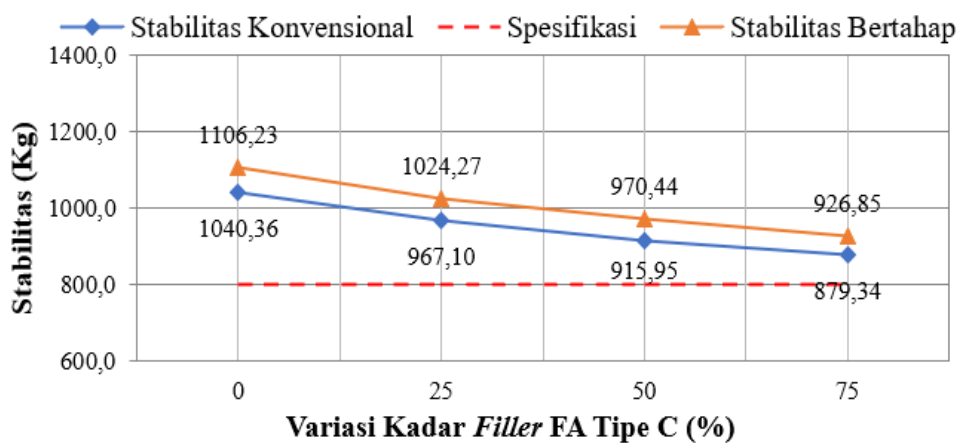


Gambar 5. 11 Grafik Perbandingan Metode pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai *Void Filled with Asphalt* (VFWA)

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.11 hasil pengujian VFWA, menunjukkan bahwa nilai VFWA pada kedua metode pencampuran konvensional dan bertahap cenderung mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar variasi *filler fly ash* tipe C. Penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai VFWA semakin meningkat karena pelapisan awal antara agregat kasar dengan aspal membuat rongga dalam campuran semakin padat dan terisi aspal. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai VFWA konvensional sebesar 76,67% mengalami presentase peningkatan nilai VFWA sebesar 2% dengan nilai VFWA bertahap sebesar 78,09%. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai VFWA konvensional sebesar 76,20% mengalami presentase peningkatan nilai VFWA sebesar 2% dengan nilai VFWA bertahap sebesar 77,57%. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai VFWA konvensional sebesar 74,47% mengalami presentase peningkatan nilai VFWA sebesar 2% dengan nilai VFWA bertahap sebesar 75,99%. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai VFWA konvensional sebesar 72,49% mengalami presentase peningkatan nilai VFWA sebesar 2% dengan nilai VFWA bertahap sebesar 73,99. Hasil ini sejalan penelitian yang dilakukan oleh Wenur dkk. (2023) dan Hawari (2021) nilai VFWA yang dihasilkan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase penambahan *fly ash* dalam campuran aspal. Penurunan nilai VFWA ini disebabkan oleh aspal yang menyerap dan melapisi *fly ash*. Akibatnya, proses pemadatan menjadi lebih sulit karena butiran *filler* cenderung menggumpal. Hasil penelitian ini sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *Asphalt Concrete – Binder Course* (AC - BC) yaitu $> 65 \%$.

2. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai Kekuatan Campuran Aspal dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap.
 - a. Pengaruh Variasi Substitusi *filler* dengan menggunakan perbandingan metode campuran konvensional dan bertahap terhadap Nilai Stabilitas.

Grafik pengaruh variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode pencampuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut.



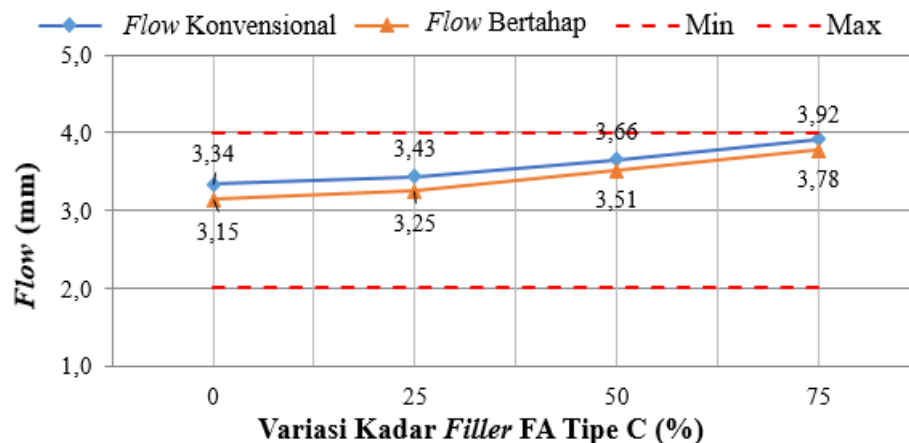
Gambar 5. 12 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Stabilitas

Berdasarkan grafik perbandingan pada Gambar 5.12, hasil pengujian stabilitas *Marshall*, menunjukkan bahwa nilai stabilitas pada kedua metode pencampuran konvensional dan bertahap mengalami penurunan seiring bertambahnya kadar variasi *filler fly ash* tipe C. Meskipun demikian, metode pencampuran bertahap menunjukkan nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap dapat meningkatkan nilai stabilitas lebih baik dibandingkan dengan menggunakan metode pencampuran konvensional karena menggunakan metode pencampuran bertahap menunjukkan adanya *interlocking* antar agregat sehingga pelapisan awal terjadi secara maksimal dan menyebabkan campuran lebih kuat sehingga mampu menahan beban lalu lintas yang lebih besar. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai stabilitas konvensional sebesar 1040,36% mengalami presentase peningkatan nilai stabilitas sebesar 6% dengan nilai stabilitas bertahap sebesar 1106,23%. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai stabilitas konvensional sebesar 967,10% mengalami presentase peningkatan nilai stabilitas sebesar 6% dengan nilai stabilitas bertahap sebesar 1024,27%. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai stabilitas konvensional sebesar 915,95% mengalami presentase peningkatan nilai stabilitas sebesar 6% dengan nilai stabilitas bertahap sebesar 970,44%. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai stabilitas konvensional sebesar 879,34% mengalami presentase peningkatan nilai

stabilitas sebesar 5% dengan nilai stabilitas bertahap sebesar 926,85%. Hal ini sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kok dan Kologlu (2011), Iqbal dan Fauziah (2023), dan Ichwan (2023). Hasil dari penelitian dengan menggunakan kedua metode ini memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran *Asphalt Concrete – Binder Course* (AC - BC) yaitu > 800 kg.

- b. Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Campuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Flow*.

Grafik pengaruh variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode campuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut.



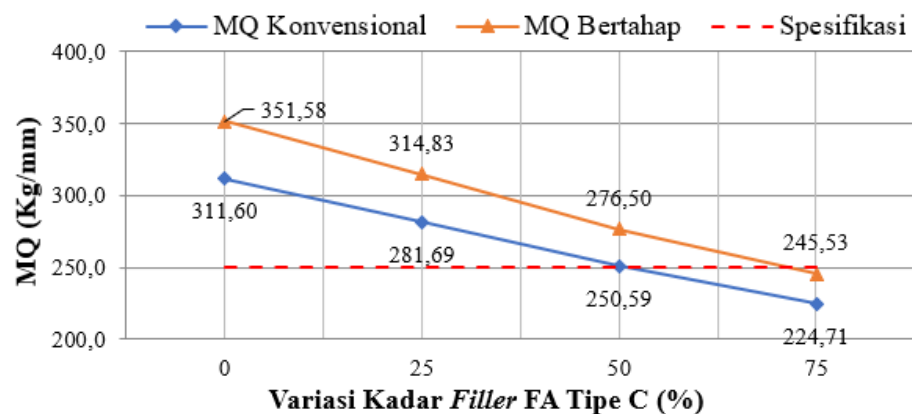
Gambar 5. 13 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai *Flow*

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.13 hasil pengujian *flow*, menunjukkan bahwa perbandingan nilai *flow* pada kedua metode pencampuran konvensional dan bertahap mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar *filler fly ash* tipe C. Metode bertahap menghasilkan nilai *flow* lebih rendah yang mencerminkan sifat campuran yang lebih kaku dan kuat menahan beban kendaraan. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai *flow* konvensional sebesar 3,34 mm mengalami presentase peningkatan nilai *flow* sebesar 6% dengan nilai *flow* bertahap sebesar 3,15 mm. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai *flow* konvensional sebesar 3,43 mm mengalami presentase peningkatan nilai *flow* sebesar 5% dengan nilai *flow* bertahap sebesar

3,25 mm. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai *flow* konvensional sebesar 3,66 mm mengalami presentase peningkatan nilai *flow* sebesar 4% dengan nilai *flow* bertahap sebesar 3,51 mm. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai *flow* konvensional sebesar 3,92 mm mengalami presentase peningkatan nilai *flow* sebesar 4% dengan nilai *flow* bertahap sebesar 3,78 mm. Hal ini sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Kok dan Kologlu (2011), Iqbal dan Fauziah (2023), Atthaullah (2024), dan Kholid (2025), yang menunjukkan bahwa penggunaan metode pencampuran bertahap membuat campuran menjadi lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi permanen. Pada penelitian ini menunjukkan nilai *flow* memenuhi Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 pada campuran AC - BC yaitu 2 mm – 4 mm. Secara keseluruhan, metode konvensional menghasilkan nilai *flow* yang lebih besar pada seluruh variasi *filler*, menunjukkan bahwa metode konvensional memberikan campuran lebih mudah berubah bentuk Ketika diberikan beban, sedangkan metode bertahap menghasilkan nilai *flow* lebih rendah yang mencerminkan sifat campuran yang lebih kaku dan kuat menahan beban kendaraan.

- c. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Marshall Quotient* (MQ).

Grafik pengaruh variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode Pencampuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.14 berikut.



Gambar 5. 14 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai *Marshall Quotient* (MQ)

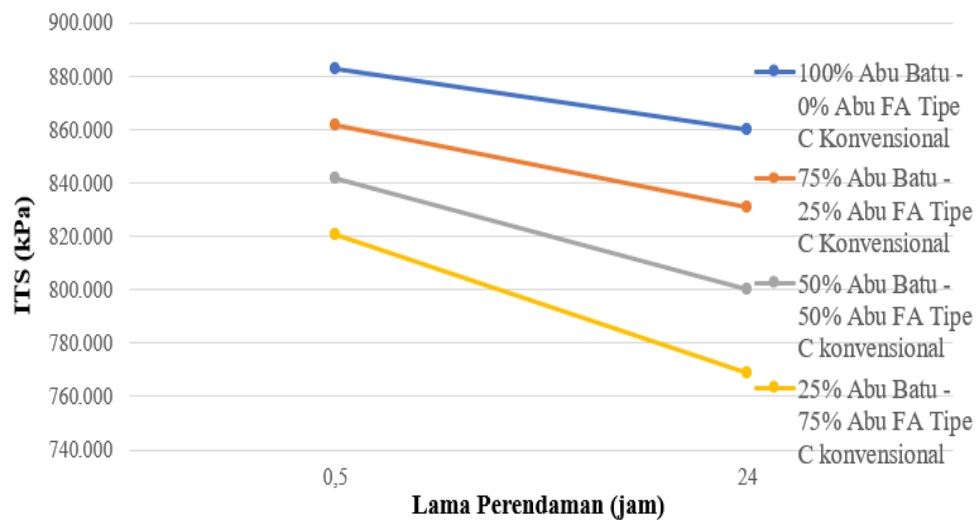
Berdasarkan Grafik pada Gambar 5.14, Grafik perbandingan pada pengujian *Marshall Quotient* (MQ) pada campuran AC-BC memperlihatkan bahwa baik metode pencampuran konvensional maupun bertahap menunjukkan pola penurunan nilai MQ seiring meningkatnya kadar variasi *filler fly ash* batu bara tipe C. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai MQ konvensional sebesar 311,60 Kg/mm mengalami presentase peningkatan nilai MQ sebesar 13% dengan nilai MQ bertahap sebesar 351,58 Kg/mm. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai MQ konvensional sebesar 281,69 Kg/mm mengalami presentase peningkatan nilai MQ sebesar 12% dengan nilai MQ bertahap sebesar 314,83 Kg/mm. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai MQ konvensional sebesar 250,59 Kg/mm mengalami presentase peningkatan nilai MQ sebesar 10% dengan nilai MQ bertahap sebesar 276,50 Kg/mm. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Kok dan Kologlu (2011), Iqbal dan Fauziah (2023), Tolab dan Fauziah (2025), dan Kholid (2025), pencampuran metode bertahap lebih mampu menahan deformasi plastis akibat adanya pembebanan yang terjadi.

Namun, pada kadar variasi *filler* 75% sudah tidak memasuki batas spesifikasi dengan nilai MQ konvensional sebesar 224,71 Kg/mm mengalami presentase peningkatan nilai MQ sebesar 9% dengan nilai MQ bertahap sebesar 245,53 Kg/mm. Alasan utama tidak memenuhi nilai pada spesifikasi adalah bahwa kadar variasi *filler* yang terlalu tinggi menyebabkan peningkatan kadar material halus yang berlebihan, sehingga mengurangi kekuatan struktur campuran. *Fly ash* dalam jumlah banyak cenderung menurunkan kekakuan dan stabilitas karena menurunkan kemampuan agregat untuk saling mengunci. Selain itu, peningkatan *filler* dapat menyebabkan penyerapan aspal lebih besar, sehingga mengurangi lapisan aspal yang efektif dalam mengikat agregat. Akibatnya, campuran menjadi lebih rapuh dan tidak mampu menahan beban, sehingga nilai MQ berada di bawah standar.

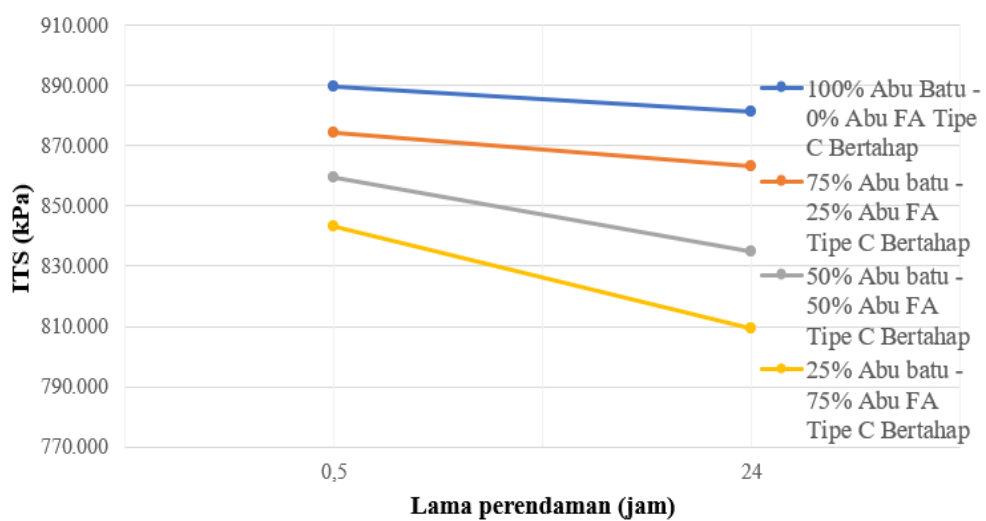
Menurut Wahyuningsih (2007), penurunan nilai MQ terjadi karena diperoleh dari perbandingan antara stabilitas dengan *flow*. Hal tersebut disebabkan karena *fly ash* memiliki sifat kedap air, maka berpotensi membuat film aspal menjadi tebal. Berdasarkan hal tersebut, nilai stabilitas menurun.

- d. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Indirect Tensile Strength* (ITS).

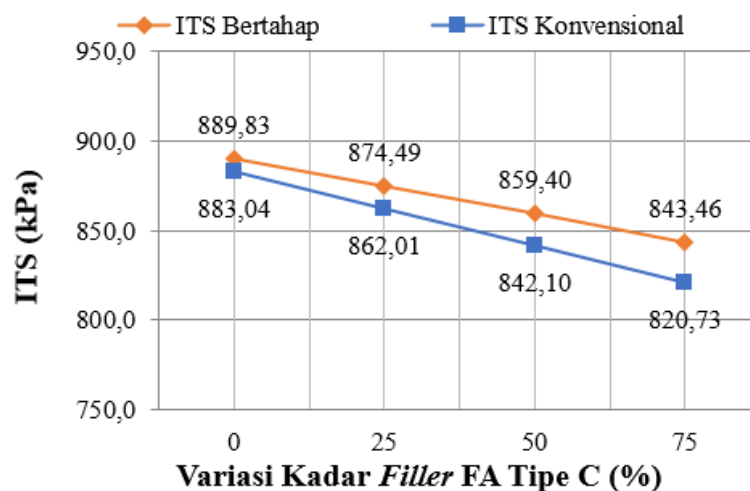
Grafik pengaruh variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode campuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.15, Gambar 5.16, dan Gambar 5.17 berikut.



Gambar 5. 15 Perbandingan Nilai *Indirect Tensile Strength* (ITS) Normal dengan Rendaman Metode Konvensional



Gambar 5. 16 Perbandingan Nilai *Indirect Tensile Strength* (ITS) 0,5 Jam dengan 24 Jam Metode Bertahap



Gambar 5. 17 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Indirect Tensile Strength* (ITS)

Pada grafik pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS) pada campuran AC-BC menunjukkan kecenderungan yang sangat mirip antara metode pencampuran konvensional dan pencampuran bertahap, baik pada kondisi perendaman 0,5jam maupun 24jam. Secara umum, nilai ITS menurun pada semua variasi komposisi *filler* ketika waktu perendaman meningkat, yang menunjukkan bahwa pengaruh air terhadap penurunan kohesi dan adhesi campuran tetap terjadi pada kedua metode pencampuran.

Pada Gambar 5.15 grafik metode konvensional, campuran dengan 100% abu batu memiliki nilai ITS tertinggi baik pada 0,5 jam maupun 24 jam, yakni sekitar 880 kPa turun menjadi 860 kPa. Penurunan ini konsisten namun tidak terlalu signifikan. Kombinasi 75% abu batu – 25% *fly ash* tipe C serta 50% abu batu – 50% *fly ash* juga menunjukkan pola serupa, yaitu penurunan bertahap namun tetap berada pada rentang yang dapat diterima secara struktural. Namun, pada campuran dengan kadar *fly ash* tertinggi yaitu 25% abu batu – 75% *fly ash*, penurunan ITS lebih signifikan, dari sekitar 820 kPa menjadi 760 kPa, mengindikasikan bahwa penggunaan *filler fly ash* dalam persentase tinggi mengurangi ketahanan campuran terhadap pengaruh air.

Pada Gambar 5.16 grafik metode pencampuran bertahap menunjukkan nilai ITS yang sedikit lebih tinggi dibandingkan metode konvensional pada setiap variasi

komposisi. Campuran 100% abu batu memiliki ITS awal sekitar 890 kPa dan turun menjadi 875 kPa setelah 24 jam, sedangkan variasi 75% abu batu – 25% *fly ash* dan 50% abu batu – 50% *fly ash* juga menunjukkan penurunan yang lebih landai dibandingkan metode konvensional. Bahkan pada komposisi dengan *fly ash* tertinggi, nilai ITS metode bertahap 835 kPa menjadi 800 kPa tetap lebih besar daripada metode konvensional. Hal ini menunjukkan bahwa metode bertahap mampu meningkatkan homogenitas pencampuran serta distribusi aspal yang lebih stabil, sehingga memberi ketahanan yang lebih baik terhadap penetrasi air.

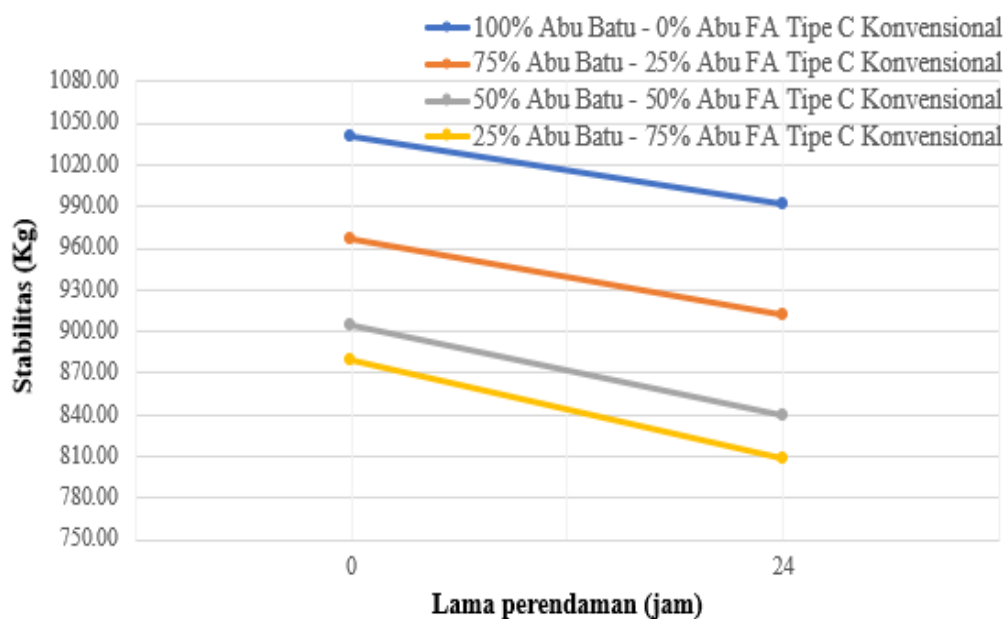
Pada Gambar 5.17 menunjukkan bahwa peningkatan kadar *fly ash* menyebabkan penurunan nilai ITS. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai ITS konvensional sebesar 883,26 kPa mengalami presentase peningkatan nilai ITS sebesar 1% dengan nilai ITS bertahap sebesar 889,83 kPa. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai ITS konvensional sebesar 862,01 kPa mengalami presentase peningkatan nilai ITS sebesar 1% dengan nilai ITS bertahap sebesar 874,49 kPa. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai ITS konvensional sebesar 842,10 kPa mengalami presentase peningkatan nilai ITS sebesar 2% dengan nilai ITS bertahap sebesar 859,40 kPa. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai ITS konvensional sebesar 820,73 kPa mengalami presentase peningkatan nilai ITS sebesar 3% dengan nilai ITS bertahap sebesar 843,46 kPa. Menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap terbukti memberikan nilai ITS yang lebih tinggi dan penurunan yang lebih kecil, menandakan bahwa metode bertahap lebih efektif dalam mempertahankan kekuatan tarik tidak langsung campuran AC-BC meskipun terjadi penambahan variasi *filler* dan pengaruh air.

Pada hasil nilai ITS tersebut sejalan dengan penelitian Sukmo dan Chasanah (2023), tentang penelitian penggunaan *filler* bubuk *talk*. Nilai tersebut menunjukkan penurunan pada grafik ITS karena kurangnya ketahanan kuat tarik pada campuran karena penambahan kadar *filler* yang terlalu tinggi walaupun mengalami kenaikan sampai kadar 50%. Nilai tersebut terjadi karena banyaknya *filler* yang masuk mengakibatkan kuat tarik semakin berkurang dan berpotensi membuat retakan akan lebih tinggi. Penurunan disebabkan karena aspal tidak menyelimuti agregat secara menyeluruh dan rongga lebih banyak diisi oleh *filler*.

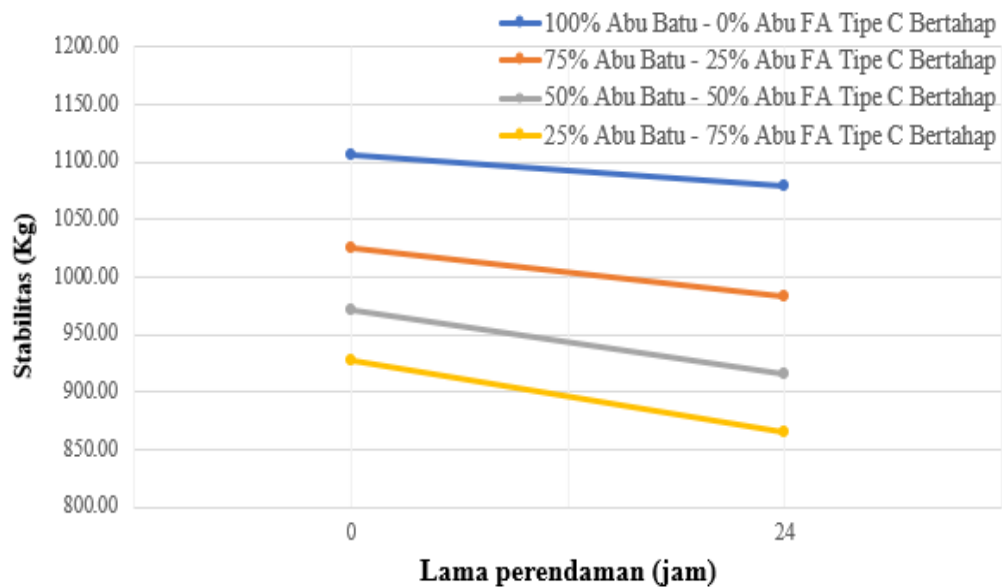
3. Analisis Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* Terhadap Nilai Durabilitas Campuran Aspal dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap.

a. Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Campuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Index of Retained Strength* (IRS).

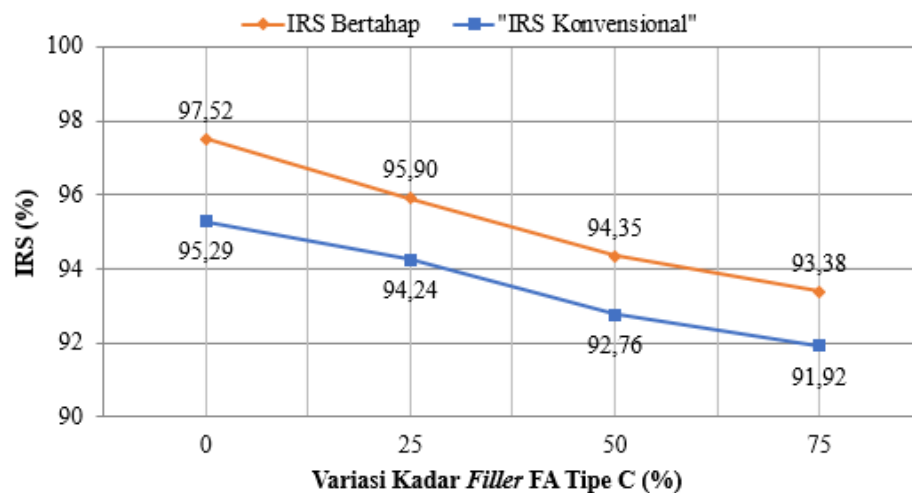
Nilai *Index of Retained Strength* (IRS) merupakan nilai yang didapatkan dari Perbandingan nilai stabilitas campuran setelah direndam selama 24 jam dalam *waterbath* dengan suhu 60°C dengan nilai stabilitas campuran setelah direndam selama 0,5 jam dalam *waterbath* dengan suhu 60°C. Nilai IRS mencerminkan kemampuan campuran untuk mempertahankan kekuatan setelah terpapar air, terutama dalam menentukan ketahanan dan daya tahan material dalam kondisi lingkungan yang lembap atau basah. Berikut grafik pengaruh variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode pencampuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.18, Gambar 5.19, dan Gambar 5.20 berikut.



Gambar 5. 18 Perbandingan Nilai Stabilitas 0 Jam dengan Nilai Stabilitas 24 Jam Metode Konvensional



Gambar 5. 19 Perbandingan Nilai Stabilitas 0 Jam dengan Nilai Stabilitas 24 Jam Metode Bertahap



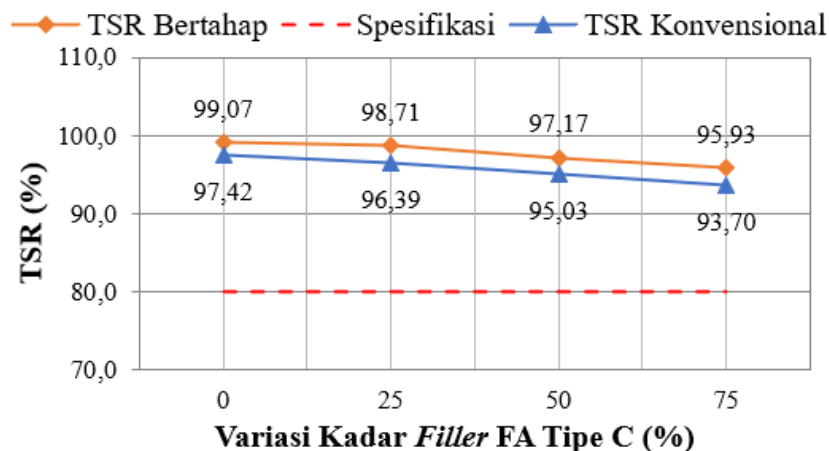
Gambar 5. 20 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap Terhadap Nilai *Index of Retained Strength* (IRS)

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.18 dan Gambar 5.19, Nilai stabilitas setiap kadar variasi *filler fly ash* batu bara tipe C mengalami penurunan baik metode bertahap maupun metode konvensional seiring lamanya perendaman, namun metode bertahap memiliki nilai stabilitas yang lebih tinggi daripada nilai stabilitas pada metode konvensional hal ini sejalan dengan penelitian Hidayat (2021) menyimpulkan bahwa metode bertahap mampu melapis agregat lebih baik sehingga

selimut aspal pada campuran lebih tebal. Grafik perbandingan pada Gambar 2.20 metode pencampuran bertahap secara konsisten menghasilkan nilai IRS yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai IRS konvensional sebesar 97,64% mengalami presentase peningkatan nilai IRS sebesar 1% dengan nilai IRS bertahap sebesar 98,76%. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai IRS konvensional sebesar 97,12% mengalami presentase peningkatan nilai IRS sebesar 1% dengan nilai IRS bertahap sebesar 97,95%. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai IRS konvensional sebesar 96,38% mengalami presentase peningkatan nilai IRS sebesar 1% dengan nilai IRS bertahap sebesar 97,18%. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai IRS konvensional sebesar 95,96% mengalami presentase peningkatan nilai IRS sebesar 1% dengan nilai IRS bertahap sebesar 96,69%. Hasil penelitian ini sejalan dengan Hidayat (2021), Ichwan (2023), Iqbal dan Fauziah (2023), Mentari (2023), Tolab dan Fauziah (2025), dan Kholid (2025) menunjukkan bahwa menggunakan metode pencampuran bertahap meningkatkan nilai IRS dibanding dengan menggunakan metode pencampuran konvensional karena pelapisan awal antara agregat dengan aspal secara optimal menghasilkan campuran lebih kuat akibat terjadinya rendaman. Menurut Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 persyaratan nilai IRS yaitu $> 90\%$ untuk campuran AC-BC. Sehingga penelitian tersebut telah memenuhi syarat yang ditetapkan.

- b. Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan Menggunakan Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Tensile Strength Ratio* (TSR).

Nilai *Tensile Strength Ratio* (TSR) merupakan nilai yang didapatkan dari perbandingan nilai *ITS* campuran setelah direndam selama 24 jam dalam *waterbath* dengan suhu 60°C dengan nilai ITS campuran setelah direndam selama 0,5 jam dalam *waterbath* dengan suhu 60°C . Grafik pengaruh variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode campuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.21.

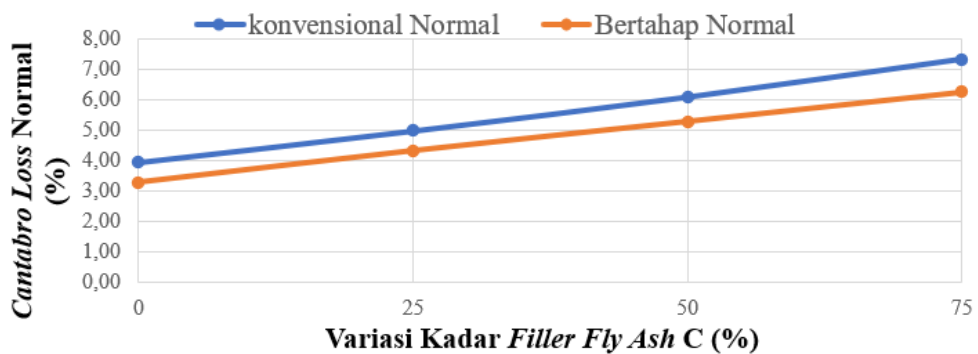


Gambar 5. 21 Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap *Tensile Strength Ratio* (TSR)

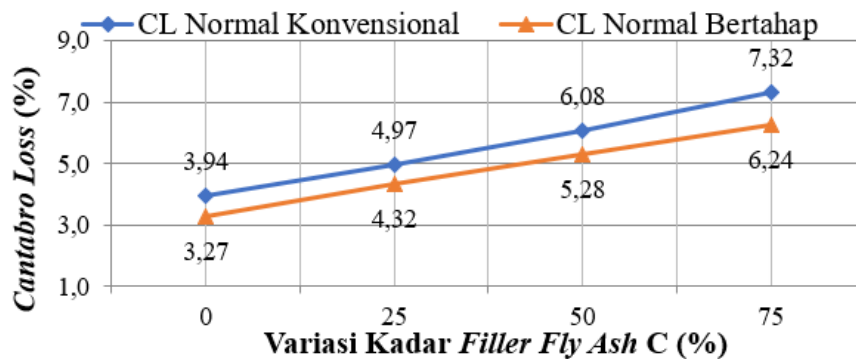
Pada Gambar 5.21, grafik pengujian TSR menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap secara konsisten menghasilkan nilai TSR yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional pada seluruh variasi kadar *filler fly ash* batu bara tipe C yang diuji, menunjukkan ketahanan campuran yang lebih baik terhadap kerusakan akibat air. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai TSR konvensional sebesar 97,42% mengalami presentase peningkatan nilai TSR sebesar 2% dengan nilai TSR bertahap sebesar 99,07%. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai TSR konvensional sebesar 96,39% mengalami presentase peningkatan nilai TSR sebesar 2% dengan nilai TSR bertahap sebesar 98,71%. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai TSR konvensional sebesar 95,03% mengalami presentase peningkatan nilai TSR sebesar 2% dengan nilai TSR bertahap sebesar 97,17%. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai TSR konvensional sebesar 93,70% mengalami presentase peningkatan nilai TSR sebesar 2% dengan nilai TSR bertahap sebesar 95,93%. Penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai TSR yang lebih konstan dibanding dengan menggunakan metode pencampuran konvensional yang dimana hasil nilai TSR tersebut terjadi peningkatan secara tidak konstan. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Iqbal dan Fauziah (2023), Ichwan (2023), Tolab dan Fauziah (2025), dan Kholid (2025) karena penggunaan metode pencampuran bertahap mengurangi potensi keretakan campuran.

- c. Pengaruh Variasi Substitusi *Filler* dengan menggunakan perbandingan metode campuran konvensional dan bertahap terhadap Nilai *Cantrabro Loss*.

Grafik pengaruh terhadap nilai CL dengan variasi substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan perbandingan metode campuran konvensional dan bertahap dapat dilihat pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23 berikut.



Gambar 5. 22 Perbndingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Cantabro Loss* Normal



Gambar 5. 23 Rekapitulasi Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap terhadap Nilai *Cantabro Loss*

Pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23 grafik perbandingan menunjukkan hasil pengujian CL pada campuran aspal beton AC-BC dengan variasi kadar *filler fly ash* C pada dua metode pencampuran yang berbeda, yaitu metode konvensional dan bertahap. Pada kadar variasi *filler* 0% nilai CL normal konvensional sebesar 3,94% mengalami presentase penurunan nilai CL normal sebesar 17% dengan nilai CL normal bertahap sebesar 3,27%. Pada kadar variasi *filler* 25% nilai CL normal konvensional sebesar 4,97% mengalami presentase penurunan nilai CL normal

sebesar 13% dengan nilai CL normal bertahap sebesar 4,32%. Pada kadar variasi *filler* 50% nilai CL normal konvensional sebesar 6,08% mengalami presentase penurunan nilai CL normal sebesar 13% dengan nilai CL normal bertahap sebesar 5,28%. Pada kadar variasi *filler* 75% nilai CL normal konvensional sebesar 7,32% mengalami presentase penurunan nilai CL normal sebesar 13% dengan nilai CL normal bertahap sebesar 6,24%. Hasil uji menunjukkan bahwa nilai CL normal pada metode pencampuran konvensional cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kadar *filler fly ash* tipe C. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Iqbal dan Fauziah (2023), Ichwan (2023), Tolab dan Fauziah (2025), dan Kholid (2025) menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap bagus dalam mempertahankan kualitas campuran aspal beton, sehingga potensi kerusakan atau kehilangan material pada campuran tersebut lebih kecil.

5.3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Pencampuran Konvensional dan Bertahap

Rekapitulasi hasil pengujian substitusi *filler fly ash* batu bara tipe C dengan menggunakan metode bertahap dan metode konvensional dapat dilihat pada tabel 5.14.

Tabel 5. 14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Subtitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Subtitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Kekuatan	Stabilitas Konvensional (kg)	1040,36	967,10	915,95	879,34	Nilai stabilitas pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan metode pencampuran bertahap dengan presentase selisih nilai stabilitas pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 6%. Nilai stabilitas yang rendah menunjukkan bahwa metode pencampuran konvensional kurang kuat dalam menahan beban yang diterima.
	Stabilitas Bertahap (kg)	1106,23	1024,27	970,44	926,85	Nilai stabilitas pada campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan metode pencampuran konvensional dengan presentase selisih nilai stabilitas pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 6%. Nilai stabilitas yang lebih tinggi menunjukkan bahwa metode pencampura bertahap mampu dalam menahan beban lalulintas.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Subtitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Subtitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Kekuatan	<i>Flow</i> Konvensional (mm)	3,34	3,43	3,66	3,92	Nilai <i>flow</i> pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai <i>flow</i> pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 5%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 4%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 4%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai <i>flow</i> yang tinggi menyebabkan campuran menjadi lebih plastis.
	<i>Flow</i> Bertahap (mm)	3,15	3,25	3,51	3,78	Nilai <i>Flow</i> pada campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan metode pencampuran konvensional, perbedaan nilai <i>flow</i> dengan presentase selisih nilai <i>flow</i> pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 6%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 5%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 4%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 4%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai <i>flow</i> yang rendah menyebabkan campuran menjadi lebih kaku dan kuat dalam menahan beban lalu lintas.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Subtitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Subtitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Kekuatan	MQ Konvensional (Kg/mm)	311,60	281,69	250,59	224,71	Nilai MQ pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai MQ pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 13%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 12%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 10%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 9%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai MQ yang rendah menyebabkan campuran lebih mudah deformasi saat menerima beban.
	MQ Bertahap (Kg/mm)	351,58	314,83	276,50	245,53	Nilai MQ pada campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan metode pencampuran konvensional, perbedaan nilai MQ dengan presentase selisih nilai MQ pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 13%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 12%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 10%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 9%. Hal ini menunjukan bahwa nilai MQ yang tinggi menyebabkan campuran lebih tahan terhadap deformasi saat menerima beban.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Kekuatan	ITS Konvensional (kPa)	860,26	830,91	800,23	768,99	Nilai ITS pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai ITS pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 3%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai ITS yang rendah menyebabkan campuran menjadi kurang mampu menahan tegangan tarik, sehingga dapat lebih mudah retak.
	ITS Bertahap (kPa)	889,83	874,49	859,40	843,46	Nilai ITS pada campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional dengan presentase selisih nilai ITS pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 3%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai ITS yang tinggi menyebabkan campuran menjadi lebih kuat dalam menahan tegangan tarik.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Subtitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Subtitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Volumetrik	VITM Konvensional (%)	3,94	4,03	4,40	4,84	Nilai VITM pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai VITM pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 8%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 7%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 8%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 7%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai VITM yang tinggi menyebabkan campuran memiliki rongga udara yang lebih besar.
	VITM Bertahap (%)	3,65	3,75	4,07	4,49	Nilai VITM pada campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional dengan presentase selisih nilai VITM pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 8%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 7%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 8%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 7%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai VITM yang rendah menyebabkan campuran memiliki rongga udara yang lebih rapat/padat.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Subtitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Subtitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Volumetrik	VMA Konvensional (%)	16,90	16,95	17,23	17,58	Nilai VMA pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai VMA pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai VMA yang tinggi menyebabkan peningkatan jarak antar agregat dalam campuran menjadi lebih besar.
	VMA Bertahap (%)	16,64	16,70	16,94	17,28	Nilai VMA pada campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional. Perbedaan nilai VMA dengan presentase selisih nilai VMA pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai VMA yang rendah menyebabkan rongga antar agregat dalam campuran menjadi lebih kecil/padat.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Volumetrik	VFWA Konvensional (%)	76,67	76,20	74,47	72,49	Nilai VFWA pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai VFWA pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai VFWA yang rendah menyebabkan penurunan volume rongga yang terisi oleh aspal sehingga mengurangi ketahanan campuran.
	VFWA Bertahap (%)	78,09	77,57	75,99	73,99	Nilai VFWA pada campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Perbedaan nilai VFWA dengan presentase selisih nilai VFWA pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai VFWA yang tinggi menunjukkan rongga dalam campuran telah terisi aspal secara baik sehingga campuran menjadi lebih kuat menahan deformasi.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Durabilitas	IRS Konvensional (%)	97,64	97,12	96,38	95,96	Nilai IRS pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai IRS pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 1%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai IRS yang rendah mengakibatkan menurunnya keawetan campuran karena suhu, cuaca, dan air.
	IRS Bertahap (%)	98,76	97,95	97,18	96,69	Nilai IRS campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Perbedaan nilai IRS dengan presentase selisih nilai IRS pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 1%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai IRS yang tinggi dapat memperkuat campuran terhadap faktor suhu, cuaca, dan air.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Substitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Substitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Durabilitas	TSR Konvensional (%)	97,42	96,39	95,03	93,70	Nilai TSR pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai TSR pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai TSR yang rendah dapat mengurangi kualitas kekuatan atau mengurangi daya tahan tarik campuran terhadap kondisi basah atau lembap.
	TSR Bertahap (%)	99,07	98,71	97,17	95,93	Nilai TSR campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Perbedaan nilai TSR dengan presentase selisih nilai TSR pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 2%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai TSR yang tinggi dapat memperkuat atau menambah daya tahan tarik campuran terhadap kondisi basah atau lembap.

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Hasil Pengujian Subtitusi *Filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C dengan Menggunakan Metode Konvensional dan Metode Bertahap

Tinjauan	Parameter	Subtitusi <i>Filler Fly Ash</i> Batu Bara Tipe C (%)				Keterangan
		0	25	50	75	
Tinjauan Segi Durabilitas	CL Konvensional (%)	3,94	4,97	6,08	7,32	Nilai CL pada campuran yang menggunakan metode pencampuran konvensional memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode bertahap dengan presentase selisih nilai CL pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 17%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 13%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 13%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 15%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai CL yang tinggi dapat membuat campuran menjadi lebih rentan terhadap kerusakan atau kehilangan material dalam campuran.
	CL Bertahap (%)	3,27	4,32	5,28	6,24	Nilai CL campuran yang menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional dengan presentase selisih nilai CL pada kadar <i>filler</i> 0% sebesar 17%, pada kadar <i>filler</i> 25% sebesar 13%, pada kadar <i>filler</i> 50% sebesar 13%, pada kadar <i>filler</i> 75% sebesar 15%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai CL yang rendah dapat mempertahankan material dalam campuran dengan baik.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan Penelitian yang sudah dilaksanakan, dapat diketahui pengaruh penggunaan *filler Fly Ash* Batu Bara Tipe C terhadap campuran AC-BC. Variasi yang dipakai yaitu 0%, 25%, 50%, dan 75%. Adapun dari nilai yang telah diperoleh, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Pemanfaatan *fly ash* batu bara tipe C sebagai *filler* campuran AC-BC juga memengaruhi nilai volumetrik. Meskipun *fly ash* batu bara dapat memasuki rongga campuran, tetapi tidak mengisi rongga secara keseluruhan karena bentuk fisik *fly ash* batu bara yang menggumpal antar partikelnya serta sifat *fly ash* batu bara yang dapat menyerap lebih banyak aspal, sehingga tidak dapat mengisi rongga dengan sempurna dan aspal yang tersedia untuk mengisi ruang antar agregat menjadi lebih sedikit. Hal ini memengaruhi kemampuan campuran untuk memadatkan campuran dengan baik, karena terdapat rongga campuran yang tidak terisi sempurna oleh *filler*. Secara keseluruhan, penggunaan *filler* konvensional lainnya seperti abu debu lebih baik dibandingkan *fly ash* batu bara jika dinilai dari segi volumetrik campuran.
2. Pemanfaatan *fly ash* batu bara pada campuran AC-BC berpengaruh pada kekuatan campuran tersebut. Didapatkan penurunan nilai ketahanan pada campuran dari kadar 0% hingga 75%, sehingga membuat campuran ketahanannya berkurang serta kurang mampu menahan tegangan tarik, sehingga dapat lebih mudah retak. Pada parameter struktur tidak menunjukkan pengaruh signifikan pada penggunaan *fly ash* batu bara tipe C sebagai *filler* pengganti kecuali pada nilai MQ pada variasi substitusi *filler* 75% sudah tidak memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018. Secara keseluruhan, penggunaan *filler* konvensional dan bertahap lainnya seperti abu

debu lebih baik dibandingkan *fly ash* batu bara jika dinilai dari segi kekuatan struktur campuran.

3. Pemanfaatan *fly ash* batu bara tipe C sebagai *filler* campuran AC-BC juga berpengaruh pada durabilitas. *FA* dapat meningkatkan beberapa sifat seperti *workability*, tetapi penambahan yang berlebihan mampu menurunkan kekuatan mekanik, seiring dengan hasil yang diperoleh yaitu semakin bertambah kadar *filler*, maka semakin tinggi rongga yang ada, sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan seperti deformasi permanen atau *rutting*. Selain itu keawetan campuran dalam menahan keausan yang disebabkan air, udara, dan suhu juga berkurang, tetapi masih dapat dimanfaatkan karena memenuhi persyaratan Bina Marga 2018 Revisi 2.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan yang sudah dibuat melalui data hasil pengujian yang dilakukan, penelitian memberikan saran sebagai berikut.

1. Diperlukan penelitian lanjutan terkait pemanfaatan *fly ash* batu bara sebagai *filler* pada berbagai jenis campuran perkerasan lainnya.
2. Perlu melakukan uji karakteristik fisik dan kandungan unsur mineral atau kimia *fly ash* batu bara tipe N, F, dan C secara rutin untuk memastikan bahwa bahan tersebut memiliki sifat yang konsisten dan tidak berpengaruh negatif terhadap kekuatan campuran.
3. Secara keseluruhan nilai yang diperoleh dari pemanfaatan *fly ash* batu bara sebagai *filler* masih memenuhi Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2, sehingga masih dapat digunakan untuk menggantikan *filler* abu debu pada campuran.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, M.F., dan Hadi, M.L. 2023. Analisa *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC) dengan Material Substitusi *Fly Ash* dan *Bottom Ash*. *Undergraduate thesis*, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
- 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.
- Ashari, H., dan Veronika. 2024. Pengaruh Substitusi *Fly Ash* Batu Bara Sebagai *Filler* Pada Campuran Aspal Beton Jenis *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC). Universitas Bung Hatta Padang. Sumatra Barat.
- Atthaullah, M.N. 2024. Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit Terhadap Karakteristik Campuran *Hot Rolled Asphalt* (HRA) dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Aviv, A.M., Hasan, M.W., dan Ayu, E.S. 2023. Pengaruh Substitusi Limbah Bata Merah dan *Fly Ash* Sebagai *Filler* Campuran *Asphalt Concrete-Binder Course* (AC-BC). Universitas Bung Hatta Padang. Sumatra Barat.
- 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. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2018. *Spesifikasi Umum. Edisi 2018 (Rev. 2)*. Penerbit Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2010. *Spesifikasi Umum. Edisi 2010 (Rev. 3)*. Penerbit Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.
- Firdaus, M. 2023. Perbandingan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Dua Tahap Terhadap Kinerja *Hot Rolled Asphalt* (HRA). Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

- Hadi, M.A., Asrorunniam, A.F., & Apriliyanti, H.R. 2025. Studi Eksperimental Terhadap Dampak Metode Pencampuran Dalam Mengoptimalkan Performa Perkerasan Bergradasi *Superpave*. Jurnal Transportasi 25 (3), 255-214.
- Hadi, M.A., dan Fauziah, M. 2021. *Comparative Study of Marshall Properties and AC-WC Pavement by Using Starbit E-55 and Pen 60/70*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 933 (1), 012003.
- 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 Bahan Ikat Aspal Pen 60/70 Dan Aspal *Crumb Rubber*. 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*. Vol.44. No.2: 167-175. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Khoiruddin, H.A. 2025. Pengaruh Substitusi Serbuk Besi Terhadap Karakteristik Campuran *Hot Rolled Asphalt* (HRA) dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Kholid, I. 2025. Pengaruh Substitusi *Filler* Abu Bauksit Terhadap Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) dengan Metode Pencampuran Bertahap. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Kok B V dan Kologlu N. 2011. *Effects of Two-Phase Mixing Method on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt*. Firat University, Civil Engineering Department Elazig, Turkey.
- Mulyono, Grace. 2013. “Fly Ash.” Perancangan Interior Pusat Mitigasi Di Yogyakarta 27(2007):6-23.

- Putra, I.B.R.A.G. 2022. Studi Pengaruh Penggunaan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Terhadap Campuran Beton Aspal Lapis Antara (AC-BC). Universitas Borneo Tarakan. Kalimantan Utara.
- Standar Nasional Indonesia. 2011. Cara Uji Berat Jenis Aspal Panas, SNI 2441:2011. Indonesia.
- Standar Nasional Indonesia. 20016. Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. SNI 1969:2016. Indonesia.
- Standar Nasional Indonesia. 2016. Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus, SNI 1970:2016. Indonesia.
- Standar Nasional Indonesia. 1991. Metode Pengujian Campuran Aspal dengan Alat *Marshall*. SNI 06-2489-1991. Indonesia.
- Standar Nasional Indonesia. 2002. Spesifikasi Bahan Uji Pengisi untuk Campuran Beraspal. SNI 03-6723-2002. Indonesia.
- Subarkah, 2021. *Modul Bahan Perkerasan Jalan*. Fakultas Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- 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.
- Sukirman, S. 1999. *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Penerbit Nova. Bandung.
- Tolab, L. Z., 2025. Karakteristik Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) dengan Limbah *Geothermal* Sebagai Substitusi *Filler* menggunakan Metode Pencampuran Bertahap. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Wenur, K. R., Palenewen, S. C. N., & Waani, J. E. 2023. Pengaruh Variasi Kandungan Bahan Pengisi *Filler Fly Ash* Batu Bara Pada Campuran Beraspal Panas Jenis *Lataston Hot Rolled Sheet Wearing Course* (HRSWC). TEKNO, 21(85).
- Yaro, N. S. A., Napih, M. B., Sutanto, M. H., Usman, A., and Saeed, S. M. (2021). *Performance evaluation of waste palm oil fiber reinforced stone matrix*

asphalt mixtures using traditional and sequential mixing processes. Case Studies in Construction Materials, 15.

Yuniarti, R., Hasim., Hariyadi., dan Handayani, T. 2019. Penggunaan Limbah Kaca Sebagai *Filler* Pada Campuran Perkerasan Aspal Panas. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*. Vol.26, No.3.

Zakariya, A., Rosyadi, S., dan Yudhono, G. 2022. Potensi Pemanfaatan *Fly Ash* Dalam Pembangunan Konstruksi Jalan Dan Jembatan Untuk Mewujudkan Infrastruktur Berkelanjutan di Indonesia. *Jurnal Infrastruktur*. Vol.9, No.4.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN BERAT JENIS ASPAL

RUJUKAN : SNI 2441 - 2011

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

No.	Pemeriksaan	Sampel	
		1	2
1	Berat vicnometer kosong (gr)	24,01	23,34
2	Berat vicnometer + Aquadest (gr)	46,88	46,34
3	Berat Aquadest (2 - 1) (gr)	22,87	23
4	Berat vicnometer + Aspal (gr)	25,41	25,04
5	Berat Aspal (4 - 1) (gr)	1,4	1,7
6	Berat vicnometer + Aspal + Aquadest (gr)	46,98	46,38
7	Berat Aquadest (6 - 4) (gr)	21,57	21,34
8	Volume Aspal (3 - 7) (gr)	1,3	1,66
9	Berat Jenis Aspal = Berat / Vol (5/8)	1,08	1,02
10	Rata-rata BJ Aspal	1,05	

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Ir. Berlian Kusnani, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti
Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 2 Pemeriksaan Penetrasi Aspal Pen 60/70

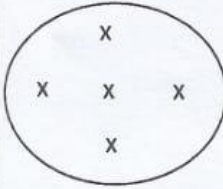
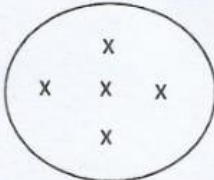
PEMERIKSAAN PENETRASI ASPHAL

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

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

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda uji			
	Mulai pemanasan	27 °C	09.30 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	10.00 WIB	
2	Didiamkan pada suhu ruang			
	Mulai	130 °C	10.00 WIB	
	Selesai	27 °C	11.30 WIB	
3	Diperiksa			
	Mulai	25 °C	11.30 WIB	
	Selesai	25 °C	12.00 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Benda Uji		Sket Pengujian		Keterangan
	I (mm)	II (mm)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	
1	68	67			
2	67	65			
3	66	67			
4	69	65			
5	67	64			
Rata2	67,4	65,6			
Rata2	66,5				

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya


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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti


Wisnu Pribambodo
NIM : 20 511 309

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 : Agustus 2025

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda uji			
	Mulai pemanasan	27 °C	13.15 WIB	
	Selesai pemanasan	130 °C	13.30 WIB	
2	Didiamkan pada suhu ruang			
	Mulai	130 °C	13.30 WIB	
	Selesai	27 °C	14.15 WIB	
3	Diperiksa			
	Mulai	27 °C	14.15 WIB	
	Selesai	310 °C	14.45 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No	Keterangan	Titik Nyala	Titik Bakar	Keterangan
1	Benda uji 1	290 °C	310 °C	
2	Benda uji 2			
3	Rata - rata	290 °C	310 °C	



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
~~Shk~~ Peneliti

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 4 Pemeriksaan Titik Lembek Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN TITIK LEMBEK ASPHAL

RUJUKAN : SNI 2434 - 2011

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

No	Urutan Pemeriksaan	Pemb. Suhu	Pemb. waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda uji			
	Mulai pemanasan	28 °C	9,15 WIB	
	Selesai pemanasan	135 °C	9,30 WIB	
2	Didiamkan pada suhu ruang			
	Mulai	135 °C	9,30 WIB	
	Selesai	28 °C	10,45 WIB	
3	Diperiksa			
	Mulai	5 °C	10,45 WIB	
	Selesai	48 °C	11,24 WIB	

HASIL PENGAMATAN

No.	Suhu yang diamati	Waktu Pemanasan (Detik)		Titik Lembek (°C)	
		Benda Uji I	Benda Uji II	I	II
1	5 °C	0 detik	0 detik		
2	10 °C	396 detik	396 detik		
3	15 °C	618 detik	618 detik		
4	20 °C	813 detik	813 detik		
5	25 °C	1025 detik	1025 detik		
6	30 °C	1265 detik	1265 detik		
7	35 °C	1497 detik	1497 detik		
8	40 °C	1783 detik	1783 detik		
9	45 °C	2189 detik	2189 detik	48°C	48°C
10	50 °C	2392 detik	2392 detik		

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

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

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

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 5 Pemeriksaan Daktilitas Aspal Pen 60/70

PEMERIKSAAN DAKTILITAS (DUCTILITY)/RESIDUE

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

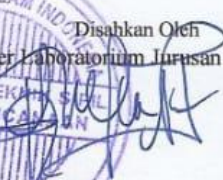
- 1 Contoh dari : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 2 Jenis contoh : Aspal Pertamina Pen 60/70
- 3 Diperiksa tg : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

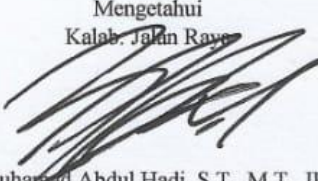
No	Pemeriksaan	Keterangan	Waktu	Temperatur
1	Persiapan benda uji	Aspal dipanaskan	15 menit	suhu pemans $\pm 135^{\circ}\text{C}$
2	Mendinginkan benda uji	Diamkan pada suhu ruang	60 menit	suhu ruang $\pm 28^{\circ}\text{C}$
3	Perendaman benda uji	Direndam dalam water pada suhu 25°C	60 menit	suhu water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

Hasil pemeriksaan

No	Benda uji	Hasil pengujian	Keterangan
1	Sampel 1	168.8 cm	Tidak Putus
2	Sampel 2	168.8 cm	Tidak Putus
4	Rata-rata	168.8 cm	

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya


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

Yogyakarta, Desember 2025
 Peneliti


Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 6 Pemeriksaan Kelarutan Aspal PEN 60/70 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 : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

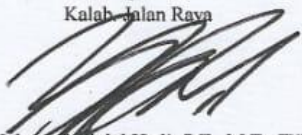
No	Pemeriksaan	Keterangan	Pembacaan		
			Waktu		Suhu
1	Persiapan	Mulai	12,43	WIB	28 °C
		Selesai	12,53	WIB	28 °C
2	Penimbangan	Mulai	12,53	WIB	28 °C
3	Pelarutan	Mulai	12,56	WIB	28 °C
4	Penyaringan	Mulai	13,10	WIB	28 °C
		Selesai	13,17	WIB	28 °C
5	Di Oven	Mulai	13,17	WIB	130 °C
6	Peminbangan	Mulai	13,31	WIB	28 °C

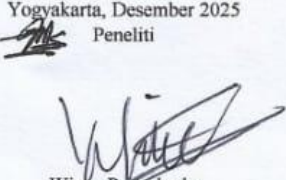
Hasil pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Benda Uji		Keterangan
		1	2	
1	Berat erlen meyer kosong	58,600 gr	65,980 gr	
2	Berat erlen meyer kosong + Aspal	61,040 gr	67,760 gr	
3	Berat Aspal (2 - 1)	2,440 gr	1,780 gr	
4	Berat kertas saring bersih	0,590 gr	0,590 gr	
5	Berat kertas <u>saring</u> bersih + mineral	0,600 gr	0,600 gr	
6	Berat mineral (5 - 4)	0,010 gr	0,010 gr	
7	Prosentase mineral (6/3x100%)	0,410 %	0,562 %	
8	Aspal yang larut (100% - 7)	99,590 %	99,438 %	
9	Rata-rata Aspal yang larut (%)	99,514	%	

Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Wisnu Prambodo
NIM : 20 511 309

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 : Agustus 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	1623,07	1629,90	1626,49
2	Berat benda uji dalam Air (BA) gr	1000,17	1000,43	1000,30
3	Berat benda uji dkering oven (BK) gr	1597,85	1593,60	1595,73
4	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(BJ - BA)}$	2,565	2,532	2,548
5	Berat jenis (SSD) = $\frac{BJ}{(BJ - BA)}$	2,606	2,589	2,597
6	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(BK - BA)}$	2,673	2,687	2,680
7	Penyerapan air = $\frac{(BJ - BK)}{BK} \times 100\%$	1,578	2,278	1,928
8	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,619	2,609	2,614



Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

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 : Agustus 2025

Persiapan pemeriksaan

No	Pemeriksaan	Suhu	Waktu	Keterangan
1	Pemanasan Benda Uji			
	Mulai	25°C	10.15 WIB	
	Selesai	150°C	10.30 WIB	
2	Didiamkan Pada Suhu Ruang			
	Mulai	150°C	10.30 WIB	
	Selesai	25°C	11.00 WIB	
3	Perendaman benda uji			
	Mulai	25°C	11.00 WIB	
	Selesai	25°C	11.30 WIB	

Hasil pemeriksaan

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



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 9 Pemeriksaan Keausan Agregat dengan Mesin Los Angeles

PEMERIKSAAN KEAUSAN AGREGAT KASAR

AASHTO T 96 - 77 ; SNI 2417 : 2008

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

No	Jenis Gradasi		B		Keterangan
	Saringan		Benda Uji (gram)		
	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	4669,00	
12	JUMLAH TERTAHAN DI SIEVE 12(B)		4669,00	3754,00	
13	KEAUSAN $100x = \frac{(A-B)}{A} \times 100\%$		6,620	19,597	
17	Rata-rata Keausan (%)		13,11		

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
DAN PERENCANAAN
Ir. Beriman Kusnari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalah, Jalan Raya
Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

W. Prambodo
NIM : 20 511 309

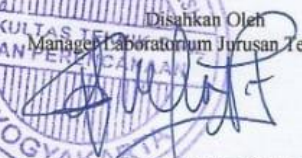
Lampiran 10 Pemeriksaan Berat Jenis Agregat Halus

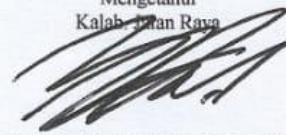
PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT HALUS

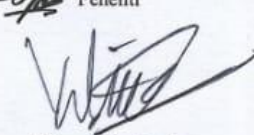
RUJUKAN : SNI 1970 - 2008

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

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat benda uji dalam keadaan basah jenuh (BJ) gr	500,00	500,00	
2	Berat Vicnometer + Air (B) gr	709,88	695,44	
3	Berat Vicnometer + Air + benda uji (BT) gr	1011,43	998,67	
4	Berat benda uji kering oven (BK)	498,13	497,98	
5	Berat jenis (Bulk) = $\frac{BK}{(B + 500) - BT}$	2,510	2,531	2,520
6	Berat jenis (SSD) = $\frac{500}{(B + 500) - BT}$	2,520	2,541	2,530
7	Berat jenis (Semu) = $\frac{BK}{(B + BK) - BT}$	2,534	2,557	2,546
8	Penyerapan air = $\frac{(500 - BK)}{BK} \times 100\%$	0,375	0,406	0,391
9	Berat Jenis Efektif = (BJ Bulk + BJ Semu)/2	2,522	2,544	2,533

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalah, dan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Wisnu Priambodo
NIM : 21 511 216

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 : Agustus 2025

No.	Keterangan		Benda uji		Rata-rata
			1	2	
1	Persiapan, dan perendaman benda uji dalam larutan CaCl_2 selama ($\pm$ 10.1 menit).	Mulai	09.25	09.25	
		Selesai	09.35	09.35	
2	Waktu pengendapan (benda uji setelah digojok sebanyak 90x, dan di tambah larutan CaCl_2)	Mulai	09.40	09.55	
		Selesai	09.55	09.55	
4	Clay reading (Pembacaan Lumpur) Inchi		3,80	3,70	3,75
5	Sand reading (Pembacaan Pasir)		3,50	3,50	3,50
6	$\text{Sand Equivalent} = \frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100 \%$		92,11	94,59	93,35
7	Kandungan Lumpur = 100 - SE		7,89	5,41	6,65



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025

Penceliti

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

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 : Agustus 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	23,80	23,80	
2	Berat Vicnometer + Air gr	46,61	47,23	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,81	23,43	
4	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> gr	33,80	33,80	
5	Berat <i>Filler</i> (4-1) gr	10,600	10,600	10,60
6	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> + Aquadest gr	53,120	52,100	52,61
7	Berat Aquadest (6-4) gr	19,320	18,300	18,81
8	Volume <i>Filler</i> (3-7) gr	3,490	5,130	4,31
9	Berat Jenis <i>Filler</i> = Berat/Vol (5/8)	3,037	2,066	2,552

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
[Signature]
Ir. Berlian Kusnari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalah Jalan Raya
[Signature]
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti
[Signature]
Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

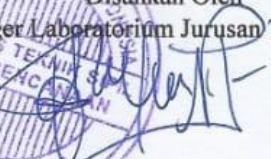
Lampiran 13 Pemeriksaan Berat Jenis *Filler Fly Ash*

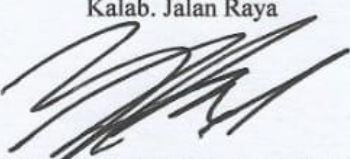
PEMERIKSAAN BERAT JENIS *FILLER FLY ASH*

RUJUKAN : SNI 2441-2011

- 1 Jenis Material : *Filler Fly Ash* Batu Bara
- 2 Sumber Material : PLTU Cilacap
- 3 Diuji Pada : Agustus 2025

No.	Keterangan	Benda uji		Rata-rata
		1	2	
1	Berat Vicnometer Kosong gr	20,22	23,96	
2	Berat Vicnometer + Air gr	43,05	46,42	
3	Berat Vicnometer (2-1) gr	22,83	22,46	
4	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> gr	31,13	30,89	
5	Berat <i>Filler</i> (4-1) gr	10,910	6,930	8,92
6	Berat Vicnometer + <i>Filler</i> + Aquadest gr	47,420	50,550	48,99
7	Berat Aquadest (6-4) gr	16,290	19,660	17,98
8	Volume <i>Filler</i> (3-7) gr	6,540	2,800	4,67
9	Berat Jenis <i>Filler</i> = Berat/Vol (5/8)	1,668	2,475	2,072

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
 Peneliti

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 14 Hasil Pengujian Marshall (KAO)

HASIL PENGUJIAN MARSHALL (KAO)
DENGAN METODE MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

Tanggal Pengujian : Agustus 2025
Tipe Campuran : Asphalt Concrete - Binder Course

Sampel	t (cm)	a (%)	b (%)	c (gram)	d (gram)	e (gram)	f (gram)	g (Density)	h	i	j	k	l VMA (%)	M VFWA (%)	n VTM (%)	o Kalibrasi Proving	p Kalibrasi Proving	q	r Koreksi Tebal	s Flow (mm)	t MQ
5a	64,38	5,26	5,00	1175,93	1181,95	661,05	520,90	2,257	2,394	10,745	83,539	5,716	16,46	65,275	5,72	65	14,3178	930,66	905,61	3,29	275,26
5b	67,41	5,26	5,00	1179,61	1185,72	665,75	519,97	2,269	2,394	10,798	83,951	5,252	16,05	67,278	5,25	68	14,3178	973,61	888,09	3,20	277,53
5c	64,21	5,26	5,00	1174,84	1180,54	660,43	520,11	2,259	2,394	10,751	83,589	5,660	16,41	65,510	5,66	64	14,3178	916,34	900,15	3,18	283,07
5,5a	65,45	5,82	5,50	1178,12	1184,93	665,07	519,86	2,262	2,378	11,865	83,421	4,714	16,31	66,02	5,54	72	14,3178	1030,88	897,95	3,22	278,62
5,5b	64,22	5,82	5,50	1177,97	1183,17	662,76	520,41	2,264	2,378	11,851	83,322	4,827	16,68	71,058	4,83	70	14,3178	1002,25	982,82	3,49	281,61
5,5c	63,83	5,82	5,50	1175,36	1180,96	661,95	519,01	2,265	2,378	11,857	83,362	4,782	16,64	71,261	4,78	68	14,3178	973,61	965,50	3,64	265,25
6a	63,88	6,38	6,00	1176,15	1181,06	663,33	517,73	2,272	2,363	12,975	83,182	3,843	16,82	77,148	3,84	76	14,3178	1088,15	977,51	3,56	274,44
6b	64,31	6,38	6,00	1181,76	1185,75	664,70	521,05	2,268	2,363	12,954	83,046	4,000	16,95	76,406	4,00	71	14,3178	1016,56	996,06	3,84	259,39
6c	64,28	6,38	6,00	1180,95	1184,27	663,78	520,49	2,269	2,363	12,959	83,078	3,963	16,92	76,582	3,96	74	14,3178	1059,52	1038,94	3,78	274,85
6,5a	63,63	6,95	6,50	1179,94	1182,20	663,04	519,16	2,273	2,347	14,063	82,777	3,160	17,22	81,652	3,16	69	14,3178	987,93	984,80	3,79	274,62
6,5b	64,65	6,95	6,50	1183,18	1185,57	665,65	519,92	2,276	2,347	14,081	82,883	3,036	17,12	82,263	3,04	72	14,3178	1030,88	1001,16	3,89	253,16
6,5c	64,36	6,95	6,50	1182,52	1184,64	664,62	520,02	2,274	2,347	14,070	82,821	3,109	17,18	81,904	3,11	69	14,3178	987,93	966,60	3,92	246,58
7a	63,91	7,53	7,00	1180,44	1181,92	658,30	523,42	2,255	2,332	15,028	81,699	3,273	18,30	82,114	3,27	57	14,3178	816,11	984,19	3,88	253,49
7b	64,04	7,53	7,00	1181,28	1182,37	668,15	514,22	2,297	2,332	15,307	83,220	1,473	16,78	91,224	1,47	60	14,3178	859,07	847,54	4,12	205,71
7c	63,94	7,53	7,00	1180,97	1181,98	660,20	521,78	2,263	2,332	15,082	81,993	2,926	18,01	83,753	2,93	59	14,3178	844,75	835,39	4,09	204,25
								2,272		17,70				85,70	2,56				830,25	4,08	203,64

Disahkan Oleh
Ketua Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA

DAN PEREKAM
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

NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Ketua Jurusan Raya
Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti
Widu Prambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 15 Hasil Pengujian IRS (KAO)

HASIL PENGUJIAN IRS (KAO)

Persen Aspal	Tebal Sampel (mm)			koreksi	Arloji Stability			Flow (mm)		Stability (kg)		Tebal Sampel		Angka Koreksi	
	1	2	3		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	awal	rata2	MIN	MAX	MIN	MAX
5,0%	1	64,60	64,21	64,81	64,54	58	14,32	830,43	295	808,84		63,5	65,1	1	0,96
	2	64,53	63,93	62,70	63,72	56	14,32	801,80	300	797,39	809,63	63,5	65,1	1	0,96
	3	64,86	65,81	65,01	65,23	60	14,32	859,07	298	822,66		65,1	66,7	0,96	0,93
5,5%	1	63,57	63,48	64,05	63,70	62	14,32	887,70	302	883,26		63,5	65,1	1	0,96
	2	63,91	64,29	64,75	64,32	65	14,32	930,66	327	911,66	891,00	63,5	65,1	1	0,96
	3	66,01	66,44	65,49	65,98	65	14,32	930,66	310	878,07		65,1	66,7	0,96	0,93
6,0%	1	63,78	63,55	63,59	63,64	67	14,32	959,29	325	955,93		63,5	65,1	1	0,96
	2	65,27	65,80	65,43	65,50	70	14,32	1002,25	313	954,64	958,72	65,1	66,7	0,96	0,93
	3	63,71	63,87	63,91	63,83	68	14,32	973,61	340	965,58		63,5	65,1	1	0,96
6,5%	1	64,87	64,72	64,84	64,81	66	14,32	944,97	350	914,03		63,5	65,1	1	0,96
	2	65,02	64,77	64,54	64,78	63	14,32	902,02	312	873,23	890,52	63,5	65,1	1	0,96
	3	63,74	63,67	63,55	63,65	62	14,32	887,70	333	884,30		63,5	65,1	1	0,96
7,0%	1	63,72	63,52	63,58	63,61	50	14,32	715,89	360	713,98		63,5	65,1	1	0,96
	2	63,77	63,74	63,92	63,81	52	14,32	744,53	352	738,76	739,45	63,5	65,1	1	0,96
	3	63,78	64,02	63,87	63,89	54	14,32	773,16	326	765,62		63,5	65,1	1	0,96

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

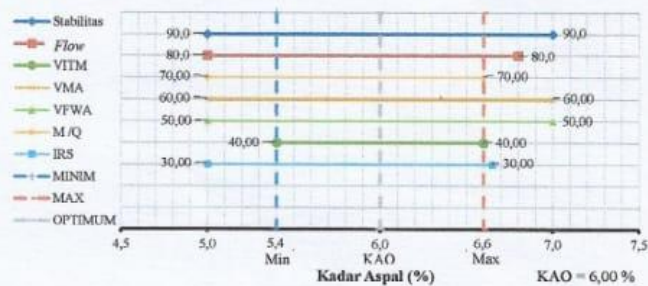
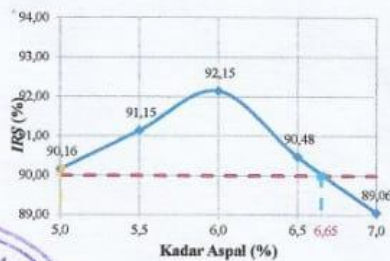
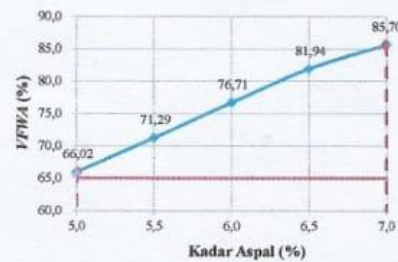
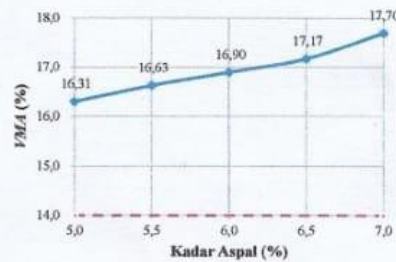
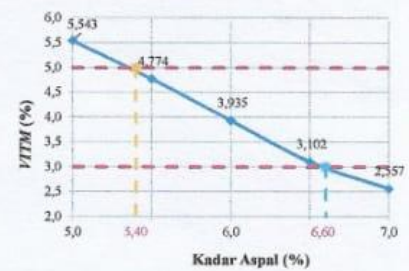
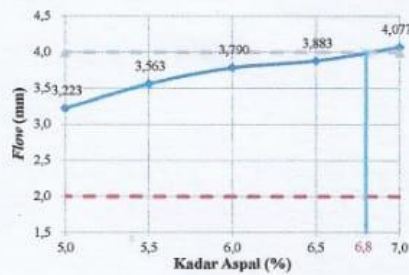
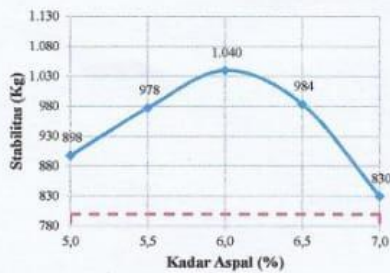
Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Wati Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 16 Rekapitulasi KAO Aspal Pen. 60/70

HASIL REKAPITULASI KAO ASPAL PEN. 60/70

SPESIFIKASI Asphalt Concrete- Binder Course (AC-BC)	Kadar Aspal (%)	Stabilitas 0 Jam (kg)	Flow (mm)	VITM (%)	VMA (%)	Marshall Quotient	Stabilitas 24 Jam (kg)	IRS (%)
	5,00	897,95	3,22	5,54	16,31	278,62	809,63	90,16
	5,50	977,51	3,56	4,77	16,63	274,44	891,00	91,15
	6,00	1040,36	3,79	3,94	16,90	274,62	958,72	92,15
	6,50	984,19	3,88	3,10	17,17	253,49	890,52	90,48
	7,00	830,25	4,08	2,56	17,70	203,64	739,45	89,06
BINA MARGA 2018		> 800	> 2-4	3 - 5	> 14	> 250	> 800	> 90



Bisaikan Oleh
Klausur Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Ir. Bednan Kuslani, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Ketab. Jalan Raya
Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti
Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309



UNIVERSITAS
ISLAM
INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 17 Hasil Pengujian Marshall Konvensional

HASIL PENGUJIAN MARSHALL UNTUK MENENTUKAN BATAS ATAS ATAU MAKSIMUM SUBSTITUSI
DENGAN METODE MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

SEPTEMBER 2025
AC-BC

Tanggal Pengujian
Type Campuran

Stapel	t (cm)	a (%)	b (%)	c (gram)	d (gram)	e (gram)	f (gram)	g	h	i	j	k	l VMA (%)	M VPWA (%)	n VTM (%)	o	p Kadarair Proctor Reg.	q	Koraksi Tebal	r Stab. (kg)	s Flow (mm)	t MQ
0%	63,58	6,38	6,00	1176,15	1180,06	662,04	518,02	2,270	2,363	12,962	83,135	3,903	16,86	76,856	3,90	76	14,31779	1088,15	0,9981	1086,07	3,10	350,34
0%	64,31	6,38	6,00	1181,76	1184,75	663,96	520,79	2,269	2,363	12,954	83,087	3,958	16,91	76,895	3,96	71	14,31779	1016,56	0,9798	996,06	3,18	313,23
0%	64,28	6,38	6,00	1180,95	1183,27	662,78	520,49	2,270	2,363	12,953	83,078	3,969	16,92	76,546	3,97	74	14,31779	1059,52	0,9806	1038,94	3,16	328,78
25%	63,85	6,38	6,00	1180,28	1197,79	676,05	521,74	2,262	2,357	12,915	83,065	4,020	16,93	76,260	4,02	67	14,31779	959,29	0,9912	950,82	3,24	293,46
25%	64,15	6,38	6,00	1182,07	1198,36	675,79	522,57	2,262	2,357	12,914	83,059	4,027	16,94	76,227	4,03	70	14,31779	1002,25	0,9837	985,88	3,27	301,49
25%	63,87	6,38	6,00	1180,65	1197,21	675,12	522,09	2,261	2,357	12,910	83,035	4,055	16,96	76,100	4,05	68	14,31779	973,61	0,9908	964,60	3,25	296,80
50%	62,94	6,38	6,00	1181,33	1196,57	670,83	525,74	2,247	2,351	12,828	82,739	4,433	17,26	74,317	4,43	64	14,31779	916,34	1,0141	929,24	3,52	263,99
50%	62,38	6,38	6,00	1179,30	1195,39	671,10	524,29	2,249	2,351	12,841	82,825	4,333	17,17	74,768	4,33	60	14,31779	859,07	1,0281	883,19	3,47	254,52
50%	62,83	6,38	6,00	1180,57	1194,78	669,76	525,02	2,249	2,351	12,837	82,799	4,364	17,20	74,031	4,36	62	14,31779	887,70	1,0168	902,65	3,50	257,90
75%	63,94	6,38	6,00	1176,78	1181,76	654,89	526,87	2,248	2,345	12,751	82,476	4,773	17,52	74,47	4,40	60	14,31779	859,07	0,989	849,62	3,70	229,63
75%	64,94	6,38	6,00	1182,89	1187,94	657,89	530,05	2,232	2,345	12,740	82,407	4,853	17,59	72,417	4,85	65	14,31779	930,66	0,964	897,08	3,80	236,07
75%	64,04	6,38	6,00	1181,68	1186,85	657,52	529,33	2,232	2,345	12,744	82,435	4,821	17,57	72,556	4,82	61	14,31779	873,39	0,987	861,59	3,75	229,76
								2,233					17,58	72,49	4,84					879,34	3,78	232,92



Dibuat Oleh
Manajemen Laboratorium Teknik Sipil

Mengetahui
Kalimb. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

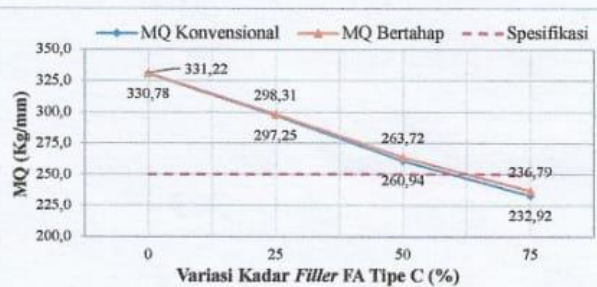
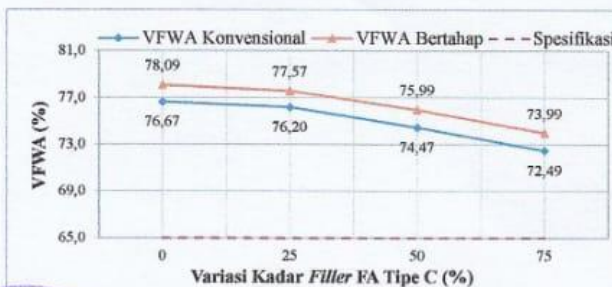
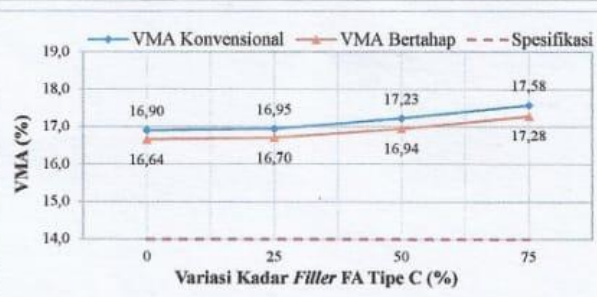
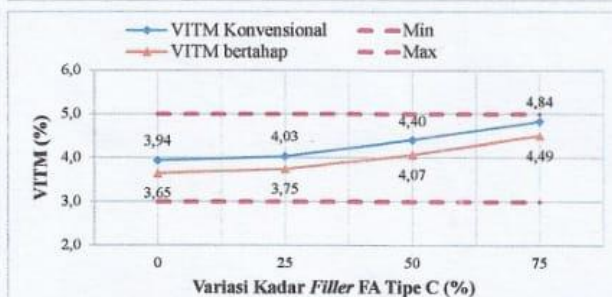
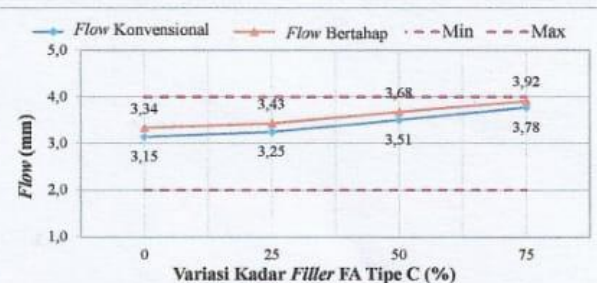
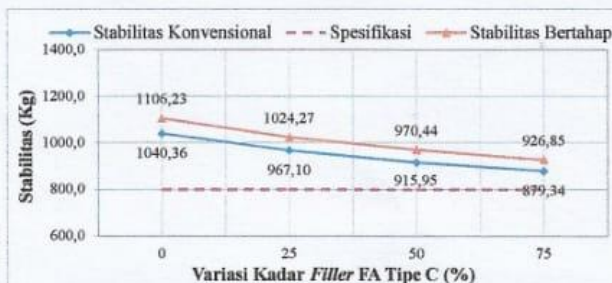
W. Wisu Pramobodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 19 Rekapitulasi Pengujian Marshall Bertahap dan Konvensional

REKAPITULASI MARSHALL KONVENSIONAL DAN BERTAHAP

KETERANGAN		STABILITAS	FLOW	VITM	VMA	VTWA	M/Q
K	0	1040,36	3,15	3,94	16,90	76,67	330,78
K	25	967,10	3,25	4,03	16,95	76,20	297,25
K	50	915,95	3,51	4,40	17,23	74,47	260,94
K	75	879,34	3,78	4,84	17,58	72,49	232,92
spesifikasi		800	2-4	3-5	14	65	250

KETERANGAN		STABILITAS	FLOW	VITM	VMA	VFWA	M/Q
B	0	1106,23	3,34	3,65	16,64	78,09	331,22
B	25	1024,27	3,43	3,75	16,70	77,57	298,31
B	50	970,44	3,68	4,07	16,94	75,99	263,72
B	75	926,85	3,92	4,49	17,28	73,99	236,79
spesifikasi		800	2-4	3-5	14	65	250



Disahkan Oleh
Manajemen Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Ir. Berlian Kustiari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalah, John Ray

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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309



UNIVERSITAS
ISLAM
INDONESIA

FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 20 Hasil Pengujian IRS Konvensional

HASIL PENGUJIAN IRS KONVENSIONAL

Persen Substitusi (%)		Tebal Sampel (mm)				koreksi	Arloji Stability			Flow (mm)		Stability (kg)		Tebal Sampel		Angka Koreksi	
		1	2	3	rata2		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	awal	rata2	MIN	MAX	MIN	MAX
0	1	63,78	63,55	63,59	63,64	1,00	69	14,32	987,93	322			984,47	63,5	65,1	1	0,96
	2	65,27	65,80	65,43	65,50	0,95	73	14,32	1045,20	313	3,22		995,55	65,1	66,7	0,96	0,93
	3	63,71	63,87	63,91	63,83	0,99	70	14,32	1002,25	330			993,98	63,5	65,1	1	0,96
25	1	64,02	64,14	63,96	64,04	0,99	64	14,32	916,34	333			903,97	63,5	65,1	1	0,96
	2	63,70	63,65	63,92	63,76	0,99	63	14,32	902,02	329	3,31		896,23	63,5	65,1	1	0,96
	3	63,89	63,92	64,07	63,96	0,99	66	14,32	944,97	330			934,11	63,5	65,1	1	0,96
50	1	62,78	61,64	61,85	62,09	1,04	55	14,32	787,48	335			815,24	61,9	63,5	1,04	1
	2	63,46	64,03	64,05	63,85	0,99	58	14,32	830,43	352	3,46		823,23	63,5	65,1	1	0,96
	3	63,67	63,74	63,54	63,65	1,00	60	14,32	859,07	350			855,85	63,5	65,1	1	0,96
75	1	64,23	64,16	64,05	64,15	0,98	57	14,32	816,11	378			802,92	63,5	65,1	1	0,96
	2	63,96	64,21	64,08	64,08	0,99	56	14,32	801,80	374	3,78		790,10	63,5	65,1	1	0,96
	3	64,56	64,43	64,11	64,37	0,98	59	14,32	844,75	381			826,45	63,5	65,1	1	0,96

Disahkan Oleh

Manajemen Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

FAKULTAS TEKNIK SIPIL
DAN PERENCANAAN

Ir. Burhan Kuslari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.

NIK : 01 511 0101

Mengetahui

Kalab. Jalan Raya

Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025

Peneliti

Wisu Priambodo

NIM : 20 511 309

Lampiran 21 Hasil Pengujian IRS Bertahap

HASIL PENGUJIAN IRS BERTAHAP

Persen Substitusi (%)	Tebal Sampel (mm)				koreksi			Arloji Stability			Flow (mm)			Stability (kg)			Tebal Sampel			Angka Koreksi		
	1	2	3	rata2	Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	awal	rata2	awal	rata2	awal	rata2	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	Koreksi
0	62,10	61,82	61,93	61,95	72	14,31779	1030,88	340				1070,83		61,9	63,5	1,04		1,04				1
	62,73	62,69	62,57	62,66	74	14,31779	1059,52	344	3,43			1081,68	1078,83	61,9	63,5	1,04		1,04				1
	63,65	63,78	63,53	63,65	76	14,31779	1088,15	345				1083,98		63,5	65,1							0,96
25	64,21	63,98	64,11	64,10	71	14,31779	1016,56	362				1001,31		63,5	65,1							0,96
	63,78	63,87	64,02	63,89	69	14,31779	987,93	358	3,59			978,30	982,30	63,5	65,1							0,96
	63,77	63,69	63,82	63,76	68	14,31779	973,61	357				967,28		63,5	65,1							0,96
50	64,82	64,77	64,94	64,84	66	14,31779	944,97	379				913,24		63,5	65,1							0,96
	63,71	63,26	63,68	63,55	64	14,31779	916,34	372	3,76			915,19	915,63	63,5	65,1							0,96
	64,23	63,98	64,17	64,13	65	14,31779	930,66	378				916,08		63,5	65,1							0,96
75	63,88	63,69	63,91	63,83	59	14,31779	844,75	387				837,85		63,5	65,1							0,96
	64,25	64,06	64,26	64,19	62	14,31779	887,70	393	3,90			872,39	865,54	63,5	65,1							0,96
	64,12	64,19	64,21	64,17	61	14,31779	873,39	389				858,68		63,5	65,1							0,96

Disahkan Oleh
Menteri Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
FAKULTAS TEKNIK SIPIL
DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Yogyakarta, 01 511 0101
ASEAN, Eng.
M. Eng. IPM., ASEAN, Eng.
M. Eng. IPM., ASEAN, Eng.

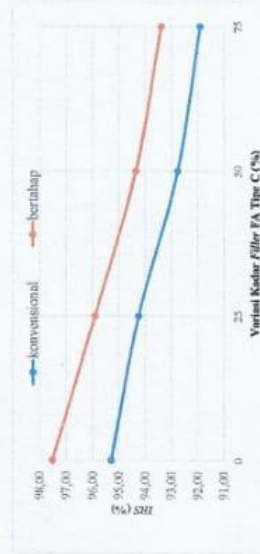
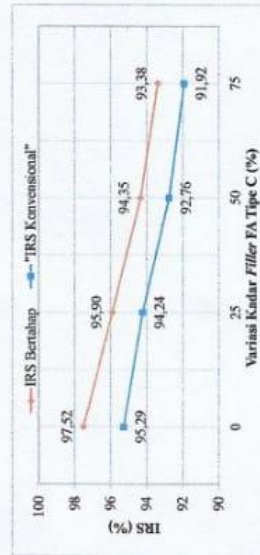
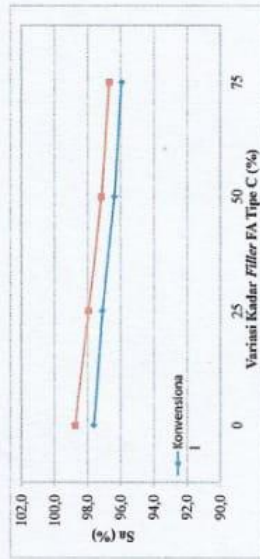
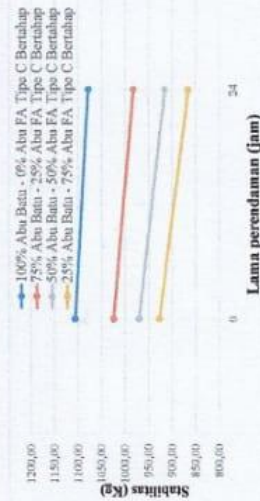
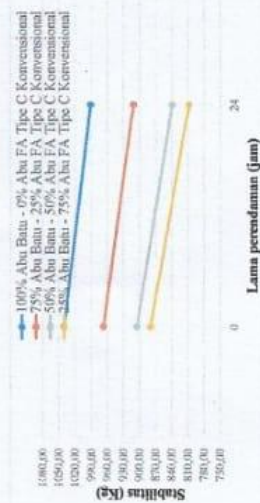
Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Wisu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 22 Rekapitulasi Pengujian IRS Bertahap dan Konvensional

REKAPITULASI PENGUJIAN IRS KONVENSIONAL DAN BERTAHAP

Kondisi	Kadar Substitusi (%)	Stabilitas		IRS (%)	Si (%)	Si+1 (%)	Si+1 (Jam)	IDP (%)	IDP (Jam)	IDK (%)	Sn (%)
		0,5 Jam (kg)	24 Jam (kg)								
Konvensional	0	1040,36	991,33	95,29	100,00	95,29	24,00	0,205	48,000	2,356	97,644
	25	967,10	911,44	94,24	100,00	94,24	24,00	0,250	48,000	2,878	97,122
	50	905,03	839,54	92,76	100,00	92,76	24,00	0,315	48,000	3,618	96,382
	75	879,34	808,28	91,92	100,00	91,92	24,00	0,351	48,000	4,041	95,959
Bertahap	0	1106,23	1078,83	97,52	100,00	97,52	24,00	0,108	48,000	1,238	98,762
	25	1024,27	982,30	95,90	100,00	95,90	24,00	0,178	48,000	2,049	97,951
	50	970,44	915,63	94,35	100,00	94,35	24,00	0,246	48,000	2,824	97,176
	75	926,85	865,54	93,38	100,00	93,38	24,00	0,288	48,000	3,308	96,692



Disahkan Oleh
Ketua Tim Riset
Dr. Mubandjir Abdul Hadi, S.T., M.T., I.P.P.
NIR : 01 511 0101

Mengesahkan
Ketua Tim Riset
Dr. Mubandjir Abdul Hadi, S.T., M.T., I.P.P.
NIR : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti
Wisma Primadodo
NIM : 20 511 309



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.fisp@uii.ac.id
W. fisp.uii.ac.id

Lampiran 23 Hasil Pengujian ITS Konvensional

HASIL PENGUJIAN ITS KONVENSIONAL

Kadar Aspal	Substitusi (%)	Tebal Sampel (mm)			Koreksi	Diameter Sampel (Inchi)			A0	Arloji Stability			Stability (kg)		Angka Koreksi Tebal			Angka Koreksi Diameter			ITS 0 JAM	
		1	2	3		1	2	3		Meas	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	awal	rata2
		rata2	rata2	rata2		rata2	rata2	rata2		rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2	rata2
6,0%	0	1 63,05	62,99	62,83	1,01	4,00	4,00	4,00	0,16	26	14,318	372,26	377,32		61,9	63,5	1,04	4,1	0,156	0,152	916,60	
		2 61,99	62,42	62,61	1,03	4,04	4,04	4,04	0,15	24	14,318	343,63	353,59	364,84	61,9	63,5	1,04	4,1	0,156	0,152	858,88	883,04
		3 62,82	62,76	63,02	1,02	4,05	4,05	4,05	0,15	25	14,318	357,94	363,61		61,9	63,5	1,04	4,1	0,156	0,152	873,64	
	25	1 63,24	63,85	63,97	1,00	4,04	4,01	4,02	0,15	25	14,318	357,94	356,27		63,5	65,1	1	0,96	0,156	0,152	850,03	
		2 64,05	63,91	63,87	0,99	4,03	4,03	4,03	0,15	27	14,318	386,58	382,30	360,67	63,5	65,1	1	0,96	0,156	0,152	907,93	862,01
		3 63,76	63,62	63,19	1,00	3,99	4,00	3,99	0,16	24	14,318	343,63	343,43		63,5	65,1	1	0,96	0,156	0,152	828,05	
	50	1 63,78	63,61	63,54	1,00	3,99	3,98	3,98	0,15	26	14,318	372,26	370,93		63,5	65,1	1	0,96	0,156	0,152	872,58	
		2 63,52	63,28	63,31	1,00	3,99	3,99	3,99	0,15	25	14,318	357,94	359,11	351,97	61,9	63,5	1,04	3,9	0,156	0,152	847,13	842,10
		3 62,96	63,12	63,07	1,01	4,01	4,00	4,01	0,16	23	14,318	329,31	333,01		61,9	63,5	1,04	4,1	0,156	0,152	806,61	
	80	1 64,18	63,95	64,07	0,99	3,99	3,99	3,99	0,16	24	14,318	343,63	338,76		63,5	65,1	1	0,96	0,156	0,156	811,29	
		2 63,80	63,87	64,03	0,99	3,98	3,98	3,98	0,16	22	14,318	314,99	311,84	343,65	63,5	65,1	1	0,96	0,156	0,156	749,93	820,73
		3 64,22	64,09	64,12	0,98	4,03	4,02	4,03	0,15	27	14,318	386,58	380,36		63,5	65,1	1	0,96	0,156	0,152	900,98	

Disahkan Oleh
Dekanat Fakultas Teknik Sipil
Dan Perencanaan
Yogyakarta

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

Widhi
Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 24 Hasil Pengujian ITS Bertahap

HASIL PENGUJIAN ITS BERTAHAP

Kadar Aspal	Substitusi	Tebal Sampel (mm)			koreksi	Diameter Sampel (Inchi)			A0	Arloji Stability			Stability (kg)		Angka Koreksi Tebal				Angka Koreksi Diameter				ITS 0 JAM				
		1	2	3		1	2	3		Mens	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	awal	rata2			
6,0%	0	1	63,87	63,72	64,17	63,92	0,99	3,98	3,97	3,97	3,97	0,16	28	14,32	400,90	396,69		63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	955,56	
		2	63,71	64,33	63,36	63,80	0,99	3,98	3,98	3,98	3,98	0,16	26	14,32	372,26	369,47	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	889,97	800
		3	63,76	63,43	64,09	63,76	0,99	3,99	3,97	3,97	3,97	0,16	24	14,32	343,63	341,39		63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	823,98	
25	1	63,87	64,02	63,90	63,93	0,99	3,99	4,00	3,99	4,00	0,16	25	14,32	357,94	354,10		63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	848,29		
		2	64,12	64,23	64,19	64,18	0,98	4,03	4,04	4,02	4,03	0,15	27	14,32	386,58	380,01	800	63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	898,74	800
		3	64,23	63,95	64,16	64,11	0,98	3,99	3,99	3,99	3,99	0,16	26	14,32	372,26	366,55		63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	876,42	
50	2	63,76	63,39	63,34	63,50	1,00	3,97	3,98	3,97	3,97	0,16	23	14,32	329,31	329,34		63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	798,85		
		2	63,38	63,99	63,83	63,73	0,99	4,00	3,99	3,99	3,99	0,16	25	14,32	357,94	355,86	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	855,86	800
		3	63,28	63,75	64,48	63,84	0,99	4,00	4,00	3,94	3,98	0,16	27	14,32	386,58	383,33		63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	923,49	
75	1	63,43	63,37	63,31	63,37	1,00	3,97	3,97	3,97	3,97	0,16	24	14,32	343,63	344,74		61,9	63,5	1,04	1	3,9	4	0,16	0,156	838,34		
		2	64,28	64,07	64,12	64,16	0,98	3,99	3,99	3,99	3,99	0,16	26	14,32	372,26	366,15	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,16	0,156	876,19	800
		3	62,95	63,24	63,18	63,12	1,01	3,95	3,95	3,95	3,95	0,16	23	14,32	329,31	332,41		61,9	63,5	1,04	1	3,9	4	0,16	0,156	815,87	

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

W. fsp.uii.ac.id
NIM : 20 511 309

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Disahkan Oleh
Manajemen Akademik Jurusan Teknik Sipil
FAKULTAS TEKNIK
DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
Yogyakarta, 01 511 0101

Lampiran 25 Hasil Pengujian TSR Konvensional

HASIL PENGUJIAN TSR KONVENSIONAL

Kadar Aspal	Substitusi (%)	Tebal Sampel (mm)				koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)		Angka koreksi				Angka koreksi				ITS 24 JAM				
		rata2					rata2					Adjust			awal	rata2	Tebal Sampel		Koreksi		Tebal Sampel		Koreksi		awal	rata2	kpa		
		1	2	3	rata2		1	2	3	rata2		Mean	Kalibrasi	MIN			MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN				MAX	
6,0%	0	1	64,37	64,92	63,88	64,39	0,98	3,96	3,97	3,97	3,97	0,157	24	14,318	343,63	335,98	358,42	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	805,32	805,32	800
		2	63,64	63,91	64,01	63,85	0,99	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	27	14,318	386,58	383,17	386,11	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	915,05	915,05	860,26
		3	63,65	63,76	63,94	63,71	0,99	3,98	3,97	3,98	3,98	0,16	25	14,318	357,94	356,11	356,11	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	860,42	860,42	
	25	1	63,54	63,48	63,76	63,59	1,00	3,99	3,99	3,98	3,99	0,157	26	14,318	372,26	371,39	371,39	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	896,82	896,82	800
		2	62,89	63,54	63,56	63,33	1,00	3,97	3,97	3,97	3,97	0,157	22	14,318	314,99	316,33	316,33	800	63,5	65,1	1,04	1	3,9	4	0,160	0,156	769,70	769,70	
		3	63,43	63,57	63,69	63,56	1,00	4,00	4,00	4,00	4,00	0,156	24	14,318	343,63	343,08	343,08	800	63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	826,20	826,20	
	50	1	63,15	63,61	63,34	63,37	1,00	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	25	14,318	357,94	359,14	359,14	800	61,9	63,5	1,04	1	4	4,1	0,156	0,152	864,52	864,52	800
		2	62,08	60,60	60,58	61,09	1,06	4,04	4,04	4,05	4,04	0,15	21	14,318	300,67	318,81	318,81	800	61,9	63,5	1,04	1	4	4,1	0,156	0,152	789,32	789,32	
		3	62,76	62,45	62,57	62,59	1,02	4,02	4,02	4,03	4,02	0,16	21	14,318	300,67	307,49	307,49	800	61,9	63,5	1,04	1	3,9	4	0,160	0,156	746,85	746,85	
	75	1	63,76	63,54	63,66	63,65	1,00	3,99	3,99	3,99	3,99	0,16	22	14,318	314,99	313,78	313,78	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	755,97	755,97	
		2	62,97	63,05	63,12	63,05	1,01	4,01	4,01	4,01	4,01	0,16	21	14,318	300,67	304,08	304,08	800	61,9	63,5	1,04	1	4	4,1	0,156	0,152	735,80	735,80	768,99
		3	64,12	64,08	63,98	64,06	0,99	3,97	3,97	3,97	3,97	0,16	24	14,318	343,63	338,82	338,82	800	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	815,21	815,21	

Yogyakarta, Desember 2025

Peneliti

Mengetahui

Kalib, Jember Raya

Yogyakarta, Desember 2025

Peneliti

Widu Priambodo

NIM : 20 511 309

Ir. Mohammad Abdul Haq, S.T., M.T., I.P.P.

NIK : 21 511 1307



UNIVERSITAS
ISLAM
INDONESIA

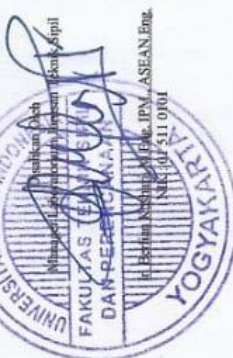
FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 26 Hasil Pengujian TSR Bertahap

HASIL PENGUJIAN TSR BERTAHAP

Kadar Aspal	Substansi (%)	Tebal Sampel (mm)					koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				A0	Arloji Stability			Stability (kg)			Angka Koreksi				Angka Koreksi				ITS 24 JAM		
		1	2	3	rata2			1	2	3	rata2		Mean	Kalibrasi	Adjust	awal	rata2	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	awal	rata2	MIN	MAX
6,0%	0	1	61,77	60,88	62,13	61,59	1,05	4,01	4,00	4,01	4,01	0,156	23	14,31779	329,31	345,64	60,3	61,9	1,09	1,04	4	4,1	0,156	0,152	857,10				
		2	64,08	64,79	64,73	64,53	0,97	3,98	3,97	3,98	3,98	0,154	27	14,31779	386,58	376,59	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,152	880,27				
		3	63,65	63,27	63,17	63,36	1,00	3,98	3,97	3,98	3,98	0,157	26	14,31779	372,26	373,53	61,9	63,5	1,04	1	3,9	4	0,160	0,156	907,38				
	25	1	62,56	62,87	63,07	62,83	1,02	3,99	3,99	4,00	3,99	0,156	26	14,31779	372,26	378,47	61,9	63,5	1,04	1	3,9	4	0,160	0,156	922,84				
		2	63,76	63,69	63,89	63,78	0,99	3,97	3,97	3,97	3,97	0,157	22	14,31779	314,29	312,79	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	755,91				
		3	64,03	63,88	63,82	63,91	0,99	4,02	4,02	4,02	4,02	0,155	27	14,31779	386,58	382,62	63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	910,80				
	50	1	63,80	64,08	63,50	63,79	0,99	3,98	3,98	3,98	3,98	0,157	26	14,31779	372,26	369,53	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	890,18				
		2	63,18	62,81	63,02	63,00	1,01	4,01	4,00	4,00	4,00	0,156	22	14,31779	314,29	318,90	61,9	63,5	1,04	1	4	4,1	0,156	0,152	773,68				
		3	63,23	63,37	63,19	63,26	1,01	3,98	3,97	3,98	3,97	0,157	24	14,31779	343,63	345,66	61,9	63,5	1,04	1	3,9	4	0,160	0,156	841,45				
	75	1	64,23	64,36	64,08	64,22	0,98	4,04	4,03	4,01	4,03	0,15	26	14,31779	372,26	365,53	63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	864,74				
		2	64,01	64,17	64,22	64,13	0,98	4,01	4,02	3,98	4,00	0,16	24	14,31779	343,63	338,19	63,5	65,1	1	0,96	4	4,1	0,156	0,152	800,20				
		3	63,98	63,87	63,81	63,89	0,99	3,95	3,95	3,95	3,95	0,16	22	14,31779	314,29	311,95	63,5	65,1	1	0,96	3,9	4	0,160	0,156	756,44				



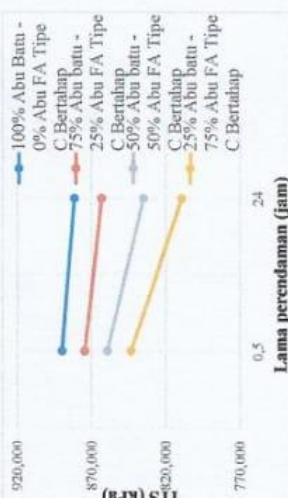
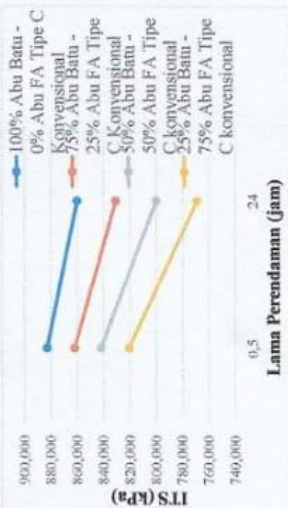
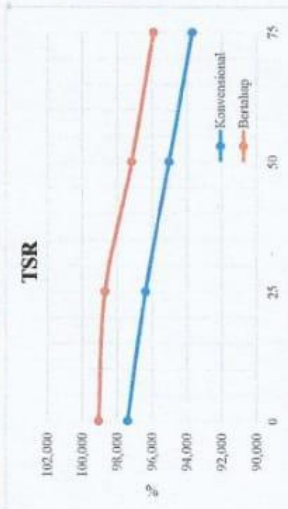
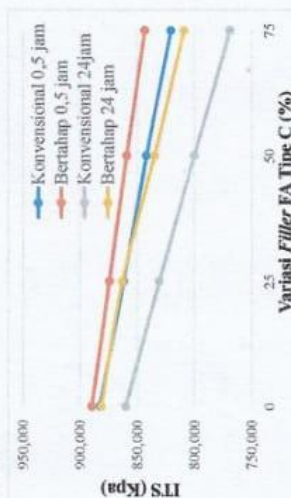
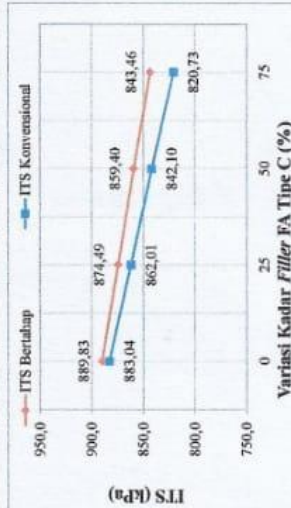
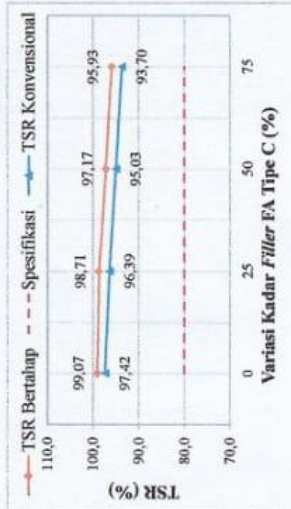
Mengetahui
Kaharudin Raya
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti
Widhi
Widhi Prambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 27 Rekapitulasi Pengujian ITS dan TSR

HASIL REKAPITULASI PENGUJIAN (ITS KONVENSIONAL DAN BERTAHAP) & (TSR KONVENSIONAL DAN BERTAHAP)

Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	Bertahap		Konvensional	
		ITS	ITS 24 Jam	ITS	ITS 24 Jam
0	6%	889,83	881,58	883,04	860,26
25		874,49	863,19	862,01	830,91
50		859,40	835,10	820,13	800,23
75		843,46	809,13	820,73	768,99
				95,93	93,70



UNIVERSITAS ISLAM POSKALAH
Diposalkan Oleh
Mangestika Dhermawati Jurusan Teknik Sipil
FAKULTAS TEKNIK SIPIL
DAN PERENCANAAN
H. Baidi Kusdiana M.Eng. IPM, ASEAN Eng.
NIR/01 511 0101
YOGYAKARTA

Mengetahui
Korab. Brian Roes

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

Yogyakarta, Desember 2025


Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 28 Hasil Pengujian CL Normal Konvensional

PENGUJIAN CANTABRO LOSS NORMAL KONVENSIONAL

Substitusi	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi	1182,04	1186,33	1187,74
	2	Berat Sesudah Abrasi	1136,62	1139,60	1140,86
	3	Persentase Kehilangan Berat	3,84	3,94	3,95
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		3,94	
25%	1	Berat Sebelum Abrasi	1183,75	1185,98	1179,86
	2	Berat Sesudah Abrasi	1125,57	1126,39	1121,79
	3	Persentase Kehilangan Berat	4,91	5,02	4,92
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		4,97	
50%	1	Berat Sebelum Abrasi	1175,72	1174,18	1173,38
	2	Berat Sesudah Abrasi	1103,15	1103,02	1102,93
	3	Persentase Kehilangan Berat	6,17	6,06	6,00
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		6,08	
75%	1	Berat Sebelum Abrasi	1180,98	1181,56	1184,12
	2	Berat Sesudah Abrasi	1090,87	1095,97	1100,15
	3	Persentase Kehilangan Berat	7,63	7,24	7,09
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		7,32	

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
FAKULTAS TEKNIK SIPIL
DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA

I. Berhan Kusnari, M.Eng, IPM., ASEAN, Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti

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

Wisnu Priambodo
NIK : 20 511 309

Lampiran 29 Hasil Pengujian CL Normal Bertahap

PENGUJIAN CANTABRO LOSS NORMAL BERTAHAP

Substitusi	No.	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
0%	1	Berat Sebelum Abrasi	1180,50	1177,43	1179,39
	2	Berat Sesudah Abrasi	1130,36	1146,46	1144,67
	3	Persentase Kehilangan Berat	4,25	2,63	2,94
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		3,27	
25%	1	Berat Sebelum Abrasi	1183,95	1182,74	1179,96
	2	Berat Sesudah Abrasi	1132,76	1131,79	1128,87
	3	Persentase Kehilangan Berat	4,32	4,31	4,33
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		4,32	
50%	1	Berat Sebelum Abrasi	1170,07	1173,29	1172,87
	2	Berat Sesudah Abrasi	1108,97	1111,65	1109,98
	3	Persentase Kehilangan Berat	5,22	5,25	5,36
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		5,28	
75%	1	Berat Sebelum Abrasi	1175,65	1178,66	1177,78
	2	Berat Sesudah Abrasi	1102,78	1104,57	1106,68
	3	Persentase Kehilangan Berat	6,20	6,29	6,04
	4	Rata-Rata Berat Jenis Filler		6,24	

Disahkan Oleh
Dan F. Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
YOGYAKARTA

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

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

Yogyakarta, Desember 2025

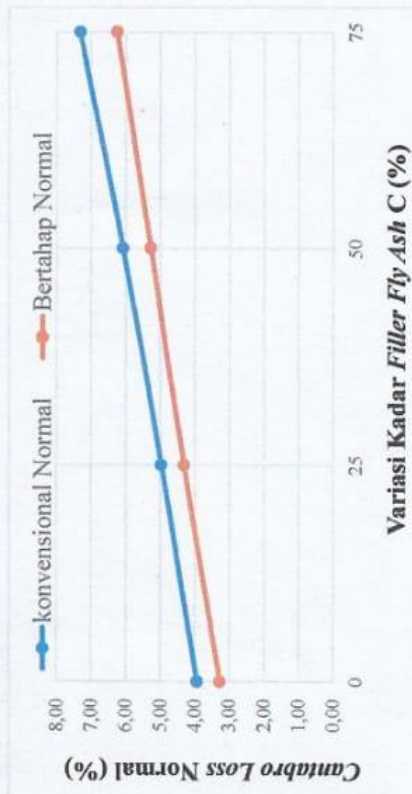
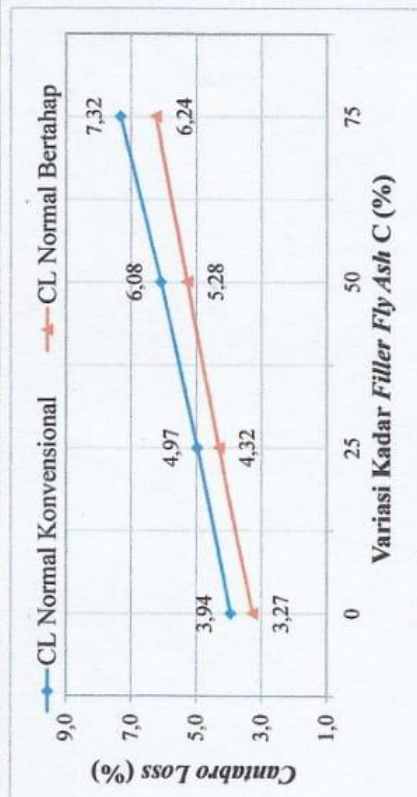
Penceliti

Wisnu Priambodo
NIM : 20 511 309

Lampiran 30 Rekapitulasi Pengujian CL Normal Konvensional dan Bertahap

REKAPITULASI PENGUJIAN CANTRABRO LOSS NORMAL

Konvensional	Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL	Bertahap	Variasi Substitusi (%)	KAO (%)	CL
	0	6	3,94		0	6	3,27
	25		4,97		25		4,32
	50		6,08		50		5,28
	75		7,32		75		6,24



Disahkan Oleh
Manajemen Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
DAN PERENCANAAN

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Yogyakarta, Desember 2025
Peneliti



Wisnu Priambodo
NIK : 20 511 309

Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

NIK : 21 511 1307

Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.

NIK : 01 511 0101