

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PERKERASAN *STONE MATRIX ASPHALT*
(*SMA*) DENGAN *FILLER BOTTOM ASH* BATU BARA
BERDASARKAN VARIASI METODE
PENCAMPURAN DAN PREDIKSI UMUR
PELAYANAN
(*ANALYSIS OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA)*
PAVEMENT WITH COAL BOTTOM ASH FILLER
BASED ON VARIATIONS OF MIXING METHODS AND
SERVICE LIFE PREDICTION)**

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



**Vania Nabila Damayanti
22511064**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026**

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PERKERASAN *STONE MATRIX ASPHALT*
(SMA) DENGAN *FILLER BOTTOM ASH* BATU BARA
BERDASARKAN VARIASI METODE
PENCAMPURAN DAN PREDIKSI UMUR
PELAYANAN
(*ANALYSIS OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA)*
PAVEMENT WITH COAL BOTTOM ASH FILLER
BASED ON VARIATIONS OF MIXING METHODS AND
SERVICE LIFE PREDICTION)**



Pembimbing

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

Penguji 1

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

Penguji 2

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



Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

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

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

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

Yogyakarta, 20 Mei 2026
Yang membuat pernyataan,



Vania Nabila Damayanti
(22511064)

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga Tugas Akhir dengan judul *Analisis perkerasan Stone Matrix Asphalt (SMA) dengan filler bottom ash batu bara berdasarkan variasi metode pencampuran dan prediksi umur pelayanan* akhirnya dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan Tugas Akhir ini merupakan salah satu kewajiban akademik untuk memenuhi persyaratan kelulusan jenjang Strata Satu pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam proses pengerjaannya, penulis menghadapi berbagai kendala. Namun berkat arahan, kritik yang membangun, serta dukungan dan semangat dari banyak pihak, Alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang dengan penuh dedikasi membimbing, mengarahkan, dan membantu penulis selama tahap penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Ibu Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc. selaku Dosen Penguji 1 dalam Sidang Tugas Akhir penulis yang telah memberikan banyak masukan dan ilmu kepada penulis sebagai kesempurnaan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Penguji 2 dalam Sidang Tugas Akhir penulis yang telah memberikan banyak saran dan ilmu kepada penulis sebagai kesempurnaan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D (Eng)., IPM selaku Kepala Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Para Laboran Laboratorium Jalan Raya, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

6. Alm. Bapak Tri Hardianto dan Ibu Yayuk Yuniarsih, selaku orang tua penulis yang telah memberikan berbagai usaha, dukungan, motivasi, semangat, dan do'a yang tidak pernah putus demi kelancaran dan kesuksesan penulis.
7. Argo Dewana dan Moza Cinantya selaku kakak pertama penulis yang telah memberikan arahan, berbagai usaha dan dukungan penuh kepada penulis.
8. Saudara Wiji Rahayu, S.T. yang telah membantu penulis melakukan penelitian berkat arahan, ilmu, dan data penelitian dari saudara yang digunakan penulis sebagai data sekunder.
9. Saphira Ahsya Aulia sebagai rekan penulis yang senantiasa mendampingi serta memberikan dukungan dalam kelancaran proses penulis menyelesaikan tugas akhir.
10. Seluruh rekan-rekan penulis yang telah berjuang bersama serta membantu dan memberikan motivasi untuk penulis.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dan mengandung berbagai kekurangan. Oleh karena itu, penulis menyampaikan permohonan maaf yang sebesar-besarnya. Penulis sangat menghargai kritik serta saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Dengan tulus, penulis berharap bahwa Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan pihak-pihak yang berkepentingan.

Wassalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 20 Mei 2026
Penulis,

Vania Nabila Damayanti
22511064

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xvii
ABSTRAK	xx
<i>ABSTRACT</i>	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Kinerja Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	7
2.2 Kinerja Penggunaan <i>Filler Bottom Ash (BA)</i> Terhadap Campuran Perkerasan	7
2.3 Kinerja Variasi Metode Pencampuran Terhadap Campuran Perkerasan	9
2.4 Prediksi Umur Pelayanan dengan Program <i>KENPAVE</i>	10
2.5 Perbandingan Penelitian Terdahulu Terhadap Campuran Aspal	12
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Perkerasan Jalan Lentur	15
3.2 Material Penyusun Perkerasan Lentur	16
3.2.1 Aspal	16

3.2.2	Agregat	17
3.2.3	Gradasi Agregat	19
3.2.4	Bahan Aditif	19
3.3	Campuran Perkerasan <i>SMA</i>	20
3.4	Limbah <i>BA</i>	21
3.5	Metode Pencampuran Perkerasan	22
3.5.1	Metode Pencampuran Satu Tahap	22
3.5.2	Metode Pencampuran Dua Tahap	23
3.5.3	Metode Pencampuran Tiga Tahap	23
3.6	Parameter Karakteristik Volumetrik Campuran Perkerasan	24
3.6.1	<i>Void in Total Mix (VITM)</i>	24
3.6.2	<i>Void Filled With Asphalt (VFWA)</i>	25
3.6.3	<i>Void in Mineral Aggregate (VMA)</i>	26
3.6.4	Kepadatan (<i>Density</i>)	26
3.7	Parameter Karakteristik Kekuatan Struktur Campuran Perkerasan	27
3.7.1	Stabilitas (<i>Stability</i>)	27
3.7.2	Kelelehan (<i>Flow</i>)	27
3.7.3	<i>Marshall Quotient (MQ)</i>	28
3.7.4	<i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i>	28
3.7.5	<i>Cantabro Loss (CL)</i>	29
3.8	Parameter Karakteristik Durabilitas Campuran Perkerasan	29
3.8.1	<i>Index of Retained Strength (IRS)</i>	29
3.8.2	<i>Tensile Strength Ratio (TSR)</i>	30
3.8.3	<i>Draindown (DD)</i>	30
3.9	<i>Stiffness Modulus (SM)</i>	31
3.9.1	<i>Stiffness Modulus Of Bitumen (Sbit)</i>	31
3.9.2	<i>Stiffness Modulus Of Mixture (Smix)</i>	32
3.10	Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan	32
3.10.1	Desain Tebal Struktur Perkerasan	32
3.10.2	Analisis Dengan Pemodelan Viskoelastik <i>Software KENPAVE</i>	45
3.10.3	Analisis Kerusakan dalam Perkerasan Jalan	59

3.11	Analisis Statistik <i>One-Way MANOVA</i>	60
BAB IV METODE PENELITIAN		63
4.1	Metode Penelitian	63
4.2	Metode Pengambilan Sampel	63
4.3	Metode Pengambilan Data	63
4.3.1	Data Sekunder	63
4.3.2	Data Primer	64
4.4	Tahapan Penelitian	64
4.4.1	Data Sekunder Untuk Perencanaan Campuran	64
4.4.2	Kebutuhan Benda Uji	68
4.4.3	Pembuatan Variasi Campuran Untuk Benda Uji	69
4.4.4	Pengujian <i>Marshall Standard (MS)</i>	70
4.4.5	Pengujian <i>IRS</i>	71
4.4.6	Pengujian <i>ITS</i>	71
4.4.7	Pengujian <i>TSR</i>	71
4.4.8	Pengujian <i>CL</i>	72
4.4.9	Pengujian <i>DD</i>	72
4.5	Analisis Data	73
4.5.1	Analisis <i>Marshall Standard</i>	73
4.5.2	Analisis Karakteristik Kekuatan Struktur Campuran Aspal	73
4.5.3	Analisis Karakteristik Volumetrik Campuran Aspal	73
4.5.4	Analisis Karakteristik Durabilitas Campuran Aspal	74
4.5.5	Analisis Pengujian <i>SM</i>	74
4.5.6	Analisis Prediksi Umur Pelayanan	74
4.5.7	Analisis Statistik <i>One-Way MANOVA</i>	74
4.6	Pengumpulan Data Ruas jalan	76
4.7	Analisis Bagan Alir Penelitian	77
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		79
5.1	Hasil Penelitian	79
5.1.1	Hasil Pengujian Karakteristik Campuran <i>SMA</i> Menggunakan Substitusi <i>Filler BA</i> 50% Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	79

5.1.2	Hasil Perhitungan <i>Stiffness Modulus (SM)</i> Pada Campuran <i>SMA</i> Menggunakan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	80
5.1.3	Hasil Prediksi Umur Pelayanan Pada Campuran <i>SMA</i> Menggunakan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	80
5.1.1	Hasil Analisis Statistik dengan <i>One-Way MANOVA</i>	82
5.2	Pembahasan	83
5.2.1	Tinjauan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Karakteristik Volumetrik Campuran <i>SMA</i>	83
5.2.2	Tinjauan Karakteristik Kekuatan Struktur Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i>	89
5.2.3	Tinjauan Karakteristik Durabilitas Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i>	96
5.2.4	Tinjauan Nilai <i>Stiffness Modulus (SM)</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i>	101
5.2.5	Tinjauan Prediksi Umur Pelayanan Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i>	103
5.2.6	Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i> Terhadap Seluruh Karakteristik Pengujian	106
5.2.7	Rekapitulasi Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i> dan Prediksi Umur Pelayanan	107
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		112
6.1	Kesimpulan	112
6.2	Saran	113
DAFTAR PUSTAKA		114
LAMPIRAN		118

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Perbandingan Penelitian Terdahulu Terhadap Campuran Aspal	12
Tabel 3. 1	Ketentuan Untuk Aspal Keras	17
Tabel 3. 2	Ketentuan Agregat Kasar	18
Tabel 3. 3	Ketentuan Agregat Halus	18
Tabel 3. 4	Amplop Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Beraspal	19
Tabel 3. 5	Persyaratan Bahan Tambah atau <i>Stabilizer</i> untuk <i>SMA</i>	20
Tabel 3. 6	Ketentuan Sifat-Sifat Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	21
Tabel 3. 7	Umur Rencana Perkerasan Jalan Baru (UR)	33
Tabel 3. 8	Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan	34
Tabel 3. 9	Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i)	35
Tabel 3. 10	Faktor Distribusi Lajur (DL)	36
Tabel 3. 11	<i>Vehicle Damage Factor (VDF)</i> - Jambi	37
Tabel 3. 12	Pemilihan Jenis Perkerasan	38
Tabel 3. 13	Bagan Desain-3(1) Desain Perkerasan Lentur Dengan 150 mm <i>CTB</i> (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	39
Tabel 3. 14	Bagan Desain-3(2) Desain Perkerasan Lentur Dengan 200 mm <i>CTB</i> (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	40
Tabel 3. 15	Bagan Desain-3(4) Desain Perkerasan Lentur Dengan 300 mm <i>CTB</i> (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	41
Tabel 3. 16	Bagan Desain-3A Desain Perkerasan Lentur – Aspal Dengan Lapis Fondasi Agregat (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	42
Tabel 3. 17	Penyesuaian Tebal Lapis Timbunan Pilihan Berbutir Kasar Atau LFA Kelas C Atau Stabilisasi Semen (Hanya Untuk Bagan Desain- 3A) Beban Rencana 20 Tahun > 5 juta <i>ES45</i>	43
Tabel 3. 18	Bagan Desain-4 Desain Perkerasan Lentur Dengan <i>HRS</i>	43
Tabel 3. 19	Bagan Desain-5 Perkerasan Berbutir Dengan Laburan1	44

Tabel 3. 20	Karakterisasi Modulus Bahan Berpengikat Yang Digunakan Untuk Pengembangan Bagan Desain dan Untuk Analisis Mekanistik	49
Tabel 3. 21	Karakterisasi Material	50
Tabel 4. 1	Data Sekunder Pengujian Aspal	64
Tabel 4. 2	Data Sekunder Pengujian Berat Jenis <i>Filler</i>	65
Tabel 4. 3	Data Sekunder Pengujian Agregat Halus	65
Tabel 4. 4	Data Sekunder Pengujian Agregat Kasar	65
Tabel 4. 5	Gradasi Campuran <i>SMA</i> 25 mm	66
Tabel 4. 5	Karakteristik Volumetrik Metode Pencampuran Satu Tahap	68
Tabel 4. 6	Karakteristik Kekuatan Struktur Metode Pencampuran Satu Tahap	68
Tabel 4. 7	Karakteristik Durabilitas Metode Pencampuran Satu Tahap	68
Tabel 4. 8	Jumlah Benda Uji	68
Tabel 4. 9	Lalu Lintas Harian Rerata Ruas Jalan bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh	77
Tabel 5. 1	Hasil Pengujian Karakteristik Volumetrik Campuran <i>SMA</i> dengan <i>Filler</i> 50% <i>BA</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	79
Tabel 5. 2	Hasil Pengujian Karakteristik Kekuatan Struktur Campuran <i>SMA</i> dengan <i>Filler</i> 50% <i>BA</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	79
Tabel 5. 3	Hasil Pengujian Karakteristik Durabilitas Campuran <i>SMA</i> dengan <i>Filler</i> 50% <i>BA</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	80
Tabel 5. 4	Hasil Perhitungan Nilai <i>SM</i> Campuran <i>SMA</i> dengan <i>Filler</i> 50% <i>BA</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	80
Tabel 5. 5	Rekapitulasi Perhitungan Repetisi Beban dengan Variasi Metode Pencampuran	81
Tabel 5. 6	Rekapitulasi Perhitungan Prediksi Umur Pelayanan dengan Variasi Metode Pencampuran	82

Tabel 5. 7	Rekapitulasi Analisis Uji Statistik <i>One-Way MANOVA</i> Akibat Pengaruh Variasi Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Volumetrik	82
Tabel 5. 8	Rekapitulasi Analisis Uji Statistik <i>One-Way MANOVA</i> Akibat Pengaruh Variasi Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Kekuatan Struktur	82
Tabel 5. 9	Rekapitulasi Analisis Uji Statistik <i>One-Way MANOVA</i> Akibat Pengaruh Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Durabilitas	83
Tabel 5. 10	Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i> Terhadap Karakteristik Volumetrik	106
Tabel 5. 11	Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i> Terhadap Karakteristik Kekuatan Struktur	106
Tabel 5. 12	Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i> Terhadap Karakteristik Durabilitas	107
Tabel 5. 13	Rekapitulasi Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran Perkerasan <i>SMA</i> dan Prediksi Umur Pelayanan	108

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1	Ilustrasi Metode Pencampuran Satu tahap	22
Gambar 3. 2	Ilustrasi Metode Pencampuran Dua Tahap	23
Gambar 3. 3	Ilustrasi Metode Pencampuran Tiga Tahap	24
Gambar 3. 4	Tampilan Menu Utama Program <i>KENPAVE</i>	45
Gambar 3. 5	Tampilan Beranda <i>Layernip</i>	46
Gambar 3. 6	Menu <i>General</i>	48
Gambar 3. 7	Tampilan <i>Zcoord</i>	49
Gambar 3. 8	Tampilan <i>Layer</i>	50
Gambar 3. 9	Tampilan <i>Interface</i>	51
Gambar 3. 10	Tampilan <i>Moduli</i>	51
Gambar 3. 11	Tampilan <i>Period</i>	52
Gambar 3. 12	Konfigurasi Sumbu Standar	52
Gambar 3. 13	Tampilan Menu <i>Load</i>	53
Gambar 3. 14	<i>Plan View of Multiple Wheels</i>	54
Gambar 3. 15	Tampilan <i>Viskoelastic General</i>	55
Gambar 3. 16	Tampilan <i>Time Durations</i>	56
Gambar 3. 17	Tampilan <i>Viscoelastic Layer</i>	56
Gambar 3. 18	Tampilan <i>Creep Compliance</i> Layer 1	57
Gambar 3. 19	Tampilan <i>Creep Compliance</i> Layer 2	58
Gambar 3. 20	Tampilan <i>Temperature of Each Layer</i>	58
Gambar 4. 1	Kadar KAO dengan Substitusi <i>Filler Bottom Ash</i>	67
Gambar 4. 1	Grafik Gradasi <i>SMA</i> 25 mm	66
Gambar 4. 2	Peta Studi Kasus	76
Gambar 4. 3	Bagan Alir Penelitian	78
Gambar 5. 1	Ilustrasi Tebal Perkerasan	81
Gambar 5. 2	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>VITM</i> Campuran <i>SMA</i>	84

Gambar 5. 3	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>VFWA</i> Campuran <i>SMA</i>	85
Gambar 5. 4	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>VMA</i> Campuran <i>SMA</i>	87
Gambar 5. 5	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>Density</i> Campuran <i>SMA</i>	88
Gambar 5. 6	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>Stability</i> Campuran <i>SMA</i>	90
Gambar 5. 7	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>Flow</i> Campuran <i>SMA</i>	91
Gambar 5. 8	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>MQ</i> Campuran <i>SMA</i>	92
Gambar 5. 9	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>ITS</i> Campuran <i>SMA</i>	94
Gambar 5. 10	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>CL</i> Campuran <i>SMA</i>	95
Gambar 5. 11	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>IRS</i> Campuran <i>SMA</i>	97
Gambar 5. 12	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>TSR</i> Campuran <i>SMA</i>	98
Gambar 5. 13	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>DD</i> Campuran <i>SMA</i>	100
Gambar 5. 14	Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Terhadap Nilai <i>Smix</i> Campuran <i>SMA</i>	102
Gambar 5. 15	Data Repetisi Beban dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran <i>SMA</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	103
Gambar 5. 16	Prediksi Umur Pelayanan dengan Substitusi <i>Filler BA 50%</i> Campuran <i>SMA</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	104

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Pengujian <i>Marshall Standard</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	119
Lampiran 2	Hasil Pengujian <i>Indeks Of Retained Strength (IRS)</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	121
Lampiran 3	Rekapitulasi Hasil Pengujian <i>Indeks Of Retained Strength (IRS)</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	122
Lampiran 4	Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i> Perendaman 0,5 Jam Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	123
Lampiran 5	Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength (ITS)</i> Perendaman 24 Jam Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	124
Lampiran 6	Rekap Hasil Pengujian <i>ITS & TSR</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	125
Lampiran 7	Rekap Hasil Pengujian <i>Cantabro Loss (CL)</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	126
Lampiran 8	Rekap Hasil Pengujian <i>Draindown (DD)</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	127
Lampiran 9	Hasil Pengujian Nilai <i>Stiffness Modulus (SM)</i> Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran	128
Lampiran 10	Data Lalu Lintas Harian (LHR) Ruas Jalan Nasional Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh	129
Lampiran 11	Data Pertumbuhan Lalu Lintas Didapatkan Dari Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Jambi Tahun 2022, 2023, 2024, dan 2025	130
Lampiran 12	Hasil Perhitungan Nilai <i>CESA 4</i> dan <i>CESA 5</i> Berdasarkan Data LHR Ruas Jalan Nasional Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh dan Data Pertumbuhan Lalu Lintas BPS	131
Lampiran 13	Data <i>Properties</i> Material Lapis Perkerasan Dari Bagan 3A - FFF(1) 4	133

Lampiran 14	<i>Output</i> Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan <i>Software KENPAVE</i> Metode Satu Tahap	134
Lampiran 15	<i>Output</i> Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan <i>Software KENPAVE</i> Metode Dua Tahap	145
Lampiran 16	<i>Output</i> Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan <i>Software KENPAVE</i> Metode Tiga Tahap	155
Lampiran 17	Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur Pelayanan Pada Metode Pencampuran Satu Tahap	165
Lampiran 18	Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur Pelayanan Pada Metode Pencampuran Dua Tahap	167
Lampiran 19	Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur Pelayanan Pada Metode Pencampuran Tiga Tahap	169
Lampiran 20	Analisis Statistik <i>One-Way MANOVA</i>	171

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A_0	= Konstanta
A	= persentase agregat kasar (%) / berat piknometer dengan penutup (gr)
a	= persentase aspal terhadap batuan
b	= persentase aspal terhadap campuran (%)
B	= persentase agregat halus (%) / berat piknometer berisi air (gr)
BA	= <i>Bottom ash</i>
c	= Berat benda uji sebelum direndam (gr)
C	= berat piknometer berisi aspal
CL	= Persentase kehilangan Berat (%)
CESAL	= Kumulatif beban sumbu standar ekuivalen selama umur rencana
d	= Berat benda uji dalam keadaan jenuh / SSD (gr)
D (t)	= <i>Creep compliance</i>
D	= berat piknometer berisi air dan aspal
DD	= Persentase aspal yang leleh (%) / Faktor distribusi arah
DL	= Faktor distribusi lajur
e	= Berat dalam air (gr)
e	= Konstanta e
E	= Modulus elastisitas
f	= Volume / isi (cm ³)
F1	= berat jenis agregat kasar
F2	= berat jenis agregat halus
g	= Berat isi sampel / density (gr/cc)
h	= Berat jenis maks. teoritis campuran / tinggi sampel
H0	= Tidak terdapat pengaruh signifikan
H1	= Terdapat pengaruh signifikan
i	= Faktor pertumbuhan lalu lintas (%)
IRS	= <i>Index of Retained Strength</i>

<i>ITS</i>	= <i>Indirect Tensile Strength</i>
KAO	= Kadar Aspal Optimum
LHR	= Lalu lintas harian rerata
LHRJK	= Lintas harian rata – rata tiap jenis kendaraan niaga (satuan kendaraan per hari)
m_1	= berat cetakan (gr)
m_2	= berat cetakan dengan campuran sebelum di oven (gr)
m_3	= berat cetakan dengan campuran setelah di oven (gr)
M_i	= Berat setelah diabrasi (gr)
M_o	= Berat sebelum diabrasi (gr)
<i>MQ</i>	= <i>Marshall Quotient</i> (kg/mm)
n	= Nilai <i>VITM</i>
Nd	= Total nilai repetisi beban yang diperbolehkan untuk mengontrol deformasi (<i>ESAL</i>)
Nf	= Total nilai beban pengulangan yang diperbolehkan untuk mengontrol <i>fatigue cracking</i> (<i>ESAL</i>)
Nr	= Total nilai repetisi beban yang diperbolehkan untuk mengontrol <i>rutting</i> (<i>ESAL</i>)
p	= Pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi proving ring
P_{CA}	= Presentasi fraksi campuran agregat kasar total campuran aspal
P runtuh	= Beban puncak (kg)
P_i	= Penetrasi Awal
P_{ir}	= <i>Recovered Penetration Indeks Asphalt</i>
PLTU	= Pembangkit Listrik Tenaga Uap
P_r	= <i>Recovered Penetration</i> pada saat suhu 25°C
P_s	= Kadar agregat, % terhadap berat beton aspal padat
q	= Nilai Stabilitas
r	= nilai <i>flow</i> (mm).
R	= Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif
s	= Angka koreksi tebal benda uji
S_1	= rata-rata nilai stabilitas <i>Marshall</i> dalam perendaman 0,5 jam (kg)

S_2	= rata-rata nilai stabilitas <i>Marshall</i> dalam perendaman 24 jam (kg)
S_{bit}	= <i>Stiffness Modulus of Bitumen</i> (MPa)
SMA	= <i>Stone Matrix Asphalt</i>
S_{mix}	= <i>Stiffness Modulus of Mixture</i> (MPa)
SNI	= Standar Nasional Indonesia
SSD	= <i>Saturated Surface Dry</i>
T_1	= Rata-rata nilai <i>ITS</i> dalam rendaman 0,5 jam (kPa)
T_2	= Rata-rata nilai <i>ITS</i> dalam rendaman 24 jam (kPa)
t	= Durasi waktu/ Lama pembebanan
T	= Temperatur aspal
τ	= Tegangan (dalam kPa)
VCA	= <i>Void Coarse Aggregate</i>
$VDFJK$	= Faktor ekuivalen beban (<i>VDF</i>) tiap jenis kendaraan niaga
VMA	= Volume pori antara agregat di dalam beton aspal, % dari volume <i>bulk</i> beton aspal padat
VDF	= <i>Vehicle Damage Factor</i>
$VFWA$	= <i>Void Filled With Asphalt</i> (%)
$VITM$	= <i>Void in Total Mix</i> (%)
Y_s	= Berat satuan fraksi agregat kasar dalam <i>dry-roDDed</i> (kg/m ³)
Y_w	= Berat satuan air (kg/m ³), tergantung temperatur pengukuran
ϵ	= Regangan.
ϵ_c	= Regangan tekan vertikal di atas lapisan dasar (cm)
ϵ_c	= Regangan tekan vertikal diatas lapisan dasar (cm)
ϵ_t	= <i>Tensile strain</i> pada lokasi tinjauan kritis yang dihitung atas respon model struktur atau regangan tarik pada bagian bawah lapis permukaan (cm)

ABSTRAK

Peningkatan pertumbuhan ekonomi dan mobilitas masyarakat menyebabkan kebutuhan terhadap pembangunan serta pemeliharaan infrastruktur jalan meningkat. Kondisi tersebut menuntut inovasi penggunaan material, jenis perkerasan, dan metode pencampuran perkerasan yang mampu memberikan kinerja serta umur pelayanan yang baik. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah pemanfaatan limbah *bottom ash* batu bara sebagai substitusi *filler* pada campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Penelitian sebelumnya oleh Rahayu (2024) menunjukkan bahwa penggunaan *filler bottom ash* dengan metode pencampuran satu tahap memiliki kadar optimum 50%. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja campuran *SMA* menggunakan *filler* limbah *bottom ash* dengan kadar yang paling optimum yaitu 50% dengan variasi metode pencampuran serta menganalisis prediksi umur pelayanannya, sehingga diharapkan mendapatkan metode pencampuran yang paling optimal.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental mengacu pada Direktorat Jenderal Bina Marga 2024 dan Direktorat Jenderal Bina Marga 2025. Penelitian ini menggunakan variasi metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap. Adapun digunakan data sekunder dari Rahayu (2024) yaitu data metode pencampuran satu tahap sebagai pembanding metode pencampuran. Pengujian dilakukan terhadap karakteristik volumetrik, kekuatan struktur, durabilitas, dan prediksi umur pelayanan campuran.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh metode pencampuran memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Namun, metode pencampuran tiga tahap menghasilkan kinerja terbaik, dengan distribusi aspal yang lebih merata, komposisi agregat yang lebih padat, dan ketahanan terhadap air dan temperatur yang lebih baik. Dalam analisis prediksi umur layanan, semua metode pencampuran menunjukkan kerusakan awal pada titik deformasi permanen.

Kata Kunci: *Stone Matrix Asphalt (SMA)*, *Bottom ash*, Variasi metode pencampuran

ABSTRACT

Increasing economic growth and public mobility have led to increased demand for road infrastructure development and maintenance. This situation demands innovation in the use of materials, pavement types, and pavement mixing methods that can provide good performance and service life. One possible approach is use coal bottom ash waste as a filler substitute in Stone Matrix Asphalt (SMA) mixtures. Previous research by Rahayu (2024) showed that the optimum content of bottom ash filler using a one-stage mixing method was 50%. Based on this, this study aims to analyze the performance of SMA mixtures using bottom ash waste filler at the optimum content of 50% with various mixing methods and to analyze their predicted service life, thus determining the most optimal mixing method.

The research method used was an experimental method, referring to the Directorate General of Highways 2024 and the Directorate General of Highways 2025. This study used variations of two-stage and three-stage mixing methods. Secondary data from Rahayu (2024), namely data from the one-stage mixing method, was used as a comparison. Tests were conducted on the mixture's volumetric characteristics, structural strength, durability, and predicted service life.

The results showed that all mixing methods met the established specifications. However, the three-stage mixing method performed best due to more even asphalt distribution, denser aggregate composition, and improved resistance to water and temperature. In the service life prediction analysis, all mixing methods exhibited initial failures in the form of permanent deformation.

Keywords: *Stone Matrix Asphalt (SMA), Bottom ash, Mixing method variations*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara dengan proses pembangunan yang berkembang cukup pesat. Pembangunan ini utamanya berada pada sektor infrastruktur yang menjadi tulang punggung pertumbuhan ekonomi dan mobilitas masyarakat. Salah satu kondisi nyata pertumbuhan ekonomi dan mobilitas masyarakat tersebut adalah peningkatan pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur jalan raya yang sangat esensial. Jalan berfungsi sebagai prasarana transportasi utama yang menghubungkan berbagai wilayah. Selain sebagai jalur perpindahan manusia dan barang, jalan juga menjadi indikator terhadap kualitas tata kelola pembangunan negara ini.

Jalan di Indonesia memiliki kondisi yang berbeda-beda. Pada tahun 2024, panjang jalan nasional menurut provinsi di Indonesia adalah 47.604,38 km dengan identifikasi sebesar 41,95% dalam kondisi baik, 53,26% pada kondisi sedang, 3,65% kondisi rusak ringan, dan 1,14 % kondisi rusak berat berdasarkan Badan Pusat Statistik (2025). Kondisi ini menunjukkan tingginya beban lalu lintas pada perkerasan jalan. Kerusakan jalan terbagi dalam berbagai variasi seperti, ada retak kulit buaya, alur, lubang, pelapukan dan lainnya. Dalam menangani kondisi kerusakan pada jalan, diperlukan inovasi teknologi mulai dari perencanaan hingga pelaksanaan konstruksi jalan. Inovasi dalam penyusunan perkerasan ini mencakup dalam beberapa aspek, antara lain jenis campuran perkerasannya, bahan materialnya ataupun metode pencampurannya.

Dalam aspek campuran perkerasan, salah satunya dapat menggunakan campuran perkerasan *Stone Matrix Asphalt (SMA)*. Tayh dan Alghrery (2021) menjelaskan bahwa *SMA* pertama kali dikembangkan di Jerman dan Swedia pada pertengahan tahun 1960-an dengan tujuan menghasilkan lapisan perkerasan yang memiliki ketahanan tinggi terhadap keausan akibat kerusakan deformasi permanen seperti alur. Intarti dkk. (2024) menjelaskan bahwa kelebihan campuran *SMA*

adalah mampu tahan terhadap deformasi dan memiliki daya tahan yang baik, karena adanya struktur kerangka agregat yang kuat dan ruang-ruang kosong yang diisi oleh mastik dengan tingginya kadar aspal. Campuran perkerasan *SMA* telah diteliti oleh Intarti dkk. (2024) dan Ismael dkk. (2022).

Pada aspek bahan material yang ramah lingkungan, dapat diperoleh melalui pemanfaatan limbah. Salah satu limbah yang keberadaannya terus menerus bertambah adalah limbah *Bottom Ash (BA)* yang merupakan abu dasar batu bara. Menurut Phale dan Thakur (2021) *BA* menjadi sasaran tepat untuk menggantikan pasir atau agregat halus dalam konstruksi jalan, baik sebagai pengganti sebagian maupun keseluruhan, karena sifatnya yang mirip dengan pasir alam. Berikut merupakan pengujian terdahulu menggunakan *BA* sebagai bahan material campuran perkerasan antara lain Phale dan Thakur (2021), Zangoeeinia dkk. (2023), Kim dkk. (2024), Rahayu (2024), dan Firdaus dan Firdaus (2025),

Campuran perkerasan *SMA* dengan *BA* sebagai substitusi *filler* menggunakan metode satu tahap menunjukkan nilai optimum substitusi *filler BA* pada kadar 50% oleh Rahayu (2024). Penelitian ini mengembangkan penggunaan campuran perkerasan *SMA* dengan kadar *filler BA* 50% berdasarkan metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap untuk mendapatkan metode pencampuran yang paling optimal pada substitusi kadar *filler* yang paling optimum. efektivitas penggabungan agregat dan bitumen menjadi faktor penting dalam metode pencampuran, terutama terkait homogenitas dan kemungkinan segregasi menurut Yaro, dkk. (2021). Dalam metode pencampuran bertahap, *pre-coating* agregat kasar dengan kondisi Kadar Aspal Optimum (KAO) yang sesuai dengan bahan ikat aspal dicampur dengan agregat halus dan *filler*. Tujuan dari metode pencampuran bertahap ini mengurangi kemungkinan agregat terlepas akibat kelembaban dan memperkuat adhesi aspal terhadap agregat sehingga menghasilkan campuran aspal yang memiliki distribusi rongga yang rata dan mudah dipadatkan menurut Iqbal dan Fauziah (2023).

Hasil dari campuran *SMA* berbahan material *BA* dengan variasi metode pencampuran dapat dieksploitasi lebih lanjut terhadap prediksi umur pelayanan perkerasan. Analisis umur pelayanan salah satunya dapat dengan pemodelan viskoelastik menggunakan *software* program *KENPAVE*. Hadi dan Fauziah (2022)

menjelaskan penerapan perkerasan jalan dengan gradasi *Superpave* dapat meningkatkan kinerja perkerasan terhadap beban kendaraan dan kondisi lingkungan. Temuan ini perlu dilakukan perbedaan kinerja antara kedua jenis perkerasan tersebut untuk mendapatkan pembuktian secara detail terhadap hasil. Iqbal dan Prihutomo (2025) menjelaskan bahwa *KENPAVE* merupakan sebuah program aplikasi yang berfungsi mendapatkan regangan dan tegangan perkerasan jalan dalam waktu tertentu.

Pada penelitian ini, berdasarkan yang telah disampaikan akan digabungkan berupa *BA* sebagai bahan materialnya yang akan digunakan sebagai *filler*, metode pencampuran yang digunakan dua tahap dan tiga tahap, campuran perkerasan yang digunakan adalah *SMA*, dan hasil dari campuran ini akan diprediksi umur pelayanannya dengan pemodelan viskoelastik menggunakan *software KENPAVE*. Penelitian ini dilengkapi dengan penelitian terhadap berbagai karakteristik, antara lain karakteristik volumetrik campuran yaitu *Void in the Total Mix (VITM)*, *Void Filled With Asphalt (VFWA)*, *Void in Mineral Aggregate (VMA)*, dan *density*, lalu karakteristik kekuatan struktur yaitu stabilitas (*stability*), kelelahan (*flow*), *Marshall Quotient (MQ)*, *Indirect Tensile Strength (ITS)*, dan *Cantabro Loss (CL)*. Terakhir karakteristik durabilitas campuran aspal antara lain *Index of Retained Strength (IRS)*, *Tensile Strength Ratio (TSR)*, dan *Draindown (DD)*. Sehingga, pada kondisi ini penelitian yang ingin dituju akan lebih spesifik sebagai pedoman dan pemanfaatan sebagainya.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dikehendaki dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik volumetrik ?
2. Bagaimana pengaruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik kekuatan struktur ?
3. Bagaimana pengaruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik durabilitas ?

4. Bagaimana pengaruh metode variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik *Stiffness Modulus*?
5. Bagaimana prediksi umur pelayanan dengan analisis menggunakan *KENPAVE* pada variasi metode pencampuran dari penggunaan *filler BA* dalam campuran *SMA*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang dikehendaki dalam penelitian ini merupakan sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik volumetrik.
2. Mengetahui pengaruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik kekuatan struktur.
3. Mengetahui pengaruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik durabilitas.
4. Mengetahui pengaruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA*, terhadap karakteristik *Stiffness Modulus*.
5. Mengetahui prediksi umur pelayanan dengan analisis menggunakan *KENPAVE* pada variasi metode pencampuran dari penggunaan *filler BA* dalam campuran *SMA*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dikehendaki berdasarkan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui metode campuran paling optimal yang digunakan dalam campuran *SMA*.
2. Mengembangkan teknologi dan kualitas campuran *SMA* dengan meningkatkan nilai guna limbah *BA*, sehingga mengurangi potensi pencemaran lingkungan.
3. Mengetahui analisis umur pelayanan perkerasan dari penggunaan *filler BA* batu bara terhadap campuran perkerasan *SMA*.

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut di bawah ini.

1. Campuran yang digunakan dalam penelitian merupakan *SMA* Kasar, sesuai dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025.
2. Bahan ikat dalam penelitian menggunakan aspal pen 60/70.
3. Bahan utama campuran perkerasan yaitu agregat kasar dan agregat halus diperoleh dari Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, yang berasal dari sumber yang sama dengan Rahayu (2024).
4. Material *filler* pada penelitian ini merupakan limbah *BA*, menggunakan kadar substitusi paling optimal yaitu 50% yang bersumber dari sumber yang sama dengan Rahayu (2024). Penelitian ini tidak melakukan uji kandungan unsur mineral dan kimiawi pada limbah *BA*.
5. Penelitian ini tidak menguji sifat fisik agregat (berat jenis, penyerapan air, analisa saringan, kelekatan agregat, *sand equivalent*, dan abrasi), sifat fisik *filler* (berat jenis), dan sifat fisik aspal (berat jenis, daktilitas, penetrasi, kelarutan, titik lembek, titik nyala dan titik bakar) dikarenakan mengacu data pada penelitian Rahayu (2024).
6. Serat selulosa yang digunakan adalah Viatop⁶⁶ dan tidak menguji unsur mineral ataupun kimia dari serat selulosa Viatop⁶⁶.
7. Kadar aspal yang digunakan adalah KAO sebesar 6,4% berdasarkan Rahayu (2024).
8. Tinjauan pengujian ini terhadap karakteristik volumetrik campuran adalah *VITM*, *VFWA*, *VMA*, dan *density*.
9. Tinjauan pengujian ini terhadap karakteristik kekuatan struktur adalah *stability*, *flow*, *MQ*, *ITS* dan *CL*.
10. Tinjauan pengujian ini terhadap karakteristik durabilitas campuran aspal adalah *IRS*, *TSR*, dan *DD*.
11. Metode pencampuran yang digunakan dalam pengujian ini adalah metode pencampuran dua tahap, dan metode pencampuran tiga tahap. Untuk data

metode pencampuran satu tahap (*stability, flow, MQ, ITS, CL, VITM, VFWA, VMA, density, DD, TSR* dan *IRS*) sebagai pembanding berpedoman pada Rahayu (2024).

12. Penelitian ini mengacu pada Direktorat Jenderal Bina Marga 2024 untuk analisis tebal perkerasan.
13. Penelitian ini mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 untuk pengujian perkerasan.
14. Data LHR digunakan adalah LHR Tahun 2024 pada ruas jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab Sarolangun – Pauh yang didapatkan dari Balai Pelaksanaan Jalan Nasional (BPJN) Jambi.
15. Data pertumbuhan lalu lintas didapatkan dari Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Jambi, Kabupaten Sarolangun tahun 2022, 2023, 2024, dan 2025.
16. Penelitian ini menggunakan analisis dengan *software KENPAVE* melalui pemodelan viskoelastik.
17. Penelitian dan pengujian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kinerja Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Intarti, dkk. (2024) sudah melakukan riset mengenai kinerja *SMA* menggunakan serat selulosa Eceng Gondok (EG). Tujuan penelitian ini adalah agar dapat mengetahui pengaruh penambahan serat selulosa alami EG pada *SMA*. Campuran ini menggunakan aspal pen 60/70. Kadar aspal yang digunakan antara lain 5,5%, 6%, 6,5%, 7% dan 7,5% dengan EG sebesar 0%, 0,2%, 0,3%, dan 0,5%. Penelitian ini menunjukkan serat selulosa EG memenuhi kriteria dari Spesifikasi Bina Marga 2018. Untuk itu EG bermanfaat dalam mengatasi *bleeding* yang berperan sebagai serat selulosa untuk menahan deformasi.

Studi mengenai karakteristik deformasi permanen *SMA* diperkuat oleh berbagai jenis serat sudah dilaksanakan oleh Ismael dkk. (2022). Tujuan dari penelitian ini adalah mengevaluasi penggunaan berbagai macam serat alami dan sintesis, dipadukan dengan kadar nilai panjang yang berbeda-beda untuk menghasilkan campuran *SMA* yang baik. Aspal yang digunakan dalam campuran ini adalah aspal dengan kadar 40/50. Serat yang digunakan adalah serat goni, poliester, dan karbon dalam jumlah dan panjang yang bervariasi. Pengujian yang dilakukan antara lain *MQ*, *DD*, dan *Wheel Tracking Test (WHT)*. Berdasarkan hasil dan pembahasan, Serat karbon (kadar 0,5% dan panjang 7,5 mm) menunjukkan peningkatan paling signifikan (peningkatan 53%), kemudian serat poliester 42% dan serat goni 34%.

2.2 Kinerja Penggunaan *Filler Bottom Ash (BA)* Terhadap Campuran Perkerasan

Filler merupakan bagian dari campuran perkerasan yang berfungsi meningkatkan ikatan bitumen dan agregat. *Filler* merupakan unsur penting dalam kinerja dan daya tahan campuran perkerasan. Penggunaan *filler* yang baik dapat memperpanjang umur perkerasan serta meningkatkan karakteristik campuran aspal. Hal itu semua selaras dengan penelitian Zangooinia dkk. (2023). *Filler* yang akan

digunakan pada penelitian ini berupa substitusi dengan *BA* yang lolos saringan no.200.

Phale dan Thakur (2021) telah melakukan penelitian mengenai perbandingan bitumen yang dimodifikasi dengan *BA* untuk konstruksi jalan di India. Penelitian tersebut bertujuan untuk memanfaatkan limbah *BA* menjadi bagian dari perkerasan jalan. Penggunaan *filler BA* dapat juga memberikan daya dukung memadai pada aplikasi kekuatan yang lebih rendah, misalnya *sub-base*. untuk meningkatkan kinerja perkerasan rekomendasi penggunaan *BA* adalah 2:1 dibandingkan dengan bahan dasar aslinya. Pembuatan bitumen modifikasi menggunakan 8%, 10%, 12% *BA* dengan kadar aspal 4,5%, 5%, 4,8%, dan 4,5%. Pengujian yang dilakukan menggunakan stabilitas *Marshall*. Hasilnya, penggunaan substitusi 12% *BA* memberikan stabilitas tinggi sebesar 11,57 lebih tinggi dibandingkan substitusi pada kadar 10% dan 8%.

Telah dilakukan studi tentang kinerja *BA* yang dihancurkan sebagai pengisi dalam campuran beton aspal yang dimodifikasi polimer oleh Kim dkk. (2024). Tujuan dari penelitian tersebut untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan *BA* yang dihancurkan sebagai pengisi dalam campuran beton aspal atau *asphalt concrete mixtures* yang dimodifikasi polimer. Substitusi *BA* yang digunakan adalah 0%, 25%, 50%, dan 75%. Campuran aspal dikembangkan melalui *Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)* yaitu pengikat yang dimodifikasi karet remah dari aspal dan proporsi tertentu yang dipilih. Pengujian yang dilakukan antara lain *ITS*, *dynamic modulus test*, *CL*, *Hamburg Wheel Tracking (HWT)*, dan *TSR*. Desain campuran pada penelitian ini menggunakan campuran *Superpave*. Pada uji *ITS* menyatakan kadar *BA* 25% paling baik sebesar 0,87 Mpa. Pada uji *Four-Point Bending Beam* substitusi 25% memberikan keunggulan ringan dengan memperhatikan kekakuan yang lebih stabil dengan jangka waktu yang lama. Pada uji *CL* substitusi 25% tahan pada abrasi dan mempertahankan kinerjanya dan mengalami pelonggaran sebesar 6,55%. Pada uji *dynamic modulus test* substitusi 25% memberikan kinerja yang unggul. Pada uji *HWT* substitusi 25% tidak menunjukkan adanya pengelupasan dengan kadar sebesar 7,56 mm setelah 20 siklus. Pada uji *TSR* substitusi 25%

menunjukkan nilai *TSR* lebih tinggi pada setiap tahap dibanding dengan substitusi kapur.

Penelitian mengenai studi mengenai manfaat limbah *BA* sebagai *filler* dan pengaruh kehalusan pada campuran lapis aus *AC-WC* oleh Firdaus dan Firdaus (2025). Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui karakteristik *BA* sehingga dapat dimanfaatkan menjadi *filler* pada campuran perkerasan lentur dan memanfaatkan pengolahan limbah. Pengujian dilakukan dengan parameter *Marshall*. Substitusi *BA* yang digunakan berada pada kadar normal, 1%, 2%, 3%, dan 4%. Hasil penelitian ini menunjukkan kadar 4 % memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 dengan nilai stabilitas sebesar 1.4999kg. nilai kepadatan optimum dengan kadar 2.352 kg, dan nilai *Marshall* optimum dengan kadar 91.84%.

Penelitian mengenai pemanfaatan limbah *bottom ash* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap karakteristik campuran *SMA* telah diteliti oleh Rahayu (2024). Penelitian tersebut menggunakan *BA* sebagai *filler* pada campuran *SMA*, menggunakan metode satu tahap. Tujuan dari penelitian tersebut untuk mengetahui pengaruh pemakaian limbah *BA* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap kekuatan struktur pada campuran *SMA*, mengetahui pengaruh pemakaian limbah *BA* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap parameter volumetrik pada campuran *SMA*, dan mengetahui pengaruh pemakaian limbah *BA* batu bara sebagai *filler* pengganti terhadap durabilitas pada campuran *SMA*. Hasilnya nilai stabilitas, *IRS*, *CL* dan *MQ* menunjukkan daya tahan yang baik pada kadar 50%, penurunan terendah *flow* pada kadar 50%, nilai *ITS*, *VMA*, *VITM*, dan *TSR* naik seiring bertambahnya kadar substitusi *filler*; dan nilai *VFWA*, *DD* dan *density* turun seiring bertambahnya substitusi *filler*. Penelitian ini merekomendasikan hingga 50% untuk campuran yang baik.

2.3 Kinerja Variasi Metode Pencampuran Terhadap Campuran Perkerasan

Iqbal dan Fauziah (2023) sudah menjalankan studi terkait eksperimental penggunaan bahan tambah limbah ban karet dengan metode pencampuran dua tahap terhadap campuran *Hot Rolled Sheet-Wearing Course (HRS-WC)*. Tujuan penelitian tersebut adalah analisis bahan tambah Ban Karet (BK) dengan metode

pencampuran satu tahap dan metode pencampuran dua tahap. Aspal yang digunakan adalah aspal Pen 60/70. Pada pengujian *MS* metode campuran dua tahap lebih tinggi nilainya pada stabilitas, *MQ*, *VITM*, *VFWA*, *VMA*, dan *density*. Untuk *flow* lebih tinggi menggunakan metode pencampuran satu tahap dengan kadar aspal yang sama. Pada pengujian *IRS* metode pencampuran dua tahap memiliki nilai yang lebih tinggi yaitu sebesar 93,84% dibanding dengan metode pencampuran satu tahap sebesar 91,22% pada kadar 6%. Pengujian *ITS*, *TSR*, *CL*, dan *AFD* juga memperoleh metode pencampuran dua tahap lebih unggul.

Aspek mengenai evaluasi kinerja campuran *SMA* menggunakan metode pencampuran satu tahap dan dua tahap telah dilakukan oleh Yaro, dkk. (2021). Tujuan dari penelitian tersebut untuk mengevaluasi pengaruh metode pencampuran terhadap *SMA* yang diperkuat menggunakan *Waste Palm Fiber (WPOF)* atau limbah serat kelapa sawit. Aspal yang digunakan adalah aspal pen 60/70 dengan metode desain campuran *Marshall*. Hasilnya campuran dua tahap memiliki variasi *VITM* yang lebih sedikit. Pada pengujian *VMA*, campuran dua tahap menunjukkan nilai *VMA* yang lebih rendah dibanding dengan metode pencampuran satu tahap. Begitu pun pada pengujian *Marshall* dan yang lain, didapatkan metode pencampuran dua tahap memiliki nilai yang lebih baik. Maka dapat disimpulkan bahwa kinerja aspal dengan metode pencampuran dua tahap lebih unggul dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap.

2.4 Prediksi Umur Pelayanan dengan Program *KENPAVE*

Hadi dan Fauziah (2022) sudah melakukan penyelidikan tentang studi komparasi prediksi umur pelayanan antara campuran *Superpave* dan *AC-WC* menggunakan pemodelan viskoelastik dan *elastic*. Campuran perkerasan yang digunakan adalah *Superpave* dan *AC-WC*. Studi kasus penelitian ini berada pada ruas Jalan Padjajaran, Yogyakarta Hasil penelitian menunjukkan campuran perkerasan *Superpave* dominasi yang lebih kecil, yaitu 7,5% pada alternatif 1 dengan pemodelan viskoelastik, 6,4% pada alternatif 1 dengan pemodelan elastik, 21,8% pada alternatif 2 dengan pemodelan viskoelastik, dan 4,2% pada alternatif 2

dengan pemodelan elastik. Maka campuran *Superpave* memiliki umur rencana yang lebih panjang dibanding dengan *AC-WC*.

Studi tentang analisis *KENPAVE* pada perkerasan lentur menggunakan metode AASHTO 1993 dan MDP 2017 telah dijalankan oleh Iqbal dan Prihutomo (2025). Selain menentukan tebal perkerasan lentur, penelitian ini meneliti perkerasan terhadap lelah (*fatigue*) dan *rutting*. Lokasi penelitian ini dilakukan pada Ruas Jalan Tol Jakarta-Bogor-Ciawi (Jagorawi) KM 10 s.d. KM 21. Dengan metode AASHTO 1993 menunjukkan nilai repetisi beban tebal perkerasan lentur untuk kerusakan retak lelah sebesar 10.355.202,44 dan untuk retak alur 7.083.875,27, yang melebihi beban rencana sehingga mampu menahan kedua jenis kerusakan. Sisa umur layan tercatat 65,52% untuk retak lelah dan 49,60% untuk retak alur. Sementara itu, metode MDP 2017 menghasilkan nilai repetisi beban untuk retak lelah 185.121.576,79 dan untuk retak alur 90.849.794,70, yang juga melampaui beban rencana, menunjukkan kemampuan menahan kerusakan. Sisa umur layan adalah 90,9% untuk retak lelah dan 81,46% untuk retak alur.

2.5 Perbandingan Penelitian Terdahulu Terhadap Campuran Aspal

Perbandingan penelitian sebelumnya dan yang akan dilakukan terlihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Terhadap Campuran Aspal

Aspek	Penelitian Terdahulu								Penelitian Saat Ini
	Firdaus dan Firdaus (2025)	Kim dkk. (2024)	Rahayu (2024)	Yaro dkk. (2021)	Iqbal dan Fauziah (2023)	Ismael dkk. (2022)	Hadi dan Fauziah (2022)	Iqbal dan Prihutomo (2025)	Damayanti (2026)
Judul	Pemanfaatan Limbah Batu Bara (<i>Bottom Ash</i>) Sebagai <i>Filler</i> Dan Pengaruh Kehalusan Pada Campuran Lapis Aus <i>Ac – Wc</i>	<i>Advancing Sustainability And Performance With Crushed Bottom Ash As Filler In Polymer-Modified Asphalt Concrete Mixtures</i>	Pemanfaatan Limbah <i>Bottom Ash</i> Batu Bara Sebagai <i>Filler</i> Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	<i>Performance Evaluation Of Waste Palm Oil Fiber Reinforced Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Traditional And Sequential Mixing Processes</i>	Studi Eksperimental Penggunaan Bahan Tambah Limbah Ban Karet Dengan Metode Pencampuran Bertahap Terhadap Kinerja Campuran <i>Hot Rolled Sheet-Wearing Course</i>	<i>Permanent Deformation Characterization Of Stone Matrix Asphalt Reinforced By Different Types Of Fibers</i>	Studi Komparasi Prediksi Umur Pelayanan Antara Campuran <i>Superpave</i> dan <i>AC-WC</i> Menggunakan Pemodelan Viskoelastik dan Elastic	Analisis Program <i>KENPAVE</i> Pada Perancangan Perkerasan Lentur Metode AASHTO 1993 dan MDP 2017	Analisis Perkerasan <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> dengan <i>Filler Bottom Ash</i> Batu Bara Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dan Prediksi Umur Pelayanan

Sumber : Yaro dkk. (2021), Ismael dkk. (2022), Hadi dan Fauziah (2022), Iqbal dan Fauziah (2023), Kim dkk. (2024) Iqbal dan Prihutomo (2025), Firdaus dan Firdaus (2025), dan Damayanti (2026)

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Terhadap Campuran Aspal

Aspek	Penelitian Terdahulu								Penelitian Saat Ini
	Firdaus dan Firdaus (2025)	Kim dkk. (2024)	Rahayu (2024)	Yaro dkk. (2021)	Iqbal dan Fauziah (2023)	Ismael dkk. (2022)	Hadi dan Fauziah (2022)	Iqbal dan Prihutomo (2025)	Damayanti (2026)
Jenis Campuran	<i>AC-WC</i>	<i>Superpave</i>	<i>SMA</i>	<i>SMA</i>	<i>HRS-WC</i>	<i>SMA</i>	<i>Superpave</i> dan <i>AC-WC</i>	<i>Flexible Pavement</i>	<i>SMA</i>
Metode	Satu tahap	Satu tahap	Satu tahap	Satu tahap dan dua Tahap	Satu tahap dan dua tahap	Satu tahap	<i>Software KENPAVE</i>	<i>Software KENPAVE</i>	dua tahap, tiga tahap, dan <i>Software KENPAVE</i>
Bahan yang Digunakan	<i>BA</i>	<i>BA</i>	<i>BA</i>	<i>WPOF</i>	BK	serat goni, poliester, dan karbon	-	-	<i>BA</i>
Pengujian	Parameter Marshall	lain <i>ITS</i> , <i>dynamic modulus test</i> , <i>Cb</i> , <i>Hamburg Wheel Tracking (HWT)</i> , dan <i>TSR</i> .	<i>stability</i> , <i>flow</i> , <i>MQ</i> , <i>ITS</i> , <i>CL</i> , <i>VITM</i> , <i>VFWA</i> , <i>VMA</i> , <i>density</i> , <i>VCA</i> , <i>IRS</i> , <i>TSR</i> , dan <i>DD</i>	<i>Marshall</i> , <i>DD</i> , <i>Active and passive adhesion assessment</i> , <i>Moisture susceptibility test</i> , dan <i>Cb</i> , <i>Stiffness modulus</i>	<i>Marshall</i> , <i>IRS</i> , <i>ITS</i> , <i>TSR</i> , <i>CL</i> , dan <i>Asphalt Flow Down (AFD)</i> ,	<i>MQ</i> , <i>DD</i> , dan (<i>WHT</i>).	<i>Sbit</i> dan <i>Smix</i>	-	karakteristik volumetrik, kekuatan struktur, durabilitas, <i>stiffness modulus</i> , dan prediksi umur pelayanan

Sumber : Yaro dkk. (2021), Ismael dkk. (2022), Hadi dan Fauziah (2022), Iqbal dan Fauziah (2023), Kim dkk. (2024) Iqbal dan Prihutomo (2025), Firdaus dan Firdaus (2025), dan Damayanti (2026)

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Terhadap Campuran Aspal

Aspek	Peneliti Terdahulu								Penelitian Saat Ini
	Firdaus dan Firdaus (2025)	Kim dkk. (2024)	Rahayu (2024)	Yaro dkk. (2021)	Iqbal dan Fauziah (2023)	Ismael dkk. (2022)	Hadi dan Fauziah (2022)	Iqbal dan Prihutomo (2025)	Damayanti (2026)
Hasil	Kadar 4 % memenuhi spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2 dengan nilai stabilitas sebesar 1.4999kg. nilai kepadatan optimum dengan kadar 2.352 kg. nilai <i>Marshall</i> optimum dengan kadar 91.84%.	Pada uji <i>ITS</i> , <i>Four-Point Bending Beam</i> , <i>Cb</i> , <i>dynamic modulus test</i> , HWT, dan <i>TSR</i> substitusi 25% memberikan kinerja yang unggul.	stabilitas, <i>IRS</i> , <i>CL</i> dan <i>MQ</i> baik pada <i>BA</i> 50%, penurunan terendah <i>flow</i> pada kadar 50%, nilai <i>ITS</i> , <i>VMA</i> , <i>VITM</i> , dan <i>TSR</i> naik seiring naiknya substitusi <i>filler</i> , dan nilai <i>VFWA</i> , <i>DD</i> , <i>density</i> turun seiring kurangnya substitusi <i>filler</i> . Direkomendasikan hingga 50% <i>filler</i>	bahwa kinerja aspal dengan metode pencampuran dua tahap lebih unggul dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap.	Pada pengujian <i>IRS</i> , <i>ITS</i> , <i>TSR</i> , <i>Cantabro Loss (CL)</i> , dan <i>Asphalt Flow Down (AFD)</i> juga metode pencampuran dua tahap memiliki nilai yang lebih dibanding dengan metode pencampuran satu tahap	Berdasarkan hasil dan pembahasan, Serat karbon (kadar 0,5% dan panjang 7,5 mm) menunjukkan peningkatan paling signifikan (peningkatan 53%), kemudian serat polyester 42% dan serat goni 34%.	Campuran <i>Superpave</i> memiliki umur rencana yang lebih panjang dibanding dengan <i>AC-WC</i> .	Sisa umur layan adalah 90,9% untuk retak lelah dan 81,46% untuk retak alur.	Metode pencampuran tiga tahap menunjukkan kinerja paling optimal dibanding metode lainnya dalam aspek volumetrik, kekuatan struktur, durabilitas, <i>stiffness</i> , dan umur pelayanan, karena menghasilkan campuran homogen, padat, dan tahan terhadap beban.

Sumber : Yaro dkk. (2021), Ismael dkk. (2022), Hadi dan Fauziah (2022), Iqbal dan Fauziah (2023), Kim dkk. (2024) Iqbal dan Prihutomo (2025), Firdaus dan Firdaus (2025), dan Damayanti (2026)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Jalan Lentur

Perkerasan jalan terbagi dalam perkerasan jalan lentur (*flexible pavement*), perkerasan jalan kaku (*rigid pavement*) dan perkerasan komposit (*composite pavement*). Hal yang mendasari perbedaan dalam perkerasan jalan adalah perkerasan lentur menggunakan bahan pengikat aspal, perkerasan kaku menggunakan bahan pengikat semen, dan perkerasan komposit merupakan gabungan dari keduanya.

Perkerasan lentur merupakan suatu struktur elastis berlapis yang bertumpu pada tanah dasar (*subgrade*) dan fondasi alami, yang dibangun untuk memudahkan laju lalu lintas menurut Singh dan Sahoo (2021). Struktur perkerasan lentur di antaranya sebagai berikut.

1. Lapisan permukaan (*Surface Course*)

Lapis permukaan ini terdiri dari suatu campuran mineral agregat dengan bahan pengikat. Bahan pengikat tersebut berada pada lapisan fondasi paling atas.

2. Lapisan fondasi atas (*Base Course*)

Lapis Fondasi Atas (LFA) merupakan bagian struktur perkerasan jalan yang terletak di bawah *surface course*. Jika ditemukan suatu perkerasan jalan tidak memiliki Lapis Fondasi Bawah (LFB), maka LFA diletakan langsung di *subgrade*.

3. Lapisan fondasi bawah (*Sub Base Course*)

Lapis Fondasi Bawah (LFB) merupakan lapisan fondasi paling bawah antara LFA dan *subgrade*.

4. Lapisan tanah dasar (*Subgrade*)

Subgrade merupakan tanah dasar suatu perkerasan jalan lentur.

3.2 Material Penyusun Perkerasan Lentur

Pemilihan material penyusun perkerasan lentur perlu diidentifikasi dengan cermat sebelum diaplikasikan pada praktik konstruksi di lapangan. Tahapan ini krusial karena berperan penting dalam segi kualitas dan kinerja akhir dari perkerasan jalan. Untuk itu, diperlukan analisis terhadap sifat-sifat aspal, agregat, *filler*, dan material tambahan menjadi prasyarat mutlak untuk mencapai tujuan perancangan konstruksi. Berikut merupakan material penyusun perkerasan lentur.

3.2.1 Aspal

Aspal didefinisikan sebagai cairan termoplastik viskoelastik berwarna coklat tua hingga hitam yang digunakan di seluruh dunia (Mohammed dkk., 2021). Aspal bersumber dari pengendapan organisme, alga mikroskopis, dan organisme lain. Proses pengendapan menghasilkan residu yang dimurnikan secara halus melalui distilasi minyak mentah. Sifat aspal adalah kemampuannya untuk mencair pada suhu tinggi dan memadat pada suhu ruang. Berikut merupakan jenis aspal dari tempat diperolehnya menurut Setiowati dan Putra (2023).

1. Aspal alam

Aspal alam merupakan jenis aspal yang diperoleh dari alam. Aspal jenis ini dapat dipakai apa adanya atau hanya memerlukan pengolahan sederhana. Salah satu contoh aspal alam yang terkenal di Indonesia adalah Aspal Buton (Asbuton). Asbuton adalah batuan alam yang memiliki kandungan bitumen di dalamnya. Asbuton berupa campuran alami antara bitumen dengan material mineral keras dalam bentuk batuan sedimen dengan kadar bitumen pada asbuton sangat bervariasi.

2. Aspal minyak

Aspal minyak bumi merupakan produk residu dari distilasi minyak bumi dengan beragam residu yang dihasilkan. antara lain adalah sebagai berikut.

- a. *asphaltic base crude oil* yang kaya akan aspal
- b. *paraffin base crude oil* yang sebagian besar terdiri dari parafin,
- c. *mixed base crude oil* yang mengandung campuran aspal dan parafin.

Aspal padat (*asphalt cement*) berbentuk padat hingga semi-padat pada suhu ruangan dan hanya mencair ketika dipanaskan. Aspal cair (*cutback asphalt*)

berbentuk cair karena adanya bahan pencair melalui penyulingan minyak bumi. Aspal emulsi (*emulsified asphalt*) terbentuk dari campuran air dan bahan pengemulsi. Berikut merupakan ketentuan untuk aspal keras dapat dilihat pada Tabel 3. 1.

Tabel 3. 1 Ketentuan Untuk Aspal Keras

No.	Sifat-sifat	Metode Pengujian	Tipe I Aspal Pen 60/70
1	Penetrasi pada 25° C (0,1 mm)	SNI 2456:2011	60-70
2	Titik Lembek (°C)	SNI 2434:2011	≥ 48
3	Daktilitas pada 25°C (cm)	SNI 2432:2011	≥ 100
4	Titik Nyala (°C)	SNI 2433:2011	≥ 232
5	Kelarutan dalam <i>Trichloroethylene</i> (%)	SNI 2438:2015	≥ 99
6	Berat Jenis	SNI 2441:2011	≥ 1

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3.2.2 Agregat

Agregat merupakan butiran padatan mineral seperti batu pecah, kerikil, pasir alam, maupun *filler*. Agregat memiliki ukuran yang bervariasi dari kasar hingga sangat halus. Keberadaan agregat tidak sekadar sebagai pengisi volume, melainkan berperan krusial dalam memberikan kekakuan, ketahanan menahan beban lalu lintas, mengurangi potensi penyusutan campuran, serta meningkatkan daya tahan keseluruhan perkerasan. Keberhasilan campuran aspal sangat bergantung pada kualitas agregat itu sendiri. Agregat harus memiliki ketahanan tinggi terhadap keausan (abrasi) dan memiliki gaya *interlocking* yang kuat agar tidak mudah pecah. Ketahanan tersebut menjadikan agregat mampu mencegah disintegrasi partikel selama proses pelaksanaan maupun saat terkena beban berulang. Beberapa jenis agregat menurut ukuran butirannya adalah sebagai berikut.

1. Agregat kasar

Agregat kasar merupakan agregat yang tertahan ayakan No. 4 (4,75 mm) baik dikerjakan secara basah dan terbebas dari kotoran. Berdasarkan Bulgis dan Alkam (2017), agregat kasar berfungsi sebagai stabilitas dan perlawanan terhadap gesekan pada lapisan perkerasan. Agregat kasar harus memiliki bentuk yang baik, yaitu bersih, bersudut bebas, dan terbebas dari kotoran. Bentuk tersebut diharapkan agar membuat *interlocking* dalam campuran perkerasan. Agregat kasar harus memenuhi ketentuan tabel Tabel 3. 2 berikut.

Tabel 3. 2 Ketentuan Agregat Kasar

Sifat-Sifat			Metode pengujian	Persyaratan
Kekekalan		Natrium sulfat	SNI 3407:2008	Maks. 12%
		Magnesium sulfat		Maks. 18%
Abrasi dengan mesin <i>Los Angeles</i>	Campuran AC Modifikasi dan <i>SMA</i>	100 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 6%
		500 putaran		Maks. 30%
	Semua jenis campuran beraspal bergradasi lainnya	100 putaran		Maks. 8%
		500 putaran		Maks. 40%
Kelekatan agregat terhadap aspal			SNI 2439:2011	Min. 95%
Butir Pecah pada Agregat Kasar		<i>SMA</i>	SNI 7619:2012	100/90 *)
		Lainya		95/90 **)
Partikel Pipih dan Lonjong		<i>SMA</i>	SNI 8287:2016	Maks. 5%
		Lainya	Perbandingan 1:5	Maks. 10%
Material lolos ayakan No. 200			SNI ASTM C117:2012	Maks 1%

Catatan:

*) 100/90 menunjukkan bahwa 100% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah 1 (satu) atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah 2 (dua) atau lebih.

**) 95/90 menunjukkan bahwa 95% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah 1 (satu) atau lebih dan 90% agregat kasar mempunyai muka bidang pecah 2 (dua) atau lebih.

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

2. Agregat halus

Agregat halus merupakan agregat yang lolos ayakan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan ayakan No. 200 (75 mikron). Agregat halus berperan strategis dalam meningkatkan kualitas campuran dengan mengisi rongga partikel antar agregat kasar, membuat ukuran partikel dalam campuran bervariasi. Jika campuran hanya terdapat satu ukuran partikel, maka rongga dalam campuran cukup besar. Untuk itu, diperlukan partikel kecil yaitu agregat halus agar meminimalkan *void* dan meningkatkan homogenitas material secara signifikan sehingga menghasilkan campuran optimal, menurut Hujiyanto, dkk. (2024). Ketentuan agregat halus dapat dilihat pada Tabel 3. 3.

Tabel 3. 3 Ketentuan Agregat Halus

Sifat- sifat		Metode Pengujian	Persyaratan
Nilai Setara Pasir		SNI 03-4428-1997	Min. 60%
<i>Methylene Blue Value</i> ⁽¹⁾	(MB) : fraksi 0/2mm	ASTM C837-09(2019)	≤ 2
	(MB _F) : fraksi 0/0,125mm		≤ 10
Uji Kadar Rongga Tanpa Pemadatan		SNI 03-6877-2002	Min. 45
Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat		SNI 03-4141-1996	Maks. 1%
Agregat Lolos Ayakan No. 200		SNI ASTM C117: 2012	Maks. 10%

Catatan: (1): Agregat halus yang berasal dari batu kapur (*limestone*) dengan *Methylene Blue Value* (MB_F) di luar ketentuan Tabel 6.3.2.2) dapat diterima asalkan agregat halus tersebut bebas dari fraksi lempung sesuai dengan SNI 3423:2008.

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3. Bahan pengisi (*Filler*)

Filler merupakan partikel yang lolos ayakan No. 200 (75 mikron). *Filler* dapat berupa debu batu kapur, limbah *BA*, magnesium dan sebagainya. *Filler* memiliki fungsi mengurangi rongga (*void*) dengan cara mengisi rongga dalam butiran agregat kasar.

3.2.3 Gradasi Agregat

Gradasi agregat gabungan dalam campuran perkerasan jalan dinyatakan dalam bentuk persen dari berat agregat dan *filler*. Rancangan dan perbandingan campuran gradasi agregat harus memenuhi persyaratan pada Tabel 3. 4.

Tabel 3. 4 Amplop Gradasi Agregat Gabungan Untuk Campuran Beraspal

Ukuran Ayakan		% Berat yang Lolos terhadap Total Agregat							
		<i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>			<i>Lataston (HRS)</i>		<i>Laston (AC)</i>		
		Tipis	Halus	Kasar	WC	Base	WC	BC	Base
ASTM	(mm)								
1 1/2"	37,5								100
1"	25			100				100	90-100
3/4"	19		100	90-100	100	100	100	90-100	81-92
1/2"	12,5	100	90-100	50-88	90-100	90-100	90-100	75-90	67-82
3/8"	9,5	70-95	50-80	25-60	75-85	65-90	77-90	66-82	59-75
No. 4	4,75	30-50	20-35	20-28			53-69	46-64	41-59
No. 8	2,36	20-30	16-24	16-24	50-72	35-55	33-53	30-49	28-45
No. 16	1,18	14-21					21-40	18-38	18-34
No. 30	0,600	12-18			35-60	15-35	14-30	12-28	11-25
No. 50	0,300	10-15					9-22	7-20	6-18
No. 100	0,150						6-15	5-13	4-12
No. 200	0,075	8-12	8-11	8-11	6-10	2-9	4-9	4-8	3-7

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3.2.4 Bahan Aditif

Bahan aditif adalah bahan tambahan yang diberikan pada campuran aspal untuk mendapatkan perubahan tertentu yang mengarah pada modifikasi teknis campuran aspal. bahan aditif diperlukan oleh campuran perkerasan lentur, terutama campuran *SMA*. Berdasarkan Spesifikasi Umum Direktorat Jenderal Bina Marga (2025), untuk mencegah *DD* diperlukan bahan aditif sebagai penstabil sekitar 0,3% dari total pencampuran. Fungsi dari penggunaan bahan aditif pada campuran *SMA* adalah menyeimbangkan kadar aspal yang tinggi dalam campuran perkerasan, sehingga meningkatkannya kekuatan tahanan campuran agar bisa menurunkan kegagalan perkerasan yang berupa *cracking*, *fatigue*, dan *bleeding*. Salah satu bahan

aditif yang dapat digunakan adalah serat selulosa. Serat selulosa yang digunakan pada penelitian ini adalah Viatop⁶⁶.

Viatop⁶⁶ bekerja dengan cara membantu proses pembesaran ukuran partikel atau granulasi dalam prosesnya oleh Abdillah dkk. (2018). Di sisi lain, bitumen memperoleh ruang antar serat pada proses mendistribusikan partikel aspal secara dispersi dalam pencampuran aspal. Unsur penyusun dalam Viatop⁶⁶ adalah *arboce*l (serat selulosa). Persyaratan penggunaan kadar serat selulosa secara umum untuk bahan tambah atau *stabilizer* untuk SMA dapat dilihat pada Tabel 3. 5 berikut.

Tabel 3. 5 Persyaratan Bahan Tambah atau *Stabilizer* untuk SMA

Pengujian	Satuan	Persyaratan
<u>Bentuk Serat:</u>		
Panjang serat	mm	Maks. 6,35
Lolos ayakan No. 20	%	85 ± 10
Lolos ayakan No. 40	%	40 ± 10
Lolos ayakan No. 140	%	30 ± 10
pH		$7,5 \pm 1,0$
Penyerapan Minyak		$7,5 \pm 1,0$ kali berat serat selulosa
Kadar Air	%	Maks. 5
<u>Bentuk Pelet:</u>		
Diameter	mm	3,8 – 4,0
Panjang	mm	5,9 – 6,1

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3.3 Campuran Perkerasan SMA

SMA adalah jenis campuran beraspal bergradasi senjang yang mengutamakan kontak antar butiran agregat. Celah di antara agregat tersebut diisi oleh mastik yang terbentuk dari campuran agregat halus, *filler*, aspal, dan bahan aditif. Susunan kerangka agregat yang kuat ini memberikan kelebihan berupa daya tahan tinggi serta kemampuan menahan deformasi plastis (*rutting*). Namun, penggunaan kadar aspal yang relatif besar untuk menghasilkan mastik yang tebal berpotensi menyebabkan *DD* atau *bleeding* pada suhu tinggi, yang pada akhirnya dapat menurunkan kinerja lapisan perkerasan. Oleh sebab itu, penambahan bahan aditif digunakan sebagai *stabilizer* untuk meningkatkan viskositas, demi mencegah terjadinya penurunan aspal, dan memastikan kualitas campuran tetap optimal. Ketentuan sifat campuran SMA dapat dilihat pada Tabel 3. 6 berikut.

Tabel 3. 6 Ketentuan Sifat-Sifat Campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Sifat-sifat Campuran		<i>SMA</i> Kasar
Jumlah tumbukan per bidang		50
Rongga dalam Campuran (%) ⁽⁴⁾	Min.	3,0
	Maks.	5,0
Rongga dalam Agregat (<i>VMA</i>) (%)	Min.	17
<i>Draindown</i> pada temperatur produksi, % berat dalam campuran (waktu 1 jam) ⁽²⁾	Maks.	0,3
Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min.	600
Pelelehan (mm)	Min.	2
	Maks.	4,5
Stabilitas <i>Marshall</i> Sisa (%) setelah perendaman selama 24 jam, 60°C	Min.	90
Stabilitas Dinamis (lintasan/mm ⁽⁷⁾)	Min.	2500

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3.4 Limbah *BA*

Limbah *BA* didefinisikan sebagai residu yang dihasilkan dari proses termal pembakaran batu bara pada PLTU menurut Phale dan Thakur (2021). *BA* memiliki sifat yang dapat terbakar sewaktu-waktu atau meledak dengan sendirinya (*self burning* dan *self exploding*). Berdasarkan abu yang dihasilkan, *BA* menyumbang 20-30% dari total keseluruhan abu batu bara.

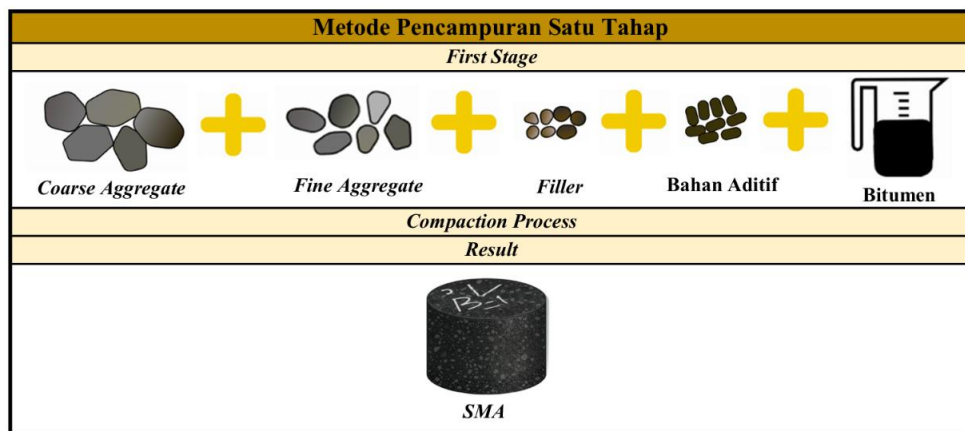
Berdasarkan penelitian Sonawane dkk. (2024), abu batu bara didefinisikan sebagai residu mineral yang dihasilkan melalui proses termal di pembangkit listrik. Material ini menunjukkan beragam karakteristik fisik dan kimia yang menentukan kesesuaiannya untuk digunakan dalam campuran bitumen. Secara spesifik, *BA* merupakan salah satu dari produk sampingan lain yang terbentuk sebagai produk sampingan dari pembakaran batu bara bubuk dan tidak mengalami mekanisme mitigasi sulfur dioksida (SO_2). *BA* di karakterisasi sebagai residu granula kasar dengan morfologi partikel yang tidak beraturan, yang terakumulasi secara gravitasi mengendap di dasar tungku pembakaran. Secara spesifik, distribusi ukuran butiran material ini berada dalam rentang 0,075 mm hingga 50,8 mm. Secara kimiawi, *BA* didominasi oleh senyawa oksida utama seperti silika (SiO_2) alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3), di mana keberadaan ketiga unsur ini menjadi faktor determinan yang membentuk aktivitas *pozzolan* pada material tersebut. Sifat berpori dari *BA* meningkatkan drainase lebih baik, sehingga dapat menguntungkan pada lapisan *base course* dan *sub base*.

3.5 Metode Pencampuran Perkerasan

Teknologi metode pencampuran perkerasan jalan lentur telah berkembang dari pendekatan satu tahap. Merujuk pada penemuan tersebut, berkembanglah metode baru yaitu metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap. Metode inovatif ini merencanakan urutan penggabungan antara agregat dan aspal dengan tujuan utama untuk mengoptimalkan karakteristik kinerja campuran.

3.5.1 Metode Pencampuran Satu Tahap

Metode pencampuran satu tahap merupakan proses memanaskan agregat secara bersama-sama, pada suhu tertentu, untuk memperoleh suatu campuran perkerasan. Salah satu kelebihan utama dari metode satu tahap adalah penggunaan suhu tinggi dalam proses pembuatan campuran panas meningkatkan kemampuan untuk mengeringkan agregat secara menyeluruh, serta potensi menghilangkan risiko yang timbul akibat kerusakan dari kelembapan menurut Tutu dan Tuffour (2016). Ilustrasi metode pencampuran satu tahap dapat dilihat pada Gambar 3. 1.



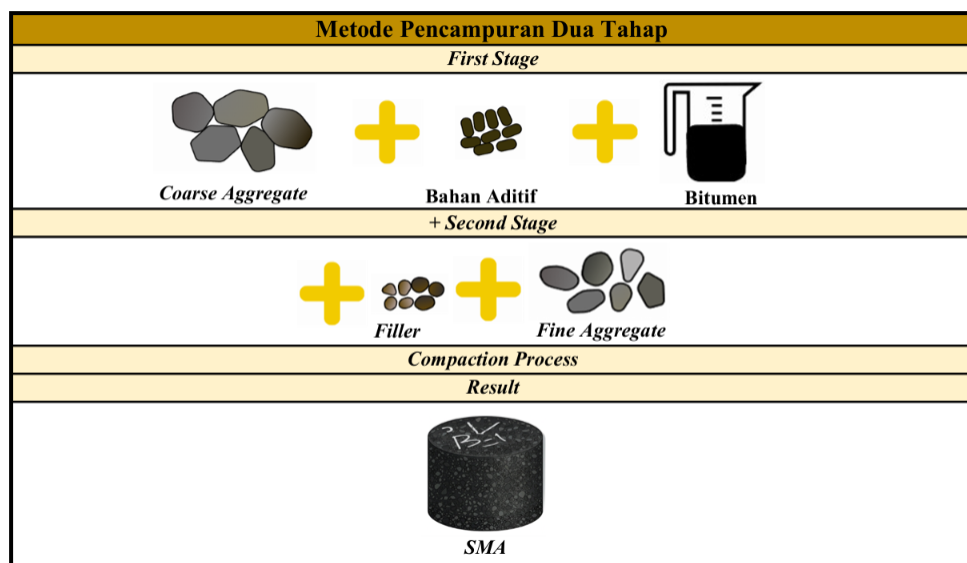
Gambar 3. 1 Ilustrasi Metode Pencampuran Satu tahap

Pada metode pencampuran satu tahap, terdapat beberapa risiko. Risiko tersebut adalah, partikel halus memiliki kecenderungan untuk terpisah dari agregat kasar selama proses pengadukan. Fenomena ini sering kali memicu segregasi setelah aspal ditambahkan, yang mengakibatkan distribusi material menjadi tidak homogen. Upaya untuk mengatasi masalah tersebut melalui peningkatan durasi dan intensitas pencampuran justru berisiko menyebabkan *over-mixing*, yang pada

akhirnya dapat mendegradasi gradasi awal agregat serta menurunkan kualitas campuran secara keseluruhan menurut Hesami, dkk. (2015).

3.5.2 Metode Pencampuran Dua Tahap

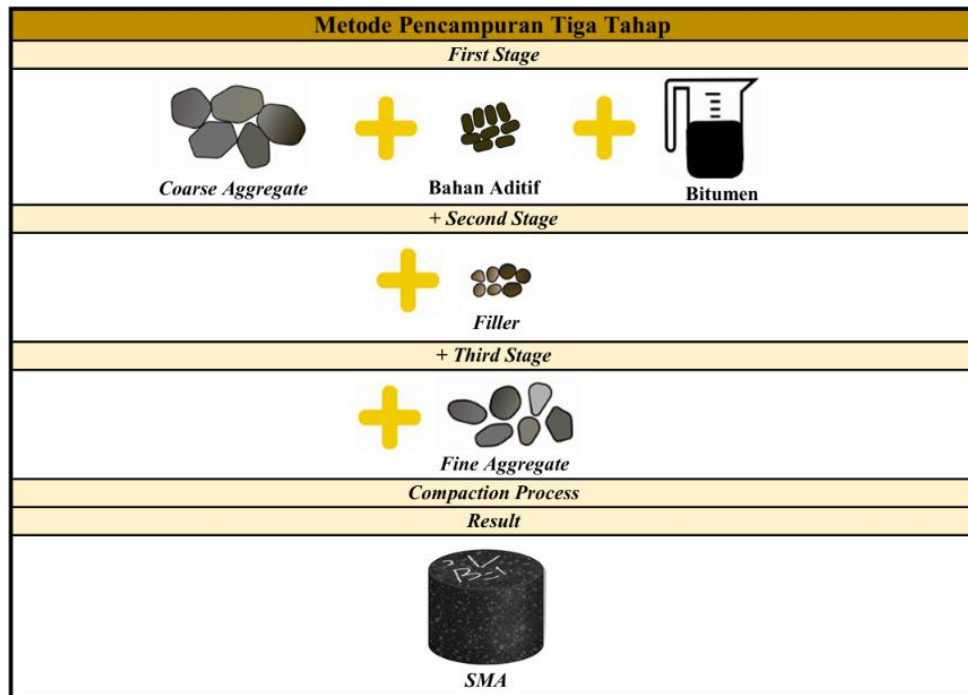
Metode pencampuran dua tahap merupakan pengembangan dari metode satu tahap melalui proses modifikasi urutan pencampuran. Dalam metode pencampuran dua tahap, proses diawali dengan mencampur agregat kasar, serat selulosa dan aspal hingga merata, dilanjutkan dengan penambahan agregat halus dan *filler* pada menurut Kok dan Kuloglu (2011). Penetrasi aspal yang mendalam ke dalam pori-pori permukaan agregat kasar yang bersih diyakini mampu menciptakan ikatan mekanis (*mechanical interlock*) yang lebih superior. Ilustrasi metode pencampuran dua tahap dapat dilihat pada Gambar 3. 2.



Gambar 3. 2 Ilustrasi Metode Pencampuran Dua Tahap

3.5.3 Metode Pencampuran Tiga Tahap

Dalam metode pencampuran tiga tahap, mekanisme pencampuran dimulai dengan mencampur agregat kasar, serat selulosa dengan aspal. Selanjutnya menambahkan *filler* untuk mengisi rongga, dan ditutup dengan penambahan agregat halus pada tahap akhir. Ilustrasi metode pencampuran tiga tahap dapat dilihat pada Gambar 3. 3 berikut.



Gambar 3. 3 Ilustrasi Metode Pencampuran Tiga Tahap

3.6 Parameter Karakteristik Volumetrik Campuran Perkerasan

Tinjauan parameter karakteristik volumetrik campuran perkerasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.6.1 Void in Total Mix (VITM)

VITM merupakan persentase rongga (*void*) kosong yang masih tersisa di dalam campuran aspal setelah dipadatkan. Nilai rongga ini perlu berada dalam batas yang sesuai agar kinerja perkerasan tetap optimal. Jika rongga terlalu besar, campuran menjadi lebih berpori sehingga air dan udara mudah masuk, membuat kerusakan ikatan aspal. Namun, jika rongga terlalu kecil, tidak ada ruang bagi aspal untuk memuai saat suhu meningkat, sehingga dapat terjadi *bleeding* dan menyebabkan lapisan mudah mengalami deformasi plastis. Nilai *VITM* dihitung menggunakan Persamaan 3.1 dan 3.2 berikut.

$$n = 100 - \left(100 - \frac{g}{h}\right) \quad (3.1)$$

$$h = 100 - \left(\frac{100}{\frac{\%Agregat}{BJ\ Agregat} + \frac{\%Aspal}{BJ\ Aspal}} \right) \quad (3.2)$$

dengan :

n = Nilai *VITM* (%),

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

h = Berat jenis maks. teoritis campuran.

3.6.2 *Void Filled With Asphalt (VFWA)*

VFWA menunjukkan jumlah persentase rongga di antara butiran agregat yang terisi oleh aspal setelah proses pemadatan. Parameter ini berfungsi sebagai salah satu indikator volumetrik campuran. nilai *VFWA* yang memadai diperlukan untuk menciptakan lapisan yang kedap air (*impermeabel*) guna mencegah oksidasi dan infiltrasi air. Namun, nilai *VFWA* yang rendah, akan berisiko terjadinya aspal mudah mengeras (*hardening*) serta turunnya *durabilitas*. Variabel penentu nilai ini meliputi karakteristik gradasi, kadar aspal, serta suhu pemadatan yang diaplikasikan. Nilai *VFWA* dihitung menggunakan Persamaan 3.3 hingga Persamaan 3.7.

1. Persentase aspal pada campuran

$$b = \frac{a}{100+a} \times 100 \quad (3.3)$$

dengan :

a = persentase aspal terhadap batuan (%), dan

b = persentase aspal terhadap campuran (%).

2. Persentase aspal terhadap agregat

$$m = 100 \times \frac{i}{l} \quad (3.4)$$

$$i = \frac{b \times g}{BJ \text{ Aspal}} \quad (3.5)$$

$$l = 100 - j \quad (3.6)$$

$$j = \left(\frac{(100-b) \times g}{BJ \text{ Agregat}} \right) \quad (3.7)$$

dengan:

m = *VFWA* (%),

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

b = persentase aspal terhadap campuran (%).

3.6.3 Void in Mineral Aggregate (VMA)

VMA adalah persentase rongga yang terdapat di antara butiran agregat pada campuran aspal setelah dipadatkan. Rongga ini mencakup volume yang dapat diisi oleh aspal serta sisa udara di dalam campuran. Besarnya nilai *VMA* dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain gradasi agregat (terutama gradasi terbuka), kadar aspal, dan energi pemadatan. Nilai *VMA* yang memadai sangat penting, sebab menentukan ketebalan selimut aspal di sekitar agregat, yang berperan besar dalam meningkatkan daya tahan campuran serta menjaga kedap terhadap air dan udara. *VMA* dapat dihitung pada Persamaan 3.8 berikut.

$$VMA = 100 - \frac{(100-b) \times g}{BJ \text{ agregat}} \quad (3.8)$$

dengan:

VMA = Volume pori antara agregat di dalam beton aspal, % dari volume *bulk* beton aspal padat,

b = persentase aspal terhadap campuran (%).

g = Nilai *Density* (gr/cc),

3.6.4 Kepadatan (*Density*)

Density merupakan berat campuran per satuan volume, yang menunjukkan kerapatan susunan material di dalam perkerasan. Nilai *density* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti berat jenis material penyusun, gradasi agregat, kadar aspal, serta kualitas proses konstruksi, termasuk suhu dan energi pemadatan. Secara struktural, *density* yang tinggi berhubungan dengan peningkatan kemampuan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas; semakin padat campuran, semakin besar ketahanan yang dimilikinya terhadap kerusakan. *Density* dinyatakan satuan gram/cc. *Density* dapat dihitung pada Persamaan 3.9 dan Persamaan 3.10 berikut.

$$g = \frac{c}{f} \quad (3.9)$$

$$f = d - e \quad (3.10)$$

dengan:

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

c = Berat benda uji sebelum direndam (gr),

- d = Berat benda uji dalam keadaan jenuh / SSD (gr),
 e = Berat dalam air (gr), dan
 f = Volume / isi (cm³).

3.7 Parameter Karakteristik Kekuatan Struktur Campuran Perkerasan

Tinjauan parameter karakteristik kekuatan struktur campuran perkerasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.7.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas didefinisikan sebagai kemampuan struktur perkerasan untuk menahan beban lalu lintas tanpa mengalami deformasi permanen, seperti *rutting* atau gelombang (*shoving*), sebelum mencapai batas keruntuhan plastis. Parameter yang umumnya dikuantifikasi dalam satuan kilogram ini sangat bergantung pada gesekan internal (*internal friction*) antar agregat—yang dipengaruhi oleh tekstur permukaan dan gradasi—serta kohesi yang dihasilkan oleh viskositas aspal dan densitas campuran. Perhitungan nilai stabilitas dapat dilihat pada Persamaan 3.11 berikut.

$$q = p \times s \times 0,4536 \quad (3.11)$$

dengan :

- q = Nilai Stabilitas (kg)
 p = Pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi *proving ring*, dan
 s = Angka koreksi tebal benda uji
 0,4536 = Konversi satuan *lb* dalam kg

3.7.2 Kelelehan (*Flow*)

Flow adalah besarnya deformasi vertikal campuran aspal dalam satuan milimeter yang terjadi saat menerima beban maksimum hingga runtuh. Sebagai indikator kelenturan perkerasan, nilai *flow* sangat dipengaruhi oleh daktilitas aspal. Nilai ini harus ideal; *flow* yang terlalu rendah menyebabkan lapisan kaku dan mudah retak, sedangkan *flow* yang terlalu tinggi membuat campuran rentan mengalami deformasi plastis.

3.7.3 Marshall Quotient (MQ)

MQ didefinisikan sebagai rasio hasil bagi antara nilai stabilitas terhadap *flow*. *MQ* memiliki fungsi sebagai indikator empiris tingkat kekakuan campuran beraspal. Nilai *MQ* merefleksikan potensi resistensi material terhadap deformasi. Untuk mendapatkan hasil pengukuran tingkat fleksibilitas dalam lapis perkerasan nilai *MQ* yang tinggi mengindikasikan campuran yang kaku namun cenderung getas (*brittle*) dan rawan retak. Sebaliknya, nilai *MQ* yang terlalu rendah menandakan campuran yang sangat fleksibel namun rentan mengalami deformasi plastis atau perubahan bentuk saat menerima beban. Oleh karena itu, *MQ* menjadi acuan vital dalam mengevaluasi keseimbangan antara kekuatan struktur dan kelenturan perkerasan. *MQ* dapat dihitung pada Persamaan 3.12 berikut.

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

dengan:

MQ = Nilai *MQ* (kg/mm),

q = Nilai *stability* (kg), dan

r = nilai *flow* (mm).

3.7.4 Indirect Tensile Strength (ITS)

ITS merupakan metode evaluasi yang dirancang untuk menentukan nilai kuat tarik maksimum dari suatu campuran perkerasan menurut Chasanah dan Sukmo (2023). Nilai ini dihitung berdasarkan beban puncak maksimum yang mampu ditahan oleh benda uji hingga mengalami keruntuhan. Hasil pengujian *ITS* merepresentasikan kapasitas struktural campuran dalam menahan tegangan tarik, sebagai indikator vital untuk memprediksi potensi *cracking* maupun deformasi plastis pada lapisan perkerasan akibat beban lalu lintas. *ITS* dapat dihitung pada Persamaan 3.13 berikut.

$$ITS = \frac{P_{\text{runtuh}}}{h} \times A_0 \times 98,0665 \quad (3.13)$$

dengan:

ITS = Kuat tarik tidak langsung (KPa),

P runtuh = Beban puncak (kg),

h = Tinggi sampel (cm),
 A_0 = Konstanta, dan
 98,0665 = Konversi dari kg/cm^2 ke kPa.

3.7.5 Cantabro Loss (CL)

CL digunakan untuk menilai ketahanan campuran aspal terhadap keausan dengan memanfaatkan mesin *Los Angeles* menurut Chasanah dan Sukmo (2023). Hasil pengujian ini menunjukkan sejauh mana perkerasan mampu bertahan dari kerusakan permukaan yang disebabkan oleh gesekan antara ban kendaraan dan permukaan jalan. Parameter ini menjadi indikator penting dalam mencegah *raveling* pada jenis perkerasan bergradasi terbuka seperti SMA. CL dapat dihitung pada Persamaan 3.14.

$$CL = \frac{M_o - M_i}{M_o} \times 100\% \quad (3.14)$$

dengan:

CL = Persentase kehilangan Berat (%).
 M_o = Berat sebelum diabrasi (gr),
 M_i = Berat setelah diabrasi (gr), dan

3.8 Parameter Karakteristik Durabilitas Campuran Perkerasan

Tinjauan parameter karakteristik kekuatan struktur campuran perkerasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

3.8.1 Index of Retained Strength (IRS)

IRS berfungsi untuk menilai ketahanan campuran perkerasan dari efek air dan suhu melalui analisis perubahan stabilitas. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan stabilitas benda uji pasca-perendaman 24 jam di suhu 60°C terhadap stabilitas kondisi standar pasca-perendaman 0,5 jam. Nilai persentase yang dihasilkan menggambarkan sisa kekuatan campuran, yang menjadi parameter penentu daya tahan perkerasan terhadap kondisi basah di lapangan. IRS dapat dihitung pada Persamaan 3.15 berikut.

$$IRS = \frac{S_2}{S_1} \times 100\% \quad (3.15)$$

dengan:

IRS = nilai sisa stabilitas pada *Marshall* (%)

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

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

3.8.2 *Tensile Strength Ratio (TSR)*

TSR adalah metode evaluasi durabilitas yang mengukur rasio perbandingan nilai kuat tarik tidak langsung antara benda uji yang dikondisikan (direndam 24 jam) terhadap benda uji dengan 0,5 jam rendaman. Parameter ini berfungsi sebagai indikator utama ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat air, di mana spesifikasi standar umumnya mensyaratkan nilai *TSR* minimal sebesar 80%. *TSR* dapat dihitung pada Persamaan 3.16 berikut.

$$TSR = \frac{T_2}{T_1} \times 100 \quad (3.16)$$

dengan:

TSR = nilai daya tahan tarik (%),

T_1 = Rata-rata nilai *ITS* dalam rendaman 0,5 jam (kPa), dan

T_2 = Rata-rata nilai *ITS* dalam perendaman 24 jam (kPa).

3.8.3 *Draindown (DD)*

DD adalah kondisi ketika aspal terpisah dari agregat dalam campuran dan bergerak turun ke bagian bawah sampel. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan campuran dalam menahan perpindahan atau keluarnya aspal saat terpapar suhu tinggi. Hasilnya kemudian dinyatakan dalam persentase (%) terhadap total berat campuran. *DD* dapat dihitung pada Persamaan 3.17 berikut.

$$DD = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100\% \quad (3.17)$$

dengan:

DD = Persentase aspal yang leleh (%),

m_1 = berat cetakan (gr),

m_2 = berat cetakan dengan campuran sebelum di oven (gr), dan

m_3 = berat cetakan dengan campuran setelah di oven (gr).

3.9 *Stiffness Modulus (SM)*

SM adalah sifat material yang menunjukkan ketahanannya terhadap deformasi ketika menerima tegangan yang cukup tinggi tanpa regangan (*strain*) yang besar atau kemampuannya saat mempertahankan gaya deformasi. Material yang memiliki modulus elastisitas tinggi akan mengalami regangan yang lebih kecil dibandingkan material bermodulus lebih rendah pada kondisi yang sama.

Pada temperatur tinggi dengan durasi pembebanan (*load time*) yang relatif lama, aspal akan menunjukkan perilaku seperti *liquid* yang bertahan lama. Sebaliknya, ketika aspal berada pada suhu rendah dan menerima beban dalam waktu singkat, maka aspal akan berperilaku lebih kaku dan elastis menunjukkan padatan. Dalam rekayasa perkerasan jalan aspal, *SM* dibedakan menjadi *Stiffness Modulus Of Bitumen (Sbit)* dan *Stiffness Modulus Of Mixture (Smix)*.

3.9.1 *Stiffness Modulus Of Bitumen (Sbit)*

Sbit sebagai bahan pengikat merupakan sifat kekakuan pada bitumen. *Sbit* dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu durasi pembebanan dari roda kendaraan, suhu permukaan perkerasan, dan suhu pada titik pelunakan. Metode untuk menentukan nilai *Sbit* dapat menggunakan metode yang diturunkan oleh *Ullidtz* dari nomogram Van der Poel. Metode tersebut dapat dilihat dalam Persamaan 3.18 berikut.

$$Sbit = 1,157 \times 10^{-7} \times t^{-0,368} \times 2,718^{-Pir} \times (Spr - T)^5 \quad (3.18)$$

Dengan:

t = Load Time (0,01 detik s/d 0,1 detik)

t dapat diperoleh dalam persamaan 3.19 berikut. Dengan syarat untuk lapisan aspal dengan tebal 100 – 350 mm.

$$t = \frac{1}{V} \quad (3.19)$$

V = Kecepatan (km/jam)

Pir = Recovered Penetration Indeks Asphalt,

Spr = Recovered Softening Point, dan

T = Temperatur suhu aspal.

Pir dan Spr dapat diperoleh dalam persamaan 3.20 hingga 3.22 berikut.

$$\text{Pir} = \frac{1951,4 - (500 \log(\text{Pr})) - (20 \times \text{Spr})}{(50 \log(\text{Pr})) - \text{Spr} - 120,14} \quad (3.20)$$

$$\text{Spr} = 98,4 - 26,35 \times \text{Log}(\text{Pr}) \quad (3.21)$$

$$\text{Pr} = 0,65 \times \text{Pi} \quad (3.22)$$

Dengan:

Pr = *Recovered Penetration* pada saat suhu 25°C

Pi = Penetrasi Awal

3.9.2 *Stiffness Modulus Of Mixture (Smix)*

Nilai modulus kekakuan campuran (*Smix*) merupakan kekakuan campuran perkerasan menjadi parameter penting untuk mengevaluasi kemampuan struktur perkerasan dalam menahan dan mendistribusikan beban roda kendaraan. Adapun *Smix* dipengaruhi oleh suhu dan durasi pembebanan. Dalam menentukan nilai *Smix* dapat menggunakan Persamaan 3.23 oleh *Nottingham* pada berikut.

$$\text{Smix} = \text{Sbit} \times \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 \times \text{VMA}}{n \times (\text{VMA} - 3)}\right)^n \quad (3.23)$$

Nilai n dapat dicari pada Persamaan 3.24.

$$n = 0,83 \times \log\left(\frac{4 \times 10^4}{\text{Sbit}}\right) \quad (3.24)$$

3.10 **Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan**

Prediksi umur pelayanan perkerasan diawali dengan merencanakan tebal perkerasan jalan. Perencanaan tebal perkerasan sendiri, mencakup penentuan kriteria desain untuk perkerasan lentur. Lalu prediksi umur pelayanan dengan *Software KENPAVE*.

3.10.1 **Desain Tebal Struktur Perkerasan**

Penentuan desain tebal struktur perkerasan harus mempertimbangkan hal-hal sebagai berikut.

1. Desain Umur Rencana

Umur Rencana (UR) merupakan perkiraan durasi operasional (kelayakan) suatu struktur perkerasan. UR dihitung sejak jalan pertama kali dibuka hingga waktu operasional tersebut diperkirakan habis batasnya. UR dapat didapatkan berdasarkan jenis perkerasan dan elemen perkerasan pada Tabel 3. 7 berikut.

Tabel 3. 7 Umur Rencana Perkerasan Jalan Baru (UR)

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (tahun) ⁽¹⁾
Perkerasan Lentur	Lapisan aspal dan lapisan berbutir ⁽²⁾ .	20
	Lapis Fondasi jalan	40
	Semua perkerasan untuk lokasi yang tidak dimungkinkan pelapisan ulang (<i>overlay</i>), seperti: jalan perkotaan, <i>underpass</i> , jembatan, dan terowongan	
	Lapis Fondasi Berpengikat Semen, <i>Cement Treated Based (CTB)</i>	
Perkerasan Kaku	Lapis fondasi atas, lapis fondasi bawah, lapis beton semen, dan fondasi jalan	
Jalan tanpa penutup	Semua elemen (termasuk fondasi jalan)	10

Catatan:

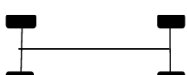
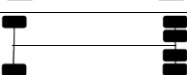
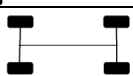
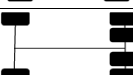
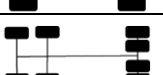
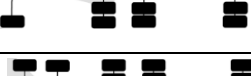
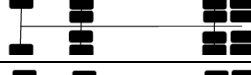
1. jika dianggap sulit untuk menggunakan umur rencana di atas, maka dapat digunakan umur rencana berbeda, namun sebelumnya harus dilakukan analisis dengan *discounted lifecycle cost* yang dapat menunjukkan bahwa umur rencana tersebut dapat memberikan *discounted lifecycle cost* terendah. Nilai bunga diambil dari nilai bunga rata-rata dari Bank Indonesia, yang dapat diperoleh dari sumber resmi; dan
2. umur rencana harus memperhatikan kapasitas jalan.

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

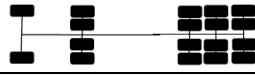
2. Jenis Kendaraan

Direktorat Jenderal Bina Marga 2024 mengklasifikasikan kendaraan secara lebih sederhana melalui integrasikannya ke dalam perhitungan beban kumulatif untuk desain struktural perkerasan jalan. Beragamnya beban yang ditimbulkan oleh jenis kendaraan saat melintas, tentunya memberikan pengaruh signifikan terhadap tingkat kerusakan perkerasan jalan sehingga mempengaruhi kecepatan kerusakan jalan terjadi. Klasifikasi kendaraan berat (seperti golongan 7), cenderung menyebabkan kerusakan yang jauh lebih berat dan cepat. Klasifikasi dan konfigurasi sumbu kendaraan dapat dilihat pada Tabel 3. 8 berikut ini. Dalam tabel tersebut dapat diketahui bahwa kendaraan penumpang serta kendaraan ringan hingga sedang memiliki beban gandar yang relatif kecil, sehingga tidak menjadi faktor utama dalam perhitungan desain tebal perkerasan.

Tabel 3. 8 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok Sumbu	Skema Konfigurasi	
1	Sepeda motor dan kendaraan roda-3				
2	Kendaraan ringan - sedan, jeep, dan station wagon	1.1	2		
3	Kendaraan ringan – angkutan umum sedang	1.1	2		
4	Kendaraan ringan - pick up, micro truck	1.1	2		
5A	Bus kecil	1.1	2		
5B	Bus besar	1.2	2		
6A	Truk 2 sumbu-truk ringan	1.1	2		
6B	Truk 2 sumbu-truk sedang	1.2	2		
7A1	Truk 3 sumbu-berat	11.2	2		
7A2	Truk 3 sumbu-berat	1.22	2		
7A3	Truk 4 sumbu-berat	11.2	2		
7B1	Truk 4 sumbu-berat	1.2+2.2	4		
7B2	Truk 5 sumbu-berat	11.2+2.2	4		
7B3	Truk 5 sumbu-berat	1.22+2.2	4		
7C1	Truk 4 sumbu-berat	1.2-22	3		
7C2A	Truk 5 sumbu-berat	1.22-22	3		

Lanjutan Tabel 3. 8 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok Sumbu	Skema Konfigurasi	
7C2B	Truk 5 sumbu-berat	1.2-222	3		
7C3	Truk 6 sumbu-berat	1.22-222	3		
7C4	Truk 7 sumbu-berat	1.22-2222	3		
8	Kendaraan tak bermotor				

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

3. Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas

Perhitungan beban lalu lintas rencana didasarkan pada parameter utama, yaitu Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR), yang diperoleh melalui pengumpulan data survei selama 3×24 jam. Data volume lalu lintas pada jam sibuk dan Lalu Lintas Harian Rata-rata Tahunan (LHRT) didapatkan berdasarkan Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI). Penelitian lalu lintas harus menggunakan data realistis, rekayasa tidak diperbolehkan dalam olah data. Dalam faktor pertumbuhan lalu lintas (i) dapat menggunakan ketentuan berdasarkan Tabel 3. 9 berikut. Adapun jika menggunakan nilai i pada Tabel ini, nilainya harus disesuaikan apabila terdapat perubahan tata guna lahan dan terbangunnya jaringan baru.

Tabel 3. 9 Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Jenis	Jawa	Sumatera	Kalimantan	Rata-rata Indonesia
Arteri dan Perkotaan	4,80	4,83	5,14	4,75
Kolektor rural	3,50	3,50	3,50	3,50
Jalan desa	1,00	1,00	1,00	1,00

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Adapun cara menghitung i berdasarkan rumus selama umur rencana dengan menggunakan faktor pertumbuhan kumulatif (*cumulative growth factor*) dapat dilihat pada persamaan 3.25 sebagai berikut.

$$R = \frac{(1+0,01i)^{UR}-1}{0,01i} \quad (3.25)$$

dengan:

R = Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif

i = Laju pertumbuhan lalu lintas tahunan (%)

UR = Umur rencana (tahun)

4. Faktor Lalu Lintas Lajur Rencana

Lajur rencana merupakan lajur jalan dalam suatu ruas jalan yang menerima volume kendaraan berat seperti truk dan bus terbanyak dibandingkan lajur lainnya. Besarnya beban lalu lintas pada lajur tersebut dihitung sebagai total beban gandar standar (*ESA*) dengan memasukkan faktor pembagi arah pergerakan (*DD*) serta faktor pembagi antar-lajur (*DL*). Jika jalan dua arah, pada umumnya *DD* menggunakan nilai 0,50, terkecuali pada jenis niaga lebih tinggi pada kondisi tertentu. Faktor distribusi lajur bertujuan menyamakan beban kumulatif (*CESAL*) dengan jalan yang memiliki dua lajur, satu arah namun lebih dalam. Faktor *DL* dapat dilihat pada Tabel 3. 10.

Tabel 3. 10 Faktor Distribusi Lajur (DL)

Jumlah Lajur Tiap Arah	Kendaraan Niaga Pada Lajur Desain (% Terhadap Populasi Kendaraan Niaga)
1	100
2	80
3	60
4	50

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

5. *Vehicle Damage Factor (VDF)*

VDF merupakan faktor konversi ke dalam bentuk beban standar (*ESA*). Dalam penelitian tersebut, *VDF* merupakan gabungan beban dari berbagai jenis kendaraan dan berbagai kelas dengan total beban *ESA*. Adanya *VDF* membuat berbagai jenis kategori kendaraan yang bersumbu berbeda dapat dihitung menjadi total beban dalam *ESA*. Nilai *VDF* pada penelitian ini berdasarkan data LHR Tahun 2024 pada ruas jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab Sarolangun – Pauh yang didapatkan dari Balai Pelaksanaan Jalan Nasional

(BPJN) Jambi. Adapun pada wilayah Jambi nilai *VDF* berdasarkan ketentuan dapat dilihat pada Tabel 3. 11 berikut.

Tabel 3. 11 *Vehicle Damage Factor (VDF)* - Jambi

Kondisi	Kelas Kendaraan	Gol 5B	Gol 6A	Gol 6B	Gol 7A1	Gol 7A2	Gol 7A3	Gol 7B1	Gol 7B2	Gol 7B3	Gol 7C1	Gol 7C2A	Gol 7C2B	Gol 7C3	Gol 7C4
VDF 4	Faktual	1,2	0,5	1,4	-	13,8	-	-	-	-	8,4	5,5	-	10,1	-
	Normal	1,2	0,5	0,5	-	4,6	-	-	-	-	6,1	5,5	-	5,7	-
VDF 5	Faktual	1,3	0,4	1,8	-	25,4	-	-	-	-	11,9	7,5	-	18,0	-
	Normal	1,3	0,4	0,4	-	6,0	-	-	-	-	8,0	7,5	-	8,2	-

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

6. Beban Sumbu Standar Kumulatif

Beban sumbu standar kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESAL)* adalah total akumulasi beban sumbu lalu lintas desain pada lajur desain selama umur rencana. Besarnya beban lalu lintas menyebabkan nilai *CESAL* besar. *CESAL* dapat dihitung berdasarkan pada Persamaan 3.26.

$$CESAL = \left(\sum LHR_{JK} \times VDF_{JK} \right) \times 365 \times DD \times DL \times R \quad (3.26)$$

dengan:

LHR_{JK} = Lintas harian rata – rata tiap jenis kendaraan niaga (satuan kendaraan per hari)

VDF_{JK} = Faktor ekuivalen beban tiap jenis kendaraan niaga,

DD =Faktor distribusi arah

DL =Faktor distribusi lajur

CESAL = Kumulatif beban sumbu standar ekuivalen selama umur rencana

R =Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif

7. Menentukan Jenis Perkerasan

Dalam menentukan jenis perkerasan harus menggunakan *discounted lifecycle cost* paling rendah, pengaplikasiannya harus disesuaikan dengan parameter volume lalu lintas, UR, dan kondisi fondasi jalan yang termual dalam perhitungan *ESAS* berdasarkan nilai *VDF* yang telah disesuaikan. Pemilihan jenis perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3. 12 berikut.

Tabel 3. 12 Pemilihan Jenis Perkerasan

Struktur Perkerasan	Bagan Desain	ESA5 (juta) dalam 20 tahun				
		0-1	1-4	4-10	>10-30	>30
AC modifikasi	3, 3A, 3B	-	-	-	-	2
AC dengan CTB					2	-
AC Modifikasi dengan CTB					-	2
AC dengan lapis fondasi agregat	3, 3A, 3B	-	1,2	1,2	2	-
HRS tipis di atas lapis fondasi agregat	4	2	2	-	-	-
Burda atau Burtu dengan lapis fondasi agregat	5	3	3	-	-	-
AC/HRS dengan lapis fondasi <i>Soil Cement</i>	6	2	2	-	-	-
AC/HRS dengan lapis fondasi agregat dan perbaikan tanah dasar (dengan stabilisasi semen)	7	2	2			
Perkerasan kaku dengan lalu lintas berat	8	-	-	-	2	2
Perkerasan kaku dengan lalu lintas rendah	8A	-	-	1,2	-	-
Perkerasan tanpa penutup (Japat dan jalan kerikil)	9	1	-	-	-	-

Catatan:

Tingkat kesulitan:

1 - kontraktor kecil – medium;

2 - kontraktor besar dengan sumber daya yang memadai; dan

3 - membutuhkan keahlian dan tenaga ahli khusus – kontraktor spesialis Burtu/Burda.

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

8. Desain Tebal Perkerasan Lentur

Dalam pembuatan tebal perkerasan lentur terdapat beberapa acuan dalam penggunaannya sebagai metode. Mengkaji metode desain yang pertama adalah AASHTO 1993. Pendekatan tersebut menghasilkan desain perkerasan dengan ketebalan yang tinggi karena dipengaruhi hubungan empiris dalam beban lalu lintas, jenis tanah, dan performa perkerasan menurut (Sugema dan Maulana, 2024). Metode penelitian selanjutnya adalah Direktorat Jenderal Bina Marga (2024). Penelitian tersebut mengacu dengan mempertimbangkan kondisi tanah Indonesia yang bersifat tropis. Pendekatan ini mendapatkan tingkat efisien yang baik dalam hal material dan energi. Dengan demikian, metode Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) dapat menghemat tebal perkerasan 20-30%. Desain perkerasan lentur Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) memiliki jenis berbeda-beda tergantung dengan kebutuhannya. Berikut merupakan bagan desain tebal perkerasan lentur berdasarkan jenisnya dapat dilihat pada Tabel 3. 13 hingga Tabel 3. 19.

Tabel 3. 13 Bagan Desain-3(1) Desain Perkerasan Lentur Dengan 150 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)

	STRUKTUR PERKERASAN									
	F(1) 1	F(1) 2	F(1) 3	F(1) 4	F(1) 5	F(1) 6	F(1) 7	F(1) 8	F(1) 9	F(1) 10
	Untuk beban rencana < 30 juta ESA5 menggunakan Aspal Pen 60-70				Untuk beban rencana ≥ 30 juta ESA5 direkomendasikan menggunakan Aspal PG70 ⁽³⁾					
Beban rencana 20 tahun (106 ESA5)	> 1 - 6	> 6 - 10	> 10 - 20	>20 - 30	> 30 - 40	> 40 - 50	> 50 - 80	> 80 - 100	> 100 - 150	> 150 - 200
Jenis permukaan berpengikat	AC									
Jenis lapis fondasi	Cement Treated Base (CTB)									
Tebal Perkerasan (mm)										
AC WC	40	40	50	40	40	40	40	50	40	40
AC BC	60	75	80	65	60	60	80	80	60	60
	-	-	-	70	-	-	-	-	-	-
AC Base ⁽¹⁾	-	-	-	-	90	100	100	100	75	80
	-	-	-	-	-	-	-	-	75	90
CTB	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen(2)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 14 Bagan Desain-3(2) Desain Perkerasan Lentur Dengan 200 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)

	STRUKTUR PERKERASAN							
	F(2) 1	F(2) 2	F(2) 3	F(2) 4	F(2) 5	F(2) 6	F(2) 7	F(2) 8
	Untuk beban rencana < 30 juta ESA5 menggunakan Aspal Pen 60-70			Untuk beban rencana ≥ 30 juta ESA5 direkomendasikan menggunakan Aspal PG70 ⁽³⁾				
Beban rencana 20 tahun (10 ⁶ ESA5)	> 1 - 8	> 8 - 15	> 15 - 30	> 30 - 50	> 50 - 75	> 75 - 95	> 95 - 150	> 150 - 200
Jenis permukaan berpengikat	AC							
Jenis lapis fondasi	Cement Treated Base (CTB)							
	Tebal Perkerasan (mm)							
AC WC	40	50	50	40	40	40	50	40
AC BC	60	70	80	70	60	70	80	60
	-	-	-	70	-	-	-	-
AC Base ⁽¹⁾	-	-	-	-	100	100	100	75
	-	-	-	-	-	-	-	75
CTB	200	200	200	200	200	200	200	200
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	150	150	150	150	150	150	150	150
Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen ⁽²⁾	200	200	200	200	200	200	200	200

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 15 Bagan Desain-3(4) Desain Perkerasan Lentur Dengan 300 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)

	STRUKTUR PERKERASAN							
	F(2) 1	F(2) 2	F(2) 3	F(2) 4	F(2) 5	F(2) 6	F(2) 7	F(2) 8
	Untuk beban rencana < 30 juta ESA5 menggunakan Aspal Pen 60-70			Untuk beban rencana ≥ 30 juta ESA5 direkomendasikan menggunakan Aspal PG70 ⁽³⁾				
Beban rencana 20 tahun (10 ⁶ ESA5)	> 1 - 10	> 10 - 17	>17 - 30	> 30 - 40	>40 - 60	>60 - 90	>90 - 150	>150 - 200
Jenis permukaan berpengikat	AC							
Jenis lapis fondasi	Cement Treated Base (CTB)							
Tebal Perkerasan (mm)								
AC WC	40	40	50	50	40	50	50	50
AC BC	60	70	75	80	60	60	60	75
	-	-	-	-	70	-	-	-
AC Base ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	80	100	100
	-	-	-	-	-	-	-	-
CTB	300	300	300	300	300	300	300	300
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	150	150	150	150	150	150	150	150
Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen ⁽²⁾	200	200	200	200	200	200	200	200

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 16 Bagan Desain-3A Desain Perkerasan Lentur – Aspal Dengan Lapis Fondasi Agregat (Aspal Pen 60/70 dan PG70)

	STRUKTUR PERKERASAN							
	FFF(1) 1	FFF(1) 2	FFF(1) 3	FFF(1) 4	FFF(1) 5	FFF(1) 6	FFF(1) 7	FFF(1) 8
	Untuk beban rencana < 30 juta ESA5 menggunakan Aspal Pen 60-70			Untuk beban rencana ≥ 30 juta ESA5 direkomendasikan menggunakan Aspal PG70 ⁽¹⁾				
Beban rencana 20 tahun (10 ⁶ ESA5)	< 2	> 2 - 5	> 5 - 10	> 10 - 15	> 15 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 150
Tebal Perkerasan (mm)								
AC WC	60(2)	40	40	40	40	40	40	50
AC BC	-	65	75	75	60	60	75	80
	-	80	80	-	-	-	-	-
AC Base ⁽³⁾	-	-	-	100	80	85	100	100
	-	-	-	-	80	100	100	100
	-	-	-	-	-	-	-	-
Lapis Fondasi Agregat Kelas A ⁽⁴⁾	200	200	200	200	200	200	200	200
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	150	150	150	150	150	150	150	150
Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen ⁽⁵⁾	-	-	200	200	200	200	200	200

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 17 Penyesuaian Tebal Lapis Timbunan Pilihan Berbutir Kasar Atau LFA Kelas C Atau Stabilisasi Semen (Hanya Untuk Bagan Desain- 3A) Beban Rencana 20 Tahun > 5 juta ESA5

		Tebal (mm)
Subgrade $6 < \text{CBR} < 10$	Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen	200
Subgrade $10 \leq \text{CBR} < 30$	Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen	150
Subgrade $\text{CBR} \geq 30$	Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen	-

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 18 Bagan Desain-4 Desain Perkerasan Lentur Dengan HRS

Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (106 CESA5)	FF1 < 0,5	0,5 ≤ FF2 ≤ 4,0
Jenis permukaan	HRS atau Penetrasi Makadam	HRS2
Subgrade $10 \leq \text{CBR} < 30$	Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen 150	
HRS-WC	50	30
HRS-Base	-	35
LFA Kelas A	150	250
LFA Kelas B atau kerikil alam atau lapis distabilisasi dengan $\text{CBR} > 10\%$ 3	150	150

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 19 Bagan Desain-5 Perkerasan Berbutir Dengan Laburan¹

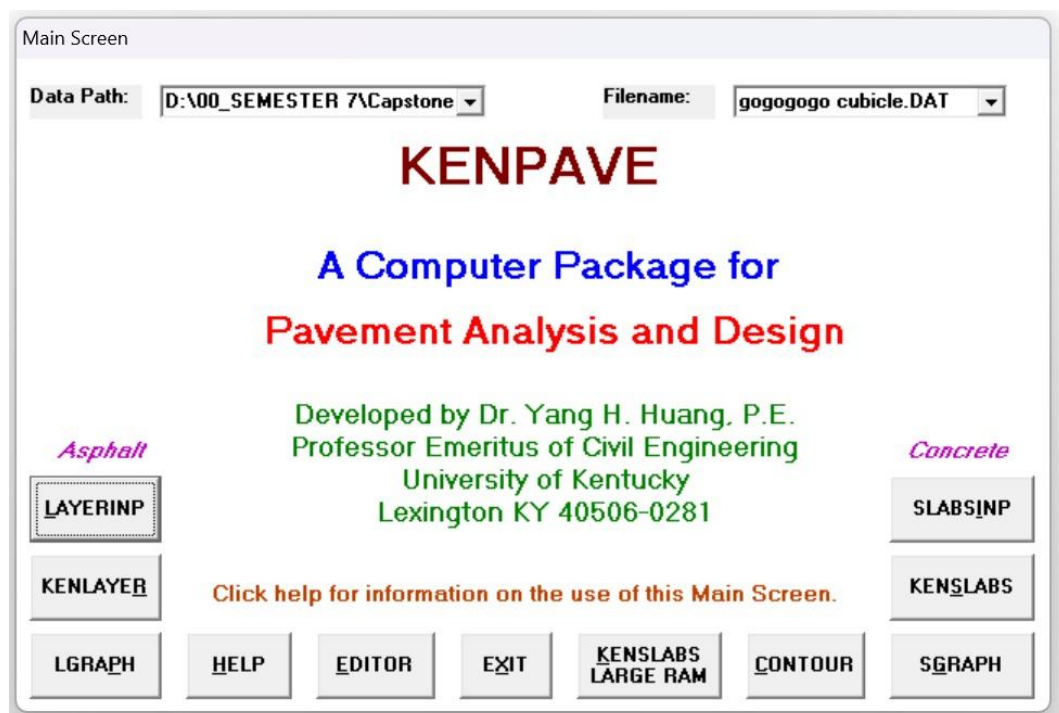
	STRUKTUR PERKERASAN		
	SD1	SD2	SD3
	Kumulatif Beban Rencana ($ESA4 \times 10^6$)		
	< 0,1	0,1 - 0,5	> 0,5 - 4
Burda			
Lapis Fondasi Agregat Kelas A2	200	250	300
Lapis Fondasi Agregat Kelas B, atau kerikil alam, atau stabilisasi dengan CBR > 10%, pada <i>subgrade</i> dengan CBR $\geq 5\%$ 2,5	100	110	140

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2004)

3.10.2 Analisis Dengan Pemodelan Viskoelastik *Software KENPAVE*

KENPAVE merupakan aplikasi untuk evaluasi Struktur Perkerasan Jalan (SPJ) berdasarkan regangan tekan dan regangan tarik menurut Lia dan Mahardi (2022). Metode mekanistik empiris merupakan pendekatan yang menggabungkan prinsip-prinsip teoritis serta sifat-sifat material perkerasan, dengan dilengkapi analisis perhitungan yang tepat dan akurat mengenai respons struktur perkerasan terhadap beban sumbu kendaraan (Hadi dan Fauziah, 2022). Program *KENPAVE* dikembangkan oleh Dr. Yang H. Huang P.E. Aplikasi *KENPAVE* terdiri atas empat program utama, yaitu *SLABSINP*, *KENSLABS*, *LAYERINP*, dan *KENLAYER*. Khusus untuk analisis struktur perkerasan jalan lentur (*flexible pavement*), digunakan dua modul, yakni *LAYERINP* dan *KENLAYER*.

Penelitian evaluasi kinerja struktur perkerasan jalan ini dilakukan untuk memverifikasi dan memastikan bahwa struktur perkerasan yang direncanakan mampu menahan beban lalu lintas rencana dengan baik sepanjang UR yang ditetapkan. Tampilan menu utama program *KENPAVE* dapat dilihat pada Gambar 3. 4 berikut.

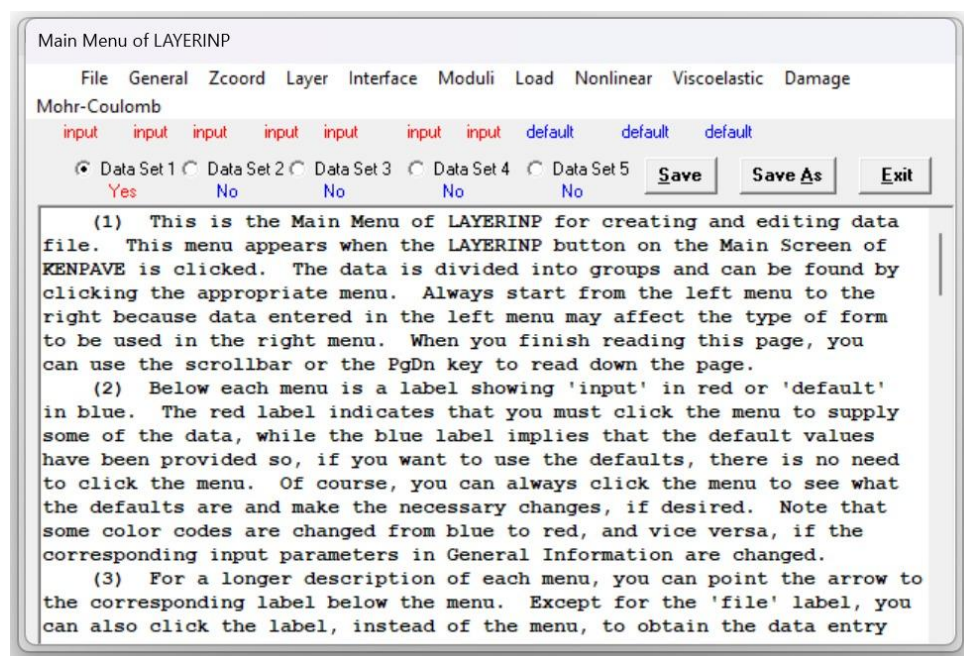


Gambar 3. 4 Tampilan Menu Utama Program *KENPAVE*

Program *KENLAYER* merupakan salah satu modul inti dari perangkat lunak *KENPAVE* yang dirancang khusus untuk melakukan analisis struktur perkerasan lentur. Fungsi utama dari program ini adalah menghitung nilai tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan lendutan (*deflection*) yang timbul pada setiap lapisan penyusun struktur perkerasan lentur akibat beban lalu lintas. Langkah-langkah dalam menggunakan Program *KENLAYER* adalah sebagai berikut.

1. Input *LAYERINP*

Klik menu *file* pada tampilan menu utama berdasarkan Gambar 3. 5 berikut.



Gambar 3. 5 Tampilan Beranda *Layerinp*

Berdasarkan Gambar 3. 5 didapatkan pilihan menu antara lain sebagai berikut.

a. *File*

File mempunyai dua pilihan, satu untuk membuat *file* baru, dan yang kedua merupakan membuka *file* yang lama yang sudah ada.

b. *General*

Menu *general* merupakan pusat informasi pertama yang menentukan tahapan selanjutnya. Menu *general* dapat dilihat pada Gambar 3. 6. Tampilan menu *general* berisi sebagai berikut ini.

1) *TITLE*

Title merupakan nama *file* dengan batas maksimum 68 karakter.

2) *MATL*

merupakan menu untuk memasukkan data jenis material pada setiap lapisan yang direpresentasikan dengan angka. Kode angka (1) digunakan untuk lapisan linier elastik, (2) untuk lapisan non-linier elastik, (3) untuk lapisan viskoelastik, dan (4) apabila lapisan yang merupakan kombinasi dari ketiga karakteristik tersebut.

3) *NDAMA*

merupakan menu yang berfungsi untuk memilih jenis analisis kerusakan, yang dinyatakan menggunakan angka sebagai kodenya. Nilai (0) menunjukkan bahwa tidak dilakukan analisis kerusakan, nilai (1) menandakan adanya analisis kerusakan dengan hasil keluaran berupa *print out*, sedangkan nilai (3) menunjukkan analisis kerusakan dilakukan dengan *print out* yang lebih lengkap dan terperinci.

4) *DEL*

Merupakan nilai akurasi dari analisis yang memiliki *default* sebesar 0,001.

5) *NL*

Merupakan jumlah *Layer* maksimum sebanyak 19 *Layer*.

6) *NZ*

Merupakan tempat koordinat arah Z yang dilakukan analisis. Apabila *NDAMA* sebesar 1, maka *NZ* bernilai 0. Tersebut dikarenakan program menganalisis koordinat yang terdampak kerusakan.

7) NSTD

Merupakan pilihan untuk program, apabila nilai (1) untuk *vertical displacement*, (5) untuk *vertical displacement* dan tegangan, (9) untuk *vertical displacement*, tegangan dan regangan.

8) NBOND

Merupakan pilihan untuk program, apabila (1) seluruh lapisan saling berhubungan, dan (2) seluruh lapisan tidak terikat atau (gaya gesek diabaikan).

9) NUNIT

Merupakan pilihan satuan, (1) satuan *English*, dan (2) satuan SI.

Menu general dapat dilihat pada Gambar 3. 6 berikut.

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE Analisa Vania

Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	3
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout)	(NDAMA)	0
Number of periods per year	(NPY)	1
Number of load groups	(NLG)	1
Tolerance for numerical integration	(DEL)	0.001
Number of layers	(NL)	4
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	5
Maximum cycles of numerical integration	(ICL)	80
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains)	(NSTD)	9
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless)	(NBOND)	1
Number of layers for bottom tension	(NLBT)	1
Number of layers for top compression	(NLTC)	1
System of units (0=English, 1=SI)	(NUNIT)	1

OK

(1) This form appears when the 'General' on the Main Menu of LAYERINP is clicked. You can override any of the default values by typing in a new value. You can use the Tab key to move the cursor from one textbox to the next or just click on the textbox before typing. The use of click has the advantage that you don't have to delete the default before typing in the data you want. If you want to read the remaining text, you can use the scrollbar. You can also use the PgDn key after clicking this textbox to make it active.

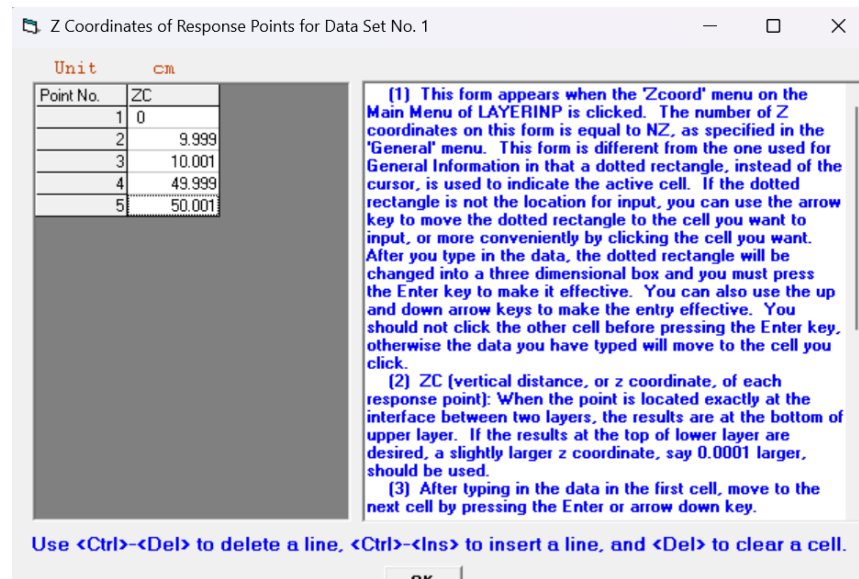
(2) TITLE (title of run): Any title or comment can be typed on one line. The title should not be longer than 68 characters including spaces. If you make a mistake in typing, use the Del key to erase any typographical errors. When the total length reaches 68, no additional characters can be added. No comma should be used in TITLE. Use colon or semicolon instead.

(3) MATL (types of material): 1 when all layers are linear elastic, 2 when some layers are nonlinear

Gambar 3. 6 Menu General

2. Zcoord

Zcoord adalah tampilan analisis struktur perkerasan jalan berdasarkan koordinat Z. Tampilan *Zcoord* dapat dilihat pada Gambar 3. 7.



Z Coordinates of Response Points for Data Set No. 1

Point No.	ZC
1	0
2	9.999
3	10.001
4	49.999
5	50.001

(1) This form appears when the 'Zcoord' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of Z coordinates on this form is equal to NZ, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can also use the up and down arrow keys to make the entry effective. You should not click the other cell before pressing the Enter key, otherwise the data you have typed will move to the cell you click.

(2) ZC (vertical distance, or z coordinate, of each response point): When the point is located exactly at the interface between two layers, the results are at the bottom of upper layer. If the results at the top of lower layer are desired, a slightly larger z coordinate, say 0.0001 larger, should be used.

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

Gambar 3. 7 Tampilan Zcoord

3. Layer

Layer memiliki fungsi untuk data jumlah lapisan perkerasan yang sedang diteliti. Tampilan *Layer* dapat dilihat pada Gambar 3. 8 di halaman berikut ini. Data *input* dalam *layer* meliputi tebal lapisan perkerasan (*Thickness/TH*) dalam satuan (cm) dan *Poisson's Rasio (PR)*. Adapun untuk mencari *PR* dapat dilihat pada Tabel 3. 20 dan Tabel 3. 21.

Tabel 3. 20 Karakterisasi Modulus Bahan Berpengikat Yang Digunakan Untuk Pengembangan Bagan Desain dan Untuk Analisis Mekanistik

Jenis Bahan	Modulus Tipikal	Rasio Poisson
HRS-WC	800 MPa	0,40
HRS-BC	900 MPa	
AC-WC (2 x75 tumbukan)	1.100 MPa	
AC-WC (2 x 50 tumbukan)	1.000 MPa	
AC-BC (2 x 75 tumbukan)	1.200 MPa	
AC-Base (2 x 75 tumbukan)	1.500 MPa	
AC-WC PG70 (2 x 75 tumbukan)	1.300 MPa	
AC -BC PG70 (2 x 75 tumbukan)	1.400 MPa	
Bahan bersemen (CTB)	3.000 MPa (<i>pre cracking</i>)	0,20
Bahan bersemen (CTB)	500 MPa retak (<i>post cracking</i>)	0,20 (mulus) 0,35 (retak)
Tanah dasar (d disesuaikan musim)	10 x CBR (MPa)	0,45 (tanah kohesif)
		0,35 (tanah non-kohesif)

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 21 Karakterisasi Material

Material	Modulus E (MPa)	Rasio Poisson	Derajat Anistropik (n)	Vb	K	Modulus Geser, f (Mpa)
AC WC	1.100	0,40	1	12,2	0,0064070	-
AC BC	1.200	0,40	1	11,5	0,0058865	-
AC Base	1.500	0,40	1	11,5	0,0054321	-
LFA Sub Lapis 1	220	0,35	2	-	-	163,0
LFA Sub Lapis 2	170	0,35	2	-	-	125,7
LFA Sub Lapis 3	131	0,35	2	-	-	96,9
LFA Sub Lapis 4	101	0,35	2	-	-	74,7
LFA Sub Lapis 5	78	0,35	2	-	-	57,6
Tanah Dasar	60	0,45	2	-	-	41,4

*LFA di bagi dalam 5 sub lapis. Sub lapis 1 = Lapis teratas (langsung di bawah lapis beraspal)

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Layer Thickness, Poisson's Ratio and Unit Weight for Data Set No. 1

After typing the value in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

Unit cm kN/m³

Layer No.	TH	PR
1	4	0.204
2	6	0.204
3	40	0.1785
4	XXXXXXXXXX	0.1785

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

(1) This form appears when the 'Layer' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can also use the up and down arrow keys to make the entry effective. Note that the dotted rectangle is now in the upper left cell, so you can type in the data right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you

OK

Gambar 3. 8 Tampilan Layer

4. Interface

Dalam *interface* terdapat input data dari nilai NBOUND yang berfungsi mengatur ikatan lapisan perkerasan. Apabila NBOUND adalah (1), maka *interface* tidak bisa dibuka (*default*). Apabila NBOUND adalah (2) maka Tampilan menu *interface* dapat di lihat pada Gambar 3. 9.

Type of Interface for Data Set No. 1

Interface No.	INT
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0

(1) This form appears when the 'Interface' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of interfaces on this form is equal to $NL - 1$, where NL is specified in the 'General' menu.

(2) INT (condition of each interface): Assign 1 for bonded interface and 0 for frictionless interface.

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow key.

(4) You cannot delete or add a line on this form.

(5) If you want to print this text, you can click the print button below at the left corner of this textbox.

(6) Upon completion, click the 'OK'

Print

OK

Gambar 3. 9 Tampilan Interface

5. *Moduli*

Data yang ditampilkan dalam menu *moduli* ini bergantung dari nilai *input* NPY yang didapat dari menu *general* sebagaimana pada Gambar 3. 6 di halaman sebelumnya. *Moduli* dapat menampung hingga sebanyak 12 periode. Tampilan menu *moduli* dapat dilihat pada Gambar 3. 10 dan Gambar 3. 11 berikut.

Layer Modulus of each period for Data Set No. 1

Period1 input

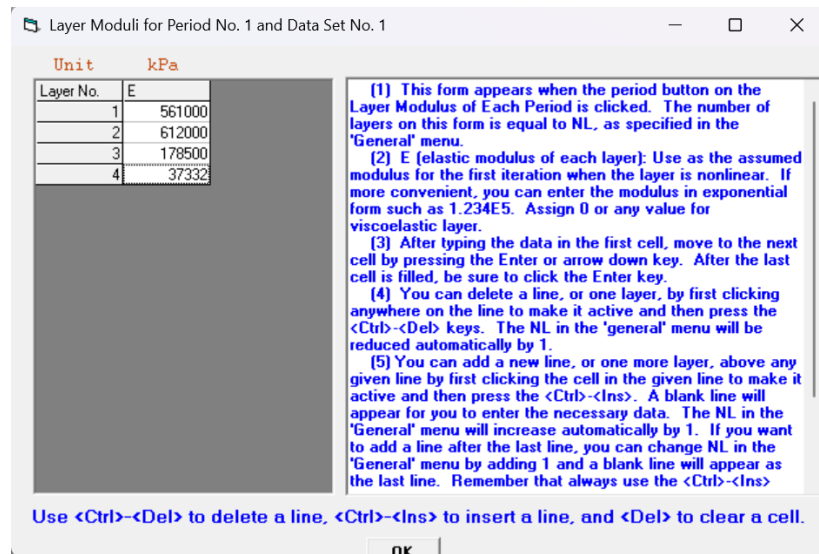
(1) This form appears when the 'Moduli' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of periods on this form is equal to NPY, as specified in the 'General' menu. The 12 buttons on the form indicates that a maximum of 12 periods may be used. However, only the periods being actually specified are marked with the period number on the button.

(2) Below the period button is a label showing 'input' in red, indicating that there are no defaults and you must enter the elastic modulus for each layer. After the data are entered, the letter 'input' will be changed to 'done'.

(3) Now you can click the Period1 button to enter the data. After the data for all periods are entered, as indicated by 'done' under each period button, click OK to return to the Main Menu of LAYERINP.

OK

Gambar 3. 10 Tampilan Moduli

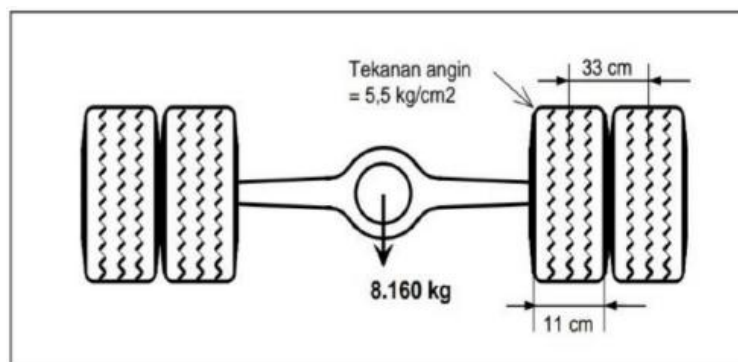


Gambar 3. 11 Tampilan *Period*

Untuk memodelkan perilaku lapisan elastis pada perkerasan jalan, diperlukan data masukan berupa nilai tegangan, regangan, serta respons struktur terhadap beban yang bekerja. Adapun parameter-parameter yang digunakan adalah sebagai berikut.

6. *Load*

Load memiliki nilai berupa jumlah unit yang di dapat dari nilai NLG yang didapat dari menu *general* sebagaimana pada Gambar 3. 6. Parameter yang penting pada menu *load* adalah mengenai sumbu standar atau sumbu tunggal beroda ganda seperti pada Gambar 3. 12 berikut.



Gambar 3. 12 Konfigurasi Sumbu Standar

(Sumber: Sukirman, 2010)

Dalam menu *load*, terdapat *load group No*, *load*, *CR*, *CP*, *YW*, *XW*, dan *nr* or *NPT*. Pada menu *load*, terdapat kolom yang harus diisi. Pada bagian *load*, angka (0) menunjukkan kendaraan dengan sumbu roda tunggal, angka (1) untuk sumbu tunggal roda ganda, angka (2) untuk sumbu tandem, dan angka (3) untuk sumbu triple. Kolom *CR* merupakan jari-jari area kontak beban, sedangkan kolom *CP* berisi nilai pembebanannya. Kolom *YW* dan *XW* menggambarkan jarak antar roda pada arah Y dan X. Sementara itu, *NR* atau *NPT* adalah titik koordinat yang digunakan untuk menganalisis tegangan dan regangan. Tampilan menu *load* dapat dilihat pada Gambar 3. 13 berikut.

Load Information for Data Set No. 1

Double click anywhere on a line to get auxiliary form for NR or NPT.

Unit	cm	kPa	cm	cm	
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	XW
1	1	11	550	33	0

NR or NPT 3

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

(1) This form appears when the 'Load' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of lines, or load groups, is equal to NLG, as specified in the 'General' menu. Please refer to Figure 3.8 for wheel and axle arrangements.

(2) LOAD (type of loading): Assign 0 for single axle with single tire, 1 for single axle with dual tires, 2 for tandem axles, and 3 for tridem axles.

(3) CR (contact radius of circular loaded ares).

(4) CP (contact pressure on circular loaded ares).

(5) YW (center to center spacing between two dual wheels along the y axis): Assign 0 if there is only one wheel or LOAD = 0.

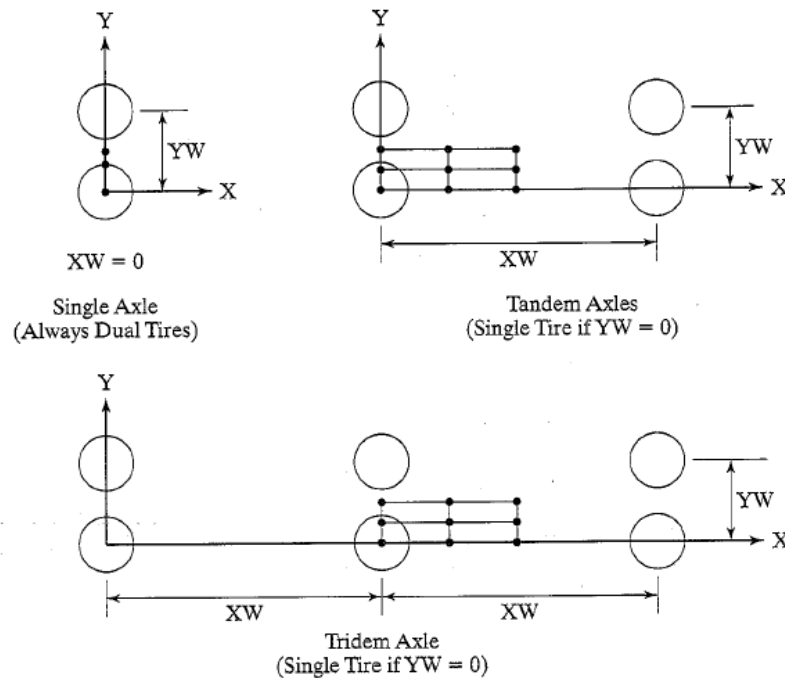
(6) XW (center to center spacing between two axles along the x axis): Assign 0 if only one axle exists, i.e. LOAD = 0 or 1.

(7) NR (number of radial coordinates to be analyzed under a single wheel, maximum 25): A single

OK

Gambar 3. 13 Tampilan Menu *Load*

Mengacu pada *plan view of multiple wheels* yang dijelaskan oleh Huang (2004) Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 3. 14. Berdasarkan gambar tersebut, terdapat tiga titik koordinat pada arah *x* dan *y* yang perlu ditentukan secara spesifik untuk kasus sumbu tunggal beroda ganda sebelum proses analisis.



Gambar 3. 14 Plan View of Multiple Wheels

(Sumber: Huang, 2004)

Titik-titik tersebut merepresentasikan konfigurasi sumbu standar dari Bina Marga, yang kemudian koordinat tersebut digunakan sebagai data *input* dalam analisis NPT.

7. Tampilan menu Viskoelastik

Parameter yang terdapat pada viskoelastik adalah sebagai berikut.

a. *Viskoelastic General*

Parameter yang harus dimasukkan pada menu *viskoelastic general* merupakan data dasar yang menggambarkan karakteristik umum dari lapisan viskoelastis yang akan dianalisis. Gambar pada menu *viskoelastic general* dapat dilihat pada Gambar 3. 15.

Viscoelastic General Information for Data Set No. 1

Load duration (0 for stationary load, 0.1 sec for moving load at 40 mph)	(DUR)	0.1
Number of viscoelastic layers	(NVL)	2
Number of time durations for creep compliances	(NTYME)	11

(1) This form appears when the 'General' menu of the Viscoelastic Layers Menu is clicked.
 (2) Default values for DUR and NTYME are provided for analysis involving moving loads. For stationary Loads, DUR should be changed to 0 and NTYME may be any value. Note that NTYME for moving loads is the number of times at which creep compliances are provided, while NTYME for stationary loads is not only the number of times at which creep compliances are provided but also the times at which the results are desired. Note also that default NVL is 1 and may need to be changed, as indicated in red. A maximum NVL of 12 may be used.
 (3) after completion, click OK to return to the Viscoelastic Layers Menu.

OK

Gambar 3. 15 Tampilan *Viscoelastic General*

1) *Load Duration (DUR)*

Nilai (0) jika beban tidak bergerak, dan nilai (0.1) jika beban bergerak dengan kecepatan 40 mph.

2) *Number of Viscoelastic (NVL)*

Jumlah lapisan perkerasan viskoelastik.

3) *Number of Time Duration for Creep Compliances (NTYME)*

Jumlah waktu untuk perhitungan *creep compliances*.

b. *Time Durations*

Data parameter yang harus dimasukan pada menu *time durations* berupa nilai waktu, yang nilainya disesuaikan dengan data waktu yang telah dimasukkan pada kolom *NTYME* di menu *Viscoelastic general*. Tampilan *time durations* dapat dilihat pada Gambar 3. 16 berikut.

Time Durations of Creep Compliances for Data Set No. 1

Unit sec

Sequence	TYME
1	.001
2	.003
3	.01
4	.03
5	.1
6	.3
7	1
8	3
9	10
10	30
11	100

(1) This form appears when the 'Duration' menu on the Viscoelastic Layers Menu is clicked. The number of time sequences on this form is equal to NTYME, as specified in the Viscoelastic General Information.

(2) TYME (times at which creep compliances are to be specified). For moving load, the 11 default times from 0.001 to 100 sec should be used, if possible, so the creep compliances can be computed more accurately from one temperature to the other over a wide range, when needed. For stationary load without temperature conversion, any TYME duration may be used.

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one time sequence, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NTYME in the Viscoelastic General Information will be reduced automatically by 1.

(5) You can add a new line, or one more sequence, above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NTYME in the Viscoelastic General Information will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NTYME in the Viscoelastic General

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Gambar 3. 16 Tampilan *Time Durations*c. *Viskoelastic Layer*

Parameter yang harus dimasukkan pada menu *Viscoelastic Layer* meliputi nilai Beta (β) dan suhu. Beta (β) merupakan *time-temperature shift factor* yang digunakan untuk menyesuaikan nilai *creep compliance* terhadap kondisi suhu. Tampilan *Viscoelastic Layer* dapat dilihat pada Gambar 3. 17.

Viscoelastic Layer Information for Data Set No. 1

After typing the value in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.

Unit per C C

Sequence	LAYNO	BETA	TEMPREF
1	1	0.113	25
2	2	0.113	25

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

(1) This form appears when the 'Layer' menu on the Viscoelastic Layers Menu is clicked. The number of viscoelastic layers on this form is equal to NVL, as specified in the Viscoelastic General Information. Note that the cursor is now in the upper left cell, as indicated by the dotted rectangle, so you can type in the data right away. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. After finishing reading, you should click the cell before typing in the data.

(2) LAYNO (layer number in the layer system which is viscoelastic).

(3) BETA (temperature shift coefficient): This factor is obtained from the slope of the time-temperature shift factor versus temperature on a semilog plot.

OK

Gambar 3. 17 Tampilan *Viscoelastic Layer*

d. *Creep Compliance*

Jumlah lapisan perkerasan yang memerlukan *input creep compliance* akan mengikuti nilai NVL yang sebelumnya dimasukkan pada menu *Viscoelastic general*. Tampilan menu *creep* setelah dimasukkan data dapat dilihat pada Gambar 3. 18 dan Gambar 3. 19. Pengukuran *creep compliance* mengacu pada 11 durasi waktu pengamatan, yaitu 0,001; 0,003; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10; 30; dan 100 detik sebagaimana direkomendasikan oleh FHWA. Penentuan nilai *creep compliance* untuk proses *input* pada *Layernip* mengacu pada Persamaan 3.27 berikut.

$$D(t) = \frac{1}{E} (1 - e^{-0,833t}) \quad (3.27)$$

dengan:

$D(t)$ = *Creep compliance*

t = Durasi waktu

E = Modulus elastisitas tiap lapisan

e = Konstanta e

Creep Compliances of Layer No. 1 for Data Set No. 1

Unit per kPa

TYME	CREEP
.001	0
.003	0
.01	0
.03	0
.1	0
.3	0
1	0
3	0
10	0
30	0
100	0

(1) This form appears when the layer button on the Creep Compliances of Each Layer is clicked. The number of creep compliances on this form is equal to NTYME, as specified in the Viscoelastic General Information. Note that TYME is the time at which the creep compliance is needed, as specified in the 'Duration' menu.

(2) CREEP [creep compliances of the viscoelastic layer at the reference temperature]. If more convenient, you can enter the creep compliances in exponential form such as 1.325e-5.

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NTYME in the Viscoelastic General Information will be reduced automatically by 1.

(5) You can add a new line above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NTYME in the Viscoelastic General Information menu will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NTYME in the Viscoelastic General Information by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Gambar 3. 18 Tampilan *Creep Compliance Layer 1*

Creep Compliances of Layer No. 2 for Data Set No. 1

Unit per kPa

TYME	CREEP
.001	0
.003	0
.01	0
.03	0
.1	0
.3	0
1	0
3	0
10	0
30	0
100	0

(1) This form appears when the layer button on the Creep Compliances of Each Layer is clicked. The number of creep compliances on this form is equal to NTYME, as specified in the Viscoelastic General Information. Note that TYME is the time at which the creep compliance is needed, as specified in the 'Duration' menu.

(2) CREEP (creep compliances of the viscoelastic layer at the reference temperature). If more convenient, you can enter the creep compliances in exponential form such as 1.325e-5.

(3) After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NTYME in the Viscoelastic General Information will be reduced automatically by 1.

(5) You can add a new line above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NTYME in the Viscoelastic General Information menu will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NTYME in the Viscoelastic General Information by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Gambar 3. 19 Tampilan Creep Compliance Layer 2

e. *Temperature of Each Layer*

Pada menu *temperature of each Layer*, data yang harus dimasukkan berupa nilai suhu yang dijadikan acuan dalam proses analisis. Tampilan *temperature of each Layer* dapat dilihat Gambar 3. 20.

Temperature of Each Layer for Period No. 1 and Data Set No. 1

Unit C

Layer No.	TEMP
1	25
2	25

(1) This form appears when the period button on the Layer Temperature of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NVL, as specified in the Viscoelastic General Information.

(2) TEMP (Pavement temperature of each viscoelastic layer).

(3) After typing the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

(4) You can delete a line, or one layer, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NVL in the Viscoelastic General Information will be reduced automatically by 1.

(5) You can add a new line, or one more layer, above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NVL in the Viscoelastic General Information will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NVL in the Viscoelastic General Information by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that always use the <Ctrl>-<Ins> keys to add a line unless the line to be added is the last line. By so doing, you don't have to retype any of the existing lines.

(6) Upon completion, click the OK button to return to the

Use <Ctrl>- to delete a line, <Ctrl>-<Ins> to insert a line, and to clear a cell.

OK

Gambar 3. 20 Tampilan Temperature of Each Layer

3.10.3 Analisis Kerusakan dalam Perkerasan Jalan

Kerusakan struktur perkerasan jalan akibat terjadinya beban lalu lintas, dapat dianalisis berdasarkan hasil *output* program *KENPAVE* yang berupa *horizontal strain* (ϵ_t) dan *vertical strain* (ϵ_c) menurut Lia dan Mahardi (2022). Kerusakan akibat beban lalu lintas tergolong dalam beberapa jenis, antara lain sebagai berikut.

1. Retak Lelah (*Fatigue Cracking*)

Fatigue cracking (Nf) ini mencakup proses perkembangan dari dasar akibat pembebanan berulang yang terus-menerus. Kegagalan jenis ini biasanya terdeteksi ketika permukaan perkerasan telah mengalami keretakan menyeluruh dengan tingkat keparahan tinggi. Nf dapat dihitung berdasarkan pada Persamaan 3.28 berikut.

$$N_f = 0,0796 \times \epsilon_t^{-3,921} \times E^{-0,854} \quad (3.28)$$

dengan:

Nf = Total nilai beban pengulangan yang diperbolehkan untuk mengontrol *fatigue Cracking (ESAL)*,

ϵ_t = *Tensile strain* pada lokasi tinjauan kritis yang dihitung atas respons model struktur atau regangan tarik pada bagian bawah lapis permukaan (cm), dan

E = Modulus elastisitas pada lapisan permukaan (KPa).

2. Retak Alur (*Rutting*)

Rutting (Nr) terjadi akibat ketidakmampuan lapisan beraspal dalam menahan regangan horizontal yang timbul akibat beban lalu lintas berulang, di mana nilai regangan yang terjadi telah melebihi batas maksimum yang dapat diterima menurut Rahmawati dkk. (2018). Nr dapat dihitung berdasarkan pada Persamaan 3.29 berikut.

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon_c^{-4,477} \quad (3.29)$$

dengan:

Nr = Total nilai repetisi beban yang diperbolehkan untuk mengontrol *rutting (ESAL)* dan

ε_c = Regangan tekan vertikal di atas lapisan dasar (cm).

3. Deformasi Permanen (*Permanent Deformation*)

Permanent deformation (Nd) dapat dihitung berdasarkan pada Persamaan 3.32 berikut.

$$Nd = 1,365 \times 10^{-9} \times \varepsilon_c^{-4,477} \quad (3.30)$$

dengan:

Nd = Total nilai repetisi beban yang diperbolehkan untuk mengontrol deformasi (*ESAL*) dan

ε_c = Regangan tekan vertikal di atas lapisan dasar (cm).

3.11 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) merupakan salah satu metode analisis data yang dapat diterapkan dalam penelitian. Teknik analisis statistik inferensial ini memungkinkan peneliti untuk menganalisis beberapa variabel secara bersamaan sehingga hubungan serta pengaruh antar komponen variabel dapat diketahui secara simultan (Pursitasari dkk., 2024). *One-Way MANOVA* merupakan metode analisis yang digunakan untuk membandingkan vektor rata-rata dari beberapa kelompok sampel secara simultan. Umumnya, analisis ini diterapkan pada tiga kelompok atau lebih, namun prosedurnya juga dapat digunakan untuk membandingkan dua kelompok sampel (Rencher, 2002).

Penelitian ini mengkaji analisis perkerasan *SMA* dengan penggunaan *filler BA* berdasarkan variasi metode pencampuran serta prediksi umur pelayanan, sehingga analisis data dilakukan menggunakan metode *One-Way MANOVA*. Pada penelitian ini, variabel terikat yang dianalisis meliputi karakteristik campuran *SMA*, yaitu karakteristik volumetrik, kekuatan struktur, dan durabilitas.

Tingkat kepercayaan yang digunakan sebesar 95% dengan taraf signifikansi 5%. Pemilihan tingkat kepercayaan tersebut bertujuan untuk memperoleh keseimbangan antara tingkat akurasi dan presisi hasil analisis dengan peluang kesalahan yang relatif kecil, namun tetap memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Selain itu, tingkat kepercayaan 95% juga merupakan standar yang umum digunakan

dalam penelitian sehingga memudahkan proses perbandingan dengan hasil penelitian terdahulu.

Kebutuhan dalam asumsi *one-way MANOVA* dapat dilihat pada langkah-langkah berikut ini.

1. Homogenitas Matriks Kovarians

Melalui uji Box's M, matriks kovarians variabel pada setiap kelompok harus homogen atau memiliki kesamaan. Hipotesis dalam uji Box's M dapat dilihat dalam Persamaan 3.31 hingga Persamaan 3.32 sebagai berikut.

$$H_0: \Sigma 1 = \Sigma 2 = \Sigma 3 \quad (3.31)$$

H_0 ini memiliki arti bahwa struktur matriks varians-kovarians dalam kelompok merupakan homogen.

$$H_1: \Sigma i \neq \Sigma j \quad (3.32)$$

Dimana $i \neq j$

H_1 memiliki arti bahwa ada perbedaan struktur matriks varians-kovarians antar kelompok pekerjaan.

Setelah seluruh uji asumsi dilakukan dan dinyatakan terpenuhi, analisis *One-Way MANOVA* dapat dilaksanakan untuk memperoleh kesimpulan penelitian. Adapun prosedur pengujian *One-Way MANOVA* adalah sebagai berikut:

1. Formula Hipotesis

Perumusan hipotesis dapat dilihat pada persamaan 3.31 dan 3.32 sebagai berikut.

$$H_0: T_1 = T_2 = \dots = T_g \quad (3.33)$$

$$H_1: \pi \neq 0 \neq \quad (3.34)$$

2. Analisis Data

Melakukan perhitungan *MANOVA* dengan menentukan matriks rerata dan matriks kovarians pada setiap kelompok, kemudian menghitung statistik uji menggunakan Wilks' Lambda. Uji Wilks' Lambda dipilih karena sesuai untuk digunakan pada analisis yang melibatkan dua atau lebih kelompok variabel

independen dengan asumsi homogenitas yang telah terpenuhi (Rencher, 2002).

3. Interpretasi hasil

Nilai Wilks' Lambda memiliki rentang antara 0-1. Semakin kecil nilai signifikansi (sig.) yang diperoleh, menunjukkan pengaruh antar variabel yang dianalisis semakin besar. Apabila hasil pengujian statistik menghasilkan nilai sig. $< 0,05$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima, yang menunjukkan adanya perbedaan multivariat secara signifikan antar kelompok pengujian. Sebaliknya, jika nilai sig. $> 0,05$ maka H_0 diterima sehingga tidak terdapat perbedaan multivariat yang signifikan antar kelompok.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Berkaitan dengan penelitian ini, metode eksperimental merupakan metode yang berbasis pada rangkaian pengujian dan observasi sistematis guna menghimpun data primer. Data yang telah terkumpul selanjutnya dilakukan olah data, lalu dianalisis secara mendalam untuk mendapatkan hasil penelitian, yang kemudian diverifikasi dan dievaluasi kesesuaiannya terhadap standar spesifikasi teknis yang relevan. Penelitian ini merujuk pada standar Direktorat Jenderal Bina Marga 2024 untuk analisis perkerasan dan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025 untuk pengujian.

4.2 Metode Pengambilan Sampel

Penelitian ini dilakukan dengan metode *non-probability sampling* dalam penggunaan sampel, melainkan menggunakan metode *purposive sampling*. Sampel yang akan digunakan harus sesuai dengan ketentuan dan spesifikasi yang diizinkan. Adapun tambahan *filler* merupakan BA yang diperoleh dari salah satu PLTU di Indonesia. Untuk jenis aspal, digunakan aspal dengan Pen 60/70. Pada analisis LHR digunakan penelitian pada Ruas Jalan bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh.

4.3 Metode Pengambilan Data

Penelitian ini menggunakan pengambilan data sekunder dan data primer yang didapatkan secara pengujian yang berlangsung.

4.3.1 Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari data LHR tahun 2024 pada Kawasan PLTU Semarang, Kec. Pauh, Kab. Sarolangun, Provinsi Jambi oleh Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Jambi dan data penelitian Rahayu (2024). Data sekunder yang digunakan berasal dari penelitian Rahayu (2024) meliputi rencana gradasi campuran *SMA*, adapun data hasil pengujian yaitu

karakteristik aspal, berat jenis *filler*, agregat halus clereng, agregat kasar, *VCA* dan nilai KAO. Untuk komparasi hasil uji, mengambil data karakteristik volumetrik campuran (*VITM*, *VFWA*, *VMA*, dan *density*), data satu tahap karakteristik kekuatan struktur (*stability*, *flow*, *MQ*, *ITS* dan *CL*), dan data karakteristik durabilitas campuran aspal (*IRS*, *TSR* dan *DD*).

4.3.2 Data Primer

Data Primer dalam penelitian ini meliputi data *Marshall Standard (MS)*, *CL*, *IRS*, *ITS*, *TSR* dan *DD* dengan metode dua tahap dan tiga tahap. Selanjutnya melakukan analisis *Sbit* dan *Smix*. Nilai *Smix* merupakan nilai modulus yang akan digunakan dalam perhitungan. *SMA* kasar memiliki partikel agregat ukuran maksimum sebesar 25 mm. *SMA* kasar lebih memiliki kemiripan dengan *AC* lapis antara (*AC-BC*) yang mempunyai ukuran agregat maksimum 25,4 mm. Berdasarkan hal tersebut, *SMA* kasar digunakan sebagai pengganti lapis *AC-BC*. Tahap selanjutnya adalah analisis prediksi umur pelayanan berdasarkan tebal perkerasan yang didapat menggunakan *Software KENPAVE* dengan pemodelan viskoelastik beserta analisis kerusakan yang mungkin dapat terjadi.

4.4 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan data sekunder untuk merencanakan pembuatan campuran dua tahap dan tiga tahap pada penelitian sebelumnya. Adapun data sekunder oleh Rahayu (2024) adalah sebagai berikut.

4.4.1 Data Sekunder Untuk Perencanaan Campuran

Dalam merencanakan campuran benda uji *SMA* kasar dengan agregat maksimum 25 mm acuan data sekunder berupa sebagai berikut.

1. Data sekunder pengujian karakteristik aspal

Rekapitulasi pengujian karakteristik aspal dapat dilihat pada Tabel 4. 1 berikut.

Tabel 4. 1 Data Sekunder Pengujian Aspal

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1.	Berat Jenis	$\geq 1,0$	1,040
2.	Penetrasi (mm)	60-70	66,30
3.	Daktilitas (cm)	≥ 100	164

Lanjutan Tabel 4. 1 Data Sekunder Pengujian Aspal

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
4.	Titik Lembek (°C)	≥ 48	48,5
5.	Titik Nyala (°C)	≥ 232	315
6.	Titik Bakar (°C)	≥ 232	320
7.	Kelarutan Pada <i>TCE</i> (%)	≥ 99	99,32

Sumber: Rahayu (2024)

2. Data sekunder pengujian karakteristik agregat

Pengujian karakteristik agregat terdiri dari pengujian *filler*, agregat halus, dan agregat kasar yang dapat dilihat pada Tabel 4. 2 hingga Tabel 4. 4 berikut.

Tabel 4. 2 Data Sekunder Pengujian Berat Jenis *Filler*

No.	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis <i>bottom ash</i> batu bara	-	2,506
2	Berat jenis debu batu	-	2,556

Sumber: Rahayu (2024)

Tabel 4. 3 Data Sekunder Pengujian Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Hasil
1	Berat jenis	$\geq 2,5$	2,7
2	Penyerapan agregat terhadap air (%)	≤ 2	1,42
3	<i>Sand equivalent</i> (%)	≥ 50	92,84

Sumber: Rahayu (2024)

Tabel 4. 4 Data Sekunder Pengujian Agregat Kasar

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

Sumber: Rahayu (2024)

3. Komposisi gradasi agregat.

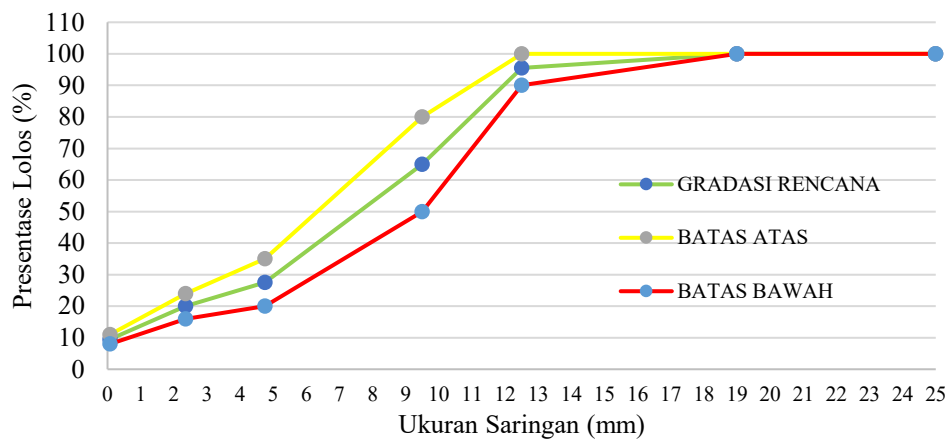
Perencanaan gradasi agregat dapat dilihat pada Tabel 3. 4 pada halaman sebelumnya. Komposisi gradasi agregat dari campuran *SMA* 25 mm merujuk penelitian Rahayu (2024) yang dapat dilihat pada Tabel 4. 5 berikut

Tabel 4. 5 Gradasi Campuran SMA 25 mm

Ukuran Saringan		Spesifikasi		Persen Agregat (%)		Berat Tertahan (gr)	
Inchi	mm	Min.	Max.	Lolos	Tertahan	Tertahan	Jumlah
1"	25	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00	0,00
3/4	19	90,00	100,00	95,00	5,00	56,16	56,16
1/2	12,5	50,00	88,00	69,00	26,00	292,03	348,19
3/8	9,5	25,00	60,00	42,50	26,50	297,65	645,84
# 4	4,75	20,00	28,00	24,00	18,50	207,79	853,63
# 8	2,36	16,00	24,00	20,00	4,00	44,93	898,56
# 200	0,075	8,00	11,00	9,50	10,50	117,94	1016,50
Pan		0,00	0,00	0,00	9,50	106,70	1123,20

Sumber: Rahayu (2024)

Berdasarkan Tabel 4. 5 maka didapatkan gradasi campuran SMA 25 mm dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 4. 1 berikut.

**Gambar 4. 1 Grafik Gradasi SMA 25 mm**

(Sumber: Rahayu, 2024)

4. Data sekunder Kebutuhan berat *filler*

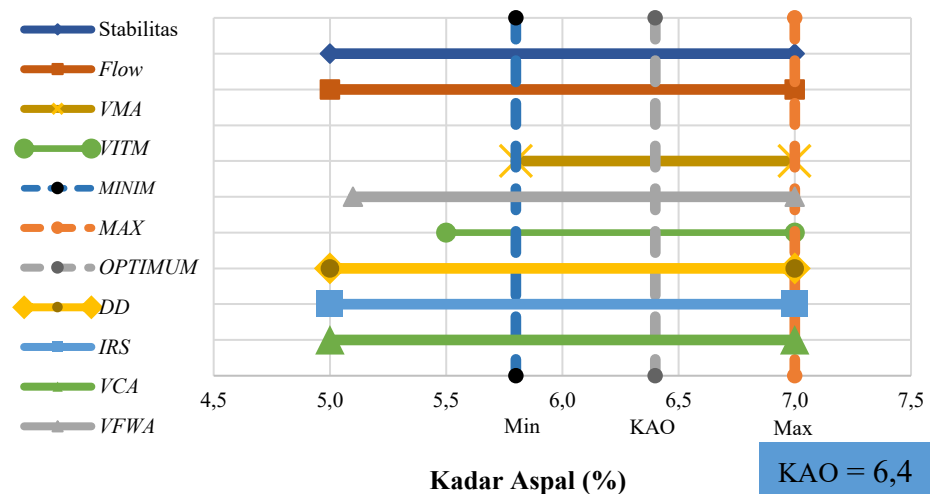
Pada penelitian ini kadar substitusi dan berat *filler* merujuk pada hasil penelitian Rahayu (2024). Kadar substitusi *filler* BA digunakan sebesar 50% yang di mana merupakan kadar substitusi *filler* optimum yang setara dengan berat 52,31 gram setelah disetarakan berat jenis BA dengan berat jenis abu batu. Adapun kadar abu batu sehingga digunakan sebesar 50% yang setara dengan berat 53,35 gram. Perbedaan berat BA dan abu batu ini dikarenakan perbedaan nilai berat jenis.

5. Kebutuhan serat selulosa

Kadar serat selulosa yang harus ditambahkan pada setiap benda uji adalah 0,3% terhadap total berat keseluruhan campuran yaitu sebesar 3,6 gram.

6. Data sekunder Nilai KAO

KAO merupakan kadar aspal yang mampu menghasilkan nilai paling baik pada campuran perkerasan. Besarnya nilai KAO dapat dipengaruhi oleh beberapa aspek seperti porositas agregat, jumlah total tumbukan saat proses pemadatan, serta nilai parameter-parameter *Marshall*.



Gambar 4. 2 Kadar KAO dengan Substitusi *Filler Bottom Ash*

(Sumber: Rahayu, 2024)

Digunakan kadar aspal berdasarkan nilai KAO yaitu sebesar 6,4% yang mengacu pada hasil penelitian Rahayu (2024). Nilai KAO sebesar 6,4% setara dengan 76,8 gram aspal yang akan digunakan sebagai kadar aspal untuk pengujian campuran yang akan dilaksanakan.

7. Rekapitulasi Pengujian Karakteristik *SMA*

Rekapitulasi pengujian karakteristik *SMA* mulai dari volumetrik, kekuatan struktur, dan durabilitas campuran menggunakan metode pencampuran satu tahap mengacu hasil penelitian Rahayu (2024) adalah sebagai berikut dapat dilihat pada Tabel 4. 6 hingga Tabel 4. 8 sebagai berikut.

Tabel 4. 6 Karakteristik Volumetrik Metode Pencampuran Satu Tahap

Metode	<i>VITM</i> (%)	<i>VFWA</i> (%)	<i>VMA</i> (%)	<i>Density</i> (gr/cc)
Satu tahap	4,163	76,927	17,930	2,237
Spesifikasi	3-5	-	>17	-

Sumber: Rahayu (2024)

Tabel 4. 7 Karakteristik Kekuatan Struktur Metode Pencampuran Satu Tahap

Metode	<i>Stability</i> (kg)	<i>Flow</i> (mm)	<i>MQ</i> (kg/mm)	<i>ITS</i> (KPa)	<i>CL</i> (%)
Satu tahap	1020,529	2,767	368,879	821,966	4,990
Spesifikasi	>600	2-4,5	-	-	<20

Sumber: Rahayu (2024)

Tabel 4. 8 Karakteristik Durabilitas Metode Pencampuran Satu Tahap

Metode	<i>IRS</i> (%)	<i>TSR</i> (%)	<i>DD</i> (%)
Satu tahap	97,010	91,910	0,119
Spesifikasi	>90	>80	<0,3

Sumber: Rahayu (2024)

4.4.2 Kebutuhan Benda Uji

Tahap pertama dalam pembuatan benda uji adalah mengklasifikasikan kebutuhan benda uji. kebutuhan jumlah benda uji dapat dilihat pada Tabel 4. 9 berikut.

Tabel 4. 9 Jumlah Benda Uji

Pengujian	Kadar <i>Filler BA</i> Batubara 50%	
	Metode Dua Tahap	Metode Tiga Tahap
<i>MS</i>	3	3
<i>IRS</i>	3	3
<i>ITS</i>	3	3
<i>TSR</i>	3	3
<i>DD</i>	3	3
<i>CL</i>	3	3
Jumlah Benda Uji Setiap Metode	18	18
Total Seluruh Benda Uji	36	

Berdasarkan Tabel 4. 9 didapatkan total benda uji dalam penelitian ini sebanyak 36 buah dengan berat material masing-masing yang didapatkan dari data sekunder.

4.4.3 Pembuatan Variasi Campuran Untuk Benda Uji

Pembuatan campuran benda uji dilakukan setelah tahap perencanaan campuran selesai, diawali dengan proses penyaringan agregat untuk memisahkan gradasi sesuai nomor saringan yang digunakan. Agregat yang tertahan pada masing-masing saringan kemudian ditimbang. Adapun tahapan pembuatan campuran benda uji adalah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan alat dan bahan pengujian
2. Memanaskan aspal pen 60/70 hingga suhu 160°C
3. Memanaskan campuran yang telah dibuat per bagian (metode dan pengujian) dengan serat selulosa hingga suhu 170°C. Dalam penelitian ini, perlu diperhatikan perbedaan pencampuran antara metode satu tahap, metode dua tahap, dan metode tiga tahap sebagai berikut.
 - a. Metode campuran satu tahap dilakukan dengan mencampurkan agregat kasar, agregat halus, dan *filler* secara bersama-sama, kemudian menambahkan serat selulosa dan terakhir menambahkan aspal sesuai KAO ke dalam campuran.
 - b. Metode campuran dua tahap dilakukan dengan menggabungkan agregat kasar kemudian serat selulosa terlebih dahulu bersama aspal sesuai KAO, kemudian tahap berikutnya dilanjutkan dengan mencampurkan agregat halus dan *filler* ke dalam campuran tersebut.
 - c. Metode campuran tiga tahap dimulai dengan mencampurkan agregat kasar kemudian serat selulosa dengan aspal sesuai KAO, dan dilanjutkan dengan penambahan *filler*, dan pada tahap terakhir dicampurkan agregat halus.
4. Cetakan benda uji (*mold*) dibersihkan terlebih dahulu, kemudian bagian dalamnya dilapisi dengan oli.
5. Kertas minyak yang telah dipotong sesuai ukuran cetakan diletakkan pada bagian dasar, kemudian campuran benda uji yang telah homogen dimasukkan sebanyak $\pm 1/3$ volume cetakan dan ditusuk menggunakan spatula sebanyak 25 kali. Proses ini dapat diulangi hingga cetakan terisi penuh, kemudian kertas ditambahkan lagi pada bagian atas benda uji.

6. Cetakan berisi campuran kemudian diposisikan di atas mesin pemadat, kemudian alat pemadat dilakukan secara manual sebanyak 50 kali tumbukan pada masing-masing sisi.
7. Setelah proses pemadatan selesai, cetakan berisi benda uji dikeluarkan dari mesin, lalu melepaskan kertas minyak dan dibiarkan beberapa saat hingga suhu tidak terlalu panas.
8. Benda uji dilepaskan dari cetakan menggunakan *ejector hydraulic pump*, kemudian dibiarkan selama beberapa waktu dan kertas pada kedua sisinya diambil.

4.4.4 Pengujian *Marshall Standard (MS)*

Pengujian pencampuran aspal dengan Metode *Marshall* dilaksanakan untuk menghasilkan benda uji berupa campuran *SMA*. Proses ini merupakan bagian dari rangkaian pengujian campuran aspal menggunakan pendekatan *Marshall*. Parameter dari *MS* adalah stabilitas, *flow*, *MQ*, *density*, *VITM*, *VMA*, dan *VFWA*. Berikut merupakan langkah-langkah pengujian dengan metode *MS*.

1. Menyiapkan alat dan benda uji yang digunakan.
2. Membersih benda uji dan kotoran dan debu yang menempel.
3. Memberikan tanda pada masing-masing benda uji agar memudahkan identifikasi.
4. Mengukur tinggi benda uji dengan ketelitian 0,1 mm menggunakan kaliper.
5. Menimbang berat benda uji (berat kering).
6. Merendam benda uji dalam air dengan waktu 24 jam pada suhu ruang untuk mendapatkan kejenuhan (air masuk sempurna dalam pori benda uji) .
7. Menimbang berat benda uji dalam air untuk mendapatkan berat dalam kondisi SSD.
8. Menempatkan benda uji ke dalam *waterbath* pada suhu 60°C selama 30 menit.
9. Mengecek kondisi alat *Marshall Test* beserta dial pendukungnya, lalu menyiapkan *breaking head* yang telah dilumasi kertas minyak.

10. Mengeluarkan benda uji dari *waterbath* dan menempatkannya pada *breaking head*, kemudian memasang dial *flow* serta menaikkan *breaking head* hingga benda uji menyentuh cincin pengujian.
11. Mengatur posisi jarum pada dial stabilitas dan dial *flow* ke angka “0”.
12. Menyalakan mesin dan memperhatikan proses pembebanan hingga dial stabilitas menunjukkan nilai puncak.
13. Mencatat hasil pembacaan dari dial stabilitas dan dial *flow*.

4.4.5 Pengujian *IRS*

Pengujian *IRS* dilaksanakan melalui tahapan berikut:

1. Membersihkan benda uji dari sisa kotoran dan debu yang masih menempel setelah proses pembuatan sampel.
2. Mengukur tinggi benda uji pada tiga titik menggunakan kaliper, kemudian menimbang benda uji dalam kondisi kering udara.
3. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* bersuhu 60°C selama 24 jam.
4. Melakukan serangkaian pengujian *Marshall* yang telah dijelaskan pada sub bab 4.4.2

4.4.6 Pengujian *ITS*

Prosedur pengujian *ITS* dilakukan melalui tahapan berikut:

1. Menyiapkan seluruh alat dan material yang dibutuhkan.
2. Membuat benda uji sesuai perencanaan dengan menggunakan KAO.
3. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* bersuhu 60°C selama 30 menit.
4. Menempatkan benda uji pada alat uji *ITS*.
5. Menyalakan mesin uji, mengamati pembacaan dial selama pembebanan berlangsung, dan mencatat hasil pengujian.

4.4.7 Pengujian *TSR*

Prosedur pengujian *TSR* mengacu pada SNI 8129:2015 dan dilaksanakan sebagai berikut:

1. Menyiapkan seluruh peralatan dan material yang akan dipakai.
2. Membuat benda uji sesuai rancangan campuran menggunakan nilai KAO .
3. Merendam benda uji dalam *waterbath* pada suhu 60°C selama 24 jam. Selanjutnya mendiamkan benda uji dengan suhu ruang selama 24 jam.

4. Menempatkan benda uji pada mesin uji *TSR*.
5. Menyalakan mesin uji, mengamati pembacaan dial, dan mencatat hasil yang diperoleh.

4.4.8 Pengujian *CL*

Pengujian *CL* dilaksanakan melalui langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menyiapkan material yang akan diuji.
2. Menimbang benda uji untuk memperoleh berat awal sebelum proses abrasi (M_o).
3. Meletakkan benda uji ke dalam mesin Los Angeles tanpa menggunakan bola baja.
4. Mengoperasikan mesin dengan kecepatan 30–33 rpm dengan jumlah 300 putaran.
5. Setelah putaran selesai, mengeluarkan benda uji dari mesin dan melakukan penimbangan kembali untuk mendapatkan berat akhir setelah abrasi (M_i).

4.4.9 Pengujian *DD*

Pengujian *DD* mengacu pada ketentuan AASHTO T 305-14 dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan.
2. Menyiapkan nampan yang dilapisi dengan *aluminium foil* kemudian timbang beratnya.
3. Memasak benda uji sesuai dengan KAO.
4. Menuang benda uji dan meratakannya ke dalam nampan yang dilapisi dengan *aluminium foil* kemudian timbang beratnya.
5. Memasukkan benda uji ke dalam oven dengan temperatur 160°C selama 60 menit.
6. Mengeluarkan benda uji dengan cara dituang.
7. Melakukan penimbangan piring aluminium yang menampung lelehan *mastic* atau aspal dengan tingkat ketelitian 0,1 gram.

4.5 Analisis Data

Setelah seluruh rangkaian pengujian dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data untuk memperoleh parameter hasil uji dengan perhitungan.

4.5.1 Analisis *Marshall Standard*

Parameter-parameter yang diperoleh dari hasil pengujian *Marshall* adalah sebagai berikut:

1. Berat benda uji dalam kondisi kering udara (gram),
2. Berat benda uji saat ditimbang di dalam air (gram),
3. Berat benda uji dalam kondisi SSD (gram),
4. Ketebalan benda uji (mm),
5. Hasil pembacaan dial stabilitas (kg), dan
6. Hasil pembacaan dial *flow* (mm).

4.5.2 Analisis Karakteristik Kekuatan Struktur Campuran Aspal

Parameter karakteristik volumetrik campuran antara lain adalah sebagai berikut.

1. Nilai *VITM* pada penelitian ini dapat menggunakan Persamaan 3.1 hingga Persamaan 3.2,
2. Nilai *VFWA* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 3.3 hingga Persamaan 3.7,
3. Nilai *VMA* pada penelitian ini menggunakan Persamaan 3.8, dan
4. Nilai *Density* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 3.19 hingga Persamaan 3.10.

4.5.3 Analisis Karakteristik Volumetrik Campuran Aspal

Parameter karakteristik volumetrik campuran antara lain adalah sebagai berikut.

1. Nilai stabilitas yang akan dilakukan pada pengujian ini, diperoleh menggunakan Persamaan 3.11,
2. Nilai *flow* dapat diperoleh dengan membaca dial *flow*,
3. Nilai *MQ* diperoleh menggunakan Persamaan 3.12,
4. Penentuan *ITS* dilakukan melalui penerapan Persamaan 3.13, dan
5. Pengujian *CL* dapat diperoleh melalui Persamaan 3.14.

4.5.4 Analisis Karakteristik Durabilitas Campuran Aspal

Parameter karakteristik durabilitas campuran antara lain adalah sebagai berikut.

1. Perhitungan pengujian *IRS* mengacu pada Persamaan 3.15,
2. Penentuan *TSR* dilakukan dengan penerapan Persamaan 3.16, dan
3. *DD* ditentukan berdasarkan Persamaan 3.17.

4.5.5 Analisis Pengujian *SM*

Analisis nilai *SM* adalah sebagai berikut.

1. Penentuan *Sbit* dilakukan dengan penerapan Persamaan 3.18 hingga dengan Persamaan 3.20, dan
2. Penentuan *Smix* dapat diperoleh melalui Persamaan 3.23 hingga dengan Persamaan 3.24.

4.5.6 Analisis Prediksi Umur Pelayanan

Prediksi umur pelayanan mengacu pada Persamaan 3.25 hingga dengan Persamaan 3.30.

4.5.7 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

Analisis statistik *One-Way MANOVA* bertujuan untuk mengetahui perubahan yang terjadi akibat pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik campuran *SMA*. Langkah-langkah dalam metode *One-Way MANOVA* sebagai berikut.

1. Merumuskan Hipotesis

Hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) dirumuskan untuk mendapatkan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik campuran *SMA*. Variabel bebas pada penelitian ini adalah metode pencampuran yang terdiri atas metode satu tahap, dua tahap, dan tiga tahap. Sedangkan variabel terikat meliputi karakteristik volumetrik, kekuatan struktur, dan durabilitas. Adapun hipotesis yang digunakan diperoleh dari persamaan 3.31 dan 3.32

2. Mengumpulkan Data

Data penelitian dikumpulkan berdasarkan hasil pengujian karakteristik campuran *SMA* pada masing-masing variasi metode pencampuran.

Selanjutnya input *Variable View* pada *software* SPSS sesuai dengan variabel bebas dan variabel terikat. Kemudian seluruh data hasil pengujian dalam variabel terikat dimasukkan ke dalam *Data View* untuk dilakukan analisis statistik.

3. Uji Homogenitas Matriks Kovarians

Uji homogenitas dilakukan untuk mengetahui kesamaan variansi data antar kelompok pengujian. Uji ini menggunakan uji Box's M. Yang dapat dilihat pada Persamaan 3.31 dan 3.32.

4. Uji *One-Way MANOVA*

Uji *One-Way MANOVA* dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi metode pencampuran terhadap seluruh karakteristik campuran *SMA* secara simultan. Langkah-langkah pengujian sebagai berikut:

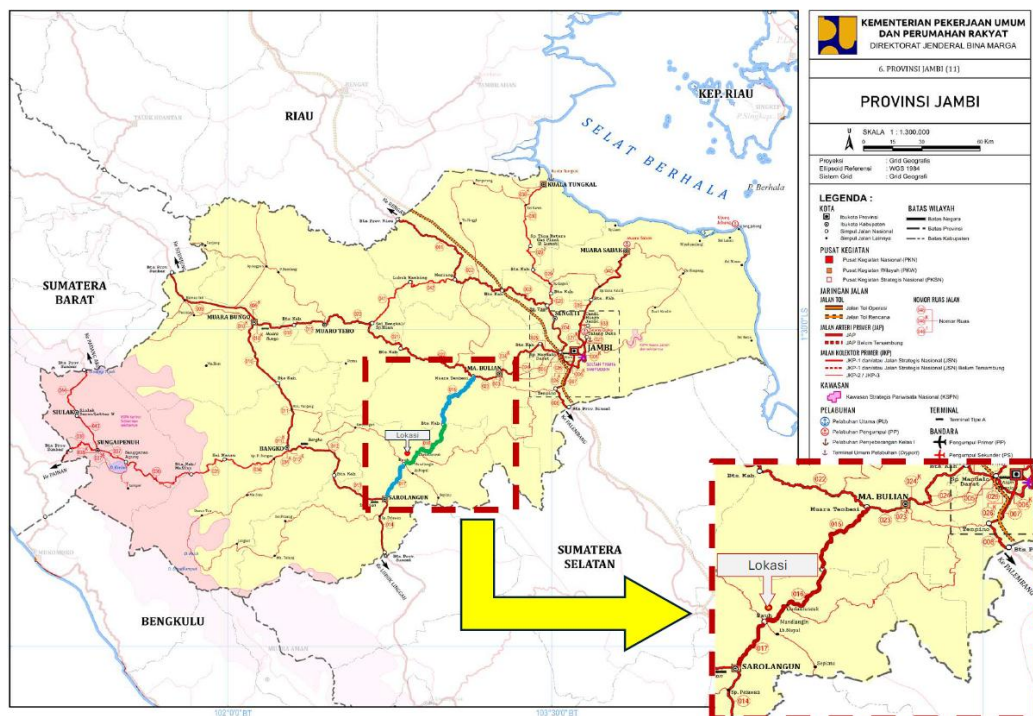
- a. Pilih menu *Analyze*, kemudian pilih *General Linear Model* dan *Multivariate*.
- b. Masukkan variabel terikat ke dalam *Dependent Variables*.
- c. Masukkan variabel bebas ke dalam *Fixed Factor(s)*.
- d. Pilih menu *Options*, kemudian centang *Descriptive Statistics*, *Estimate of Effect Size*, *Parameter Estimates* dan *Homogeneity Tests*.
- e. Pastikan *Significance level* adalah 0.05 sehingga *Confidence intervals* adalah 95%
- f. Klik *Continue* dan pilih *OK* untuk menampilkan hasil analisis *One-Way MANOVA*.
- g. Hasil pengujian dilihat pada nilai Sig. uji Wilks' Lambda. Jika nilai Sig. < 0,05 maka terdapat pengaruh signifikan variasi metode pencampuran terhadap karakteristik campuran *SMA*.

5. Kesimpulan Keputusan H0 dan H1

Kesimpulan pengujian statistik ditentukan berdasarkan nilai signifikansi (Sig.) hasil uji *One-Way MANOVA*. Apabila nilai Sig. < 0,05 maka H0 dinyatakan ditolak dan H1 diterima, sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan variasi metode pencampuran memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik campuran *SMA* antara lain karakteristik volumetrik

(*VITM*, *VFWA*, *VMA*, dan *Density*), karakteristik kekuatan struktur (*Stability*, *Flow*, *MQ*, *ITS*, dan *CL*), dan karakteristik durabilitas (*IRS*, *TSR*, dan *DD*). Sebaliknya, apabila nilai $\text{Sig.} > 0,05$ maka H_0 dinyatakan diterima dan H_1 ditolak, sehingga didapatkan variasi metode pencampuran tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik campuran SMA.

4.6 Pengumpulan Data Ruas jalan



Gambar 4. 3 Peta Studi Kasus
(Sumber: Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Jambi, 2025)

Digunakan data LHR bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh sebagai acuan perhitungan prediksi pelayanan. Data tersebut digunakan karena lokasinya yang strategis dengan wilayah PLTU sehingga diharapkan penelitian ini dapat bermanfaat dengan langkah awal analisis desain perkerasan pada lokasi yang dekat dengan sumber limbah *BA*.

Pengumpulan data kondisi ruas jalan dilakukan untuk proses analisis terkait perkiraan jenis kerusakan yang muncul seperti N_r , N_f , dan N_d serta prediksi umur pelayanan perkerasan jalan. Data tersebut nantinya menjadi dasar dalam proses simulasi penggunaan campuran perkerasan penelitian ini yaitu *SMA* kasar

berdasarkan variasi metode pencampuran. Pada penelitian ini proses analisis umur pelayanan perkerasan dilakukan dengan pemodelan viskoelastik melalui *Software KENPAVE*. Adapun data lalu lintas bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh terdapat pada Tabel 4. 10 berikut .

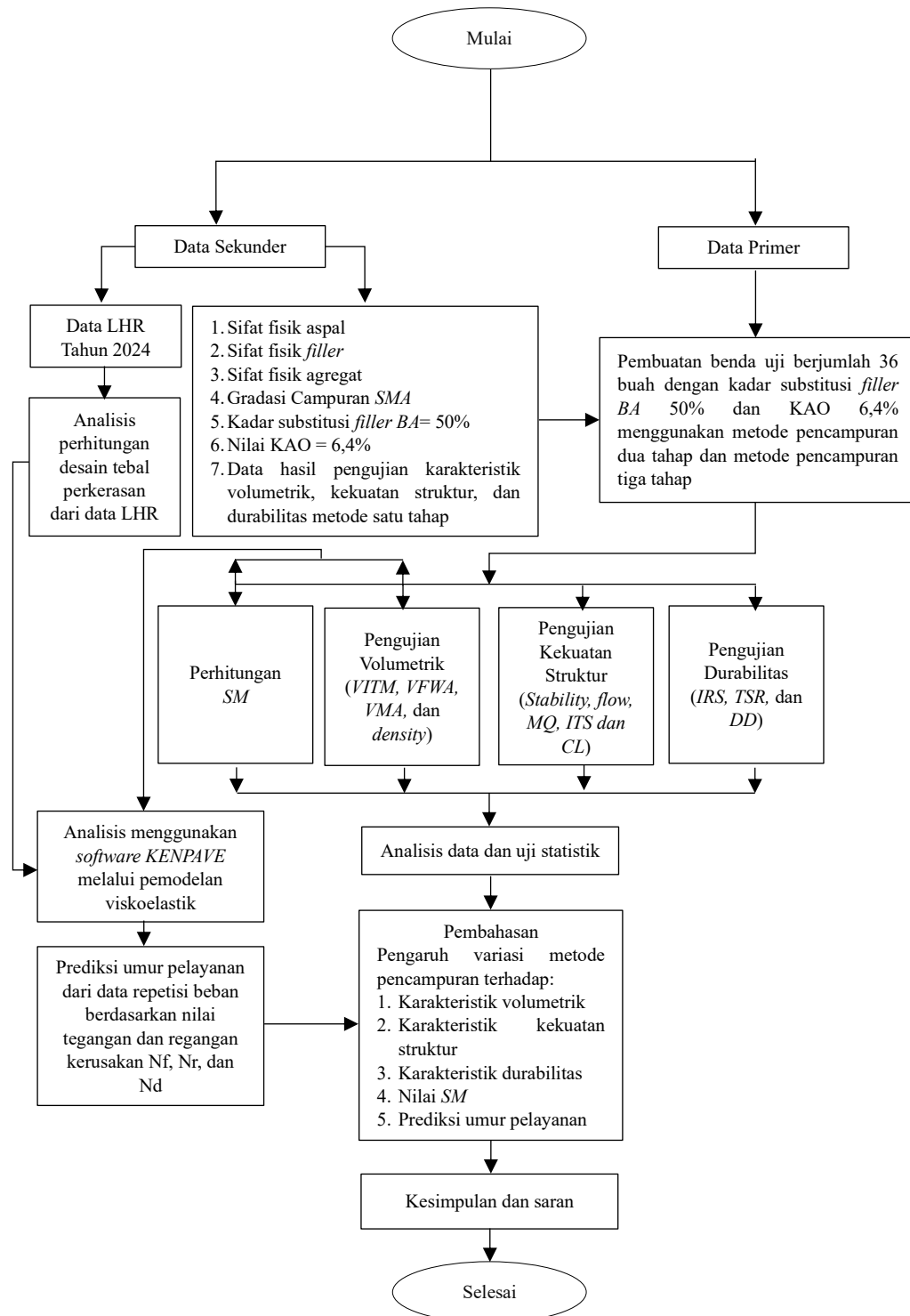
Tabel 4. 10 Lalu Lintas Harian Rerata Ruas Jalan bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh

No.	Klasifikasi Kendaraan	Jenis Kendaraan	Arus Rata-rata (Kend/hari) Tahun 2024
1	1	Sepeda Motor	4226
2	2	Kendaraan ringan - sedan, <i>jeep</i> , dan <i>station wagon</i>	1732
3	3	Kendaraan ringan – angkutan umum sedang	61
4	4	Kendaraan ringan - <i>pick up</i> , <i>micro truck</i>	503
5	5A	Bus kecil	16
6	5B	Bus besar	5
7	6A	Truk 2 sumbu-truk ringan	120
8	6B	Truk 2 sumbu-truk sedang	1688
9	7A1	Truk 3 sumbu-berat	274
10	7C1	Truk 4 sumbu-berat	12
11	8	Kendaraan tak bermotor	4

Sumber: Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Jambi (2025)

4.7 Analisis Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian merupakan suatu bagan yang merepresentasi visual dalam mendeskripsikan kerangka logis dan prosedural dari suatu studi. Skema ini disusun secara sistematis agar mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai alur penelitian yang dilakukan, mulai dari tahap awal perencanaan hingga tahap akhir berupa penarikan kesimpulan. Penyusunan bagan alir dilakukan secara ringkas namun tetap komprehensif, sehingga setiap tahapan penelitian dapat dipahami dengan jelas dan berurutan. Dalam penelitian ini, bagan alir memuat berbagai tahapan yaitu teknik pengumpulan data yang meliputi data sekunder hasil pengujian, penentuan metode penelitian, pengujian yang dilakukan laboratorium, analisis data, hingga interpretasi hasil penelitian. Untuk itu, bagan alir berfungsi sebagai pedoman dalam pelaksanaan penelitian, sehingga diharapkan setiap langkah yang dilakukan memiliki arah yang jelas dan terstruktur. Bagan alir dapat dilihat pada Gambar 4. 4.



Gambar 4. 4 Bagan Alir Penelitian

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan seluruh rangkaian yang telah dilakukan pada penelitian ini, didapatkan hasil pengujian campuran *Stone Matrix Asphalt (SMA)* dengan substitusi *BA* 50% dan KAO 6,4% berdasarkan variasi metode pencampuran adalah sebagai berikut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran *SMA* Menggunakan Substitusi *Filler BA* 50% Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Hasil pengujian karakteristik campuran *SMA* meliputi data metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran tiga tahap dengan acuan Direktorat Jenderal Bina Marga (2025). Adapun hasil pengujian adalah sebagai berikut.

Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Karakteristik Volumetrik Campuran *SMA* dengan *Filler* 50% *BA* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Metode	<i>VITM</i> (%)	<i>VFWA</i> (%)	<i>VMA</i> (%)	<i>Density</i> (gr/cc)
Dua tahap	3,734	78,740	17,562	2,247
Tiga tahap	3,601	79,361	17,449	2,250
Spesifikasi	3-5	-	>17	-

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Karakteristik Kekuatan Struktur Campuran *SMA* dengan *Filler* 50% *BA* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Metode	<i>Stability</i> (kg)	<i>Flow</i> (mm)	<i>MQ</i> (kg/mm)	<i>ITS</i> (KPa)	<i>CL</i> (%)
Dua tahap	1118,489	2,750	406,901	895,673	4,205
Tiga tahap	1192,680	2,533	471,159	967,291	3,875
Spesifikasi	>600	2-4,5	-	-	<20

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Karakteristik Durabilitas Campuran SMA dengan Filler 50% BA Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Metode	<i>IRS</i> (%)	<i>TSR</i> (%)	<i>DD</i> (%)
Dua tahap	97,625	92,317	0,109
Tiga tahap	98,392	93,259	0,101
Spesifikasi	>90	>80	<0,3

5.1.2 Hasil Perhitungan *Stiffness Modulus* (*SM*) Pada Campuran SMA Menggunakan Substitusi Filler BA 50% Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

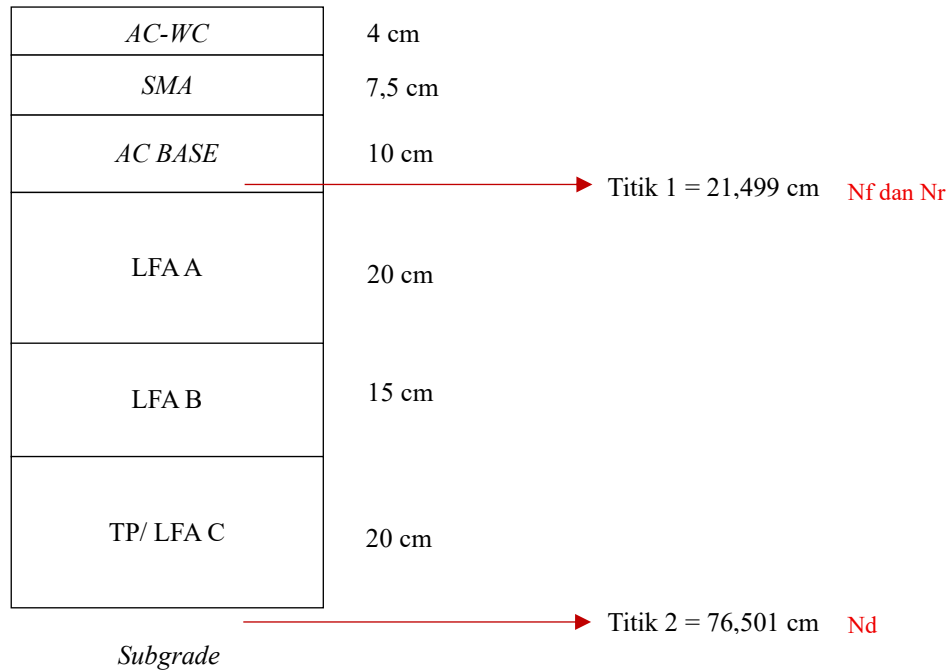
Perhitungan campuran SMA untuk nilai *SM* menggunakan data sekunder untuk metode satu tahap oleh Rahayu (2024). Hasil perhitungan mencari nilai *SM* dengan acuan Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) dapat dilihat pada Tabel 5. 4 sebagai berikut.

Tabel 5. 4 Hasil Perhitungan Nilai *SM* Campuran SMA dengan Filler 50% BA Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Metode	<i>Sbit</i> (MPa)	<i>Smix</i> (MPa)
Satu tahap	10,795	1979,538
Dua tahap		2127,239
Tiga tahap		2175,805

5.1.3 Hasil Prediksi Umur Pelayanan Pada Campuran SMA Menggunakan Substitusi Filler BA 50% Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Berdasarkan ketentuan Direktorat Jenderal Bina Marga (2024), didapatkan perhitungan beban rencana yang terlampir di Lampiran 10 hingga Lampiran 12 sebesar 13.314.126,90 ESA5. Pada penelitian ini, digunakan desain perkerasan lentur 3a yang dapat dilihat pada Bagan Tabel 3. 16. Berdasarkan Bagan tersebut, perhitungan ESA5 masuk dalam struktur perkerasan dengan kategori FFF(1) 4. Adapun rincian tebal setiap lapisan perkerasan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada ilustrasi Gambar 5. 1. Gambar tersebut menggambarkan susunan struktur perkerasan secara keseluruhan sesuai dengan hasil perencanaan yang telah dilakukan.



Gambar 5. 1 Ilustrasi Tebal Perkerasan

Berdasarkan data lalu lintas bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh dari yang mengacu pada ketentuan Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) dengan penggunaan nilai $Smix$, SMA sebagai modulus lapis BC , didapatkan hasil analisis kerusakan jalan berdasarkan angka repetisi beban pada Tabel 5. 5.

Tabel 5. 5 Rekapitulasi Perhitungan Repetisi Beban dengan Variasi Metode Pencampuran

Metode	Jenis Kerusakan	Repetisi Beban ($ESAL$)
Satu tahap	Nf	207.583.492,09
	Nr	36.327.817,47
	Nd	36.252.056,22
Dua tahap	Nf	211.722.354,94
	Nr	37.174.111,01
	Nd	37.018.459,80
Tiga tahap	Nf	213.124.954,42
	Nr	37.566.755,86
	Nd	37.330.563,62

Tabel 5. 6 Rekapitulasi Perhitungan Prediksi Umur Pelayanan dengan Variasi Metode Pencampuran

Metode	Jenis Kerusakan	Umur Pelayanan Per Jenis Kerusakan		Jenis Awal Kerusakan
Satu tahap	Nf	53,049	53 tahun 17 hari	Nd
	Nr	28,490	28 tahun 5 bulan 26 hari	
	Nd	28,463	28 tahun 5 bulan 16 hari	
Dua tahap	Nf	53,341	53 tahun 4 bulan 2 hari	Nd
	Nr	28,788	28 tahun 9 bulan 13 hari	
	Nd	28,734	28 tahun 8 bulan 24 hari	
Tiga tahap	Nf	53,439	53 tahun 5 bulan 8 hari	Nd
	Nr	28,924	28 tahun 11 bulan 2 hari	
	Nd	28,842	28 tahun 10 bulan 3 hari	

5.1.1 Hasil Analisis Statistik dengan *One-Way MANOVA*

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui adanya perbedaan hasil penelitian pada setiap parameter pengujian. Pada penelitian ini digunakan analisis statistik *One-Way MANOVA*, sedangkan rekapitulasi hasil pengujian disajikan pada Tabel 5. 7 hingga Tabel 5. 9. Hasil analisis secara rinci dapat dilihat pada Lampiran 20.

Tabel 5. 7 Rekapitulasi Analisis Uji Statistik *One-Way MANOVA* Akibat Pengaruh Variasi Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Volumetrik

No	Parameter	Keterangan	Hasil Analisis
1	<i>VITM</i>	H0 diterima	Tidak signifikan
2	<i>VFWA</i>	H0 diterima	Tidak signifikan
3	<i>VMA</i>	H0 diterima	Tidak signifikan
4	<i>Density</i>	H0 diterima	Tidak signifikan

Keterangan:

H0 diterima :Tidak terdapat pengaruh signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik volumetrik.

H0 ditolak :Terdapat pengaruh signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik volumetrik.

Tabel 5. 8 Rekapitulasi Analisis Uji Statistik *One-Way MANOVA* Akibat Pengaruh Variasi Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Kekuatan Struktur

No	Parameter	Keterangan	Hasil Analisis
1	<i>Stability</i>	H0 ditolak	Signifikan
2	<i>Flow</i>	H0 ditolak	Signifikan
3	<i>MQ</i>	H0 ditolak	Signifikan

Lanjutan Tabel 5. 8 Rekapitulasi Analisis Uji Statistik *One-Way MANOVA* Akibat Pengaruh Variasi Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Struktur

No	Parameter	Keterangan	Hasil Analisis
4	<i>ITS</i>	H0 ditolak	Signifikan
5	<i>CL</i>	H0 diterima	Tidak signifikan

Keterangan:

H0 diterima :Tidak terdapat pengaruh signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik kekuatan struktur.

H0 ditolak :Terdapat pengaruh signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik kekuatan struktur.

Tabel 5. 9 Rekapitulasi Analisis Uji Statistik *One-Way MANOVA* Akibat Pengaruh Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Durabilitas

No	Parameter	Keterangan	Hasil Analisis
1	Stabilitas Perendaman 24 Jam	H0 ditolak	Signifikan
2	<i>ITS</i> Perendaman 24 Jam	H0 ditolak	Signifikan
3	<i>DD</i>	H0 diterima	Tidak signifikan

Keterangan:

H0 diterima :Tidak terdapat pengaruh signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik durabilitas.

H0 ditolak :Terdapat pengaruh signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik durabilitas.

5.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang diperoleh, selanjutnya dilakukan pembahasan yang dapat diuraikan sebagai berikut.

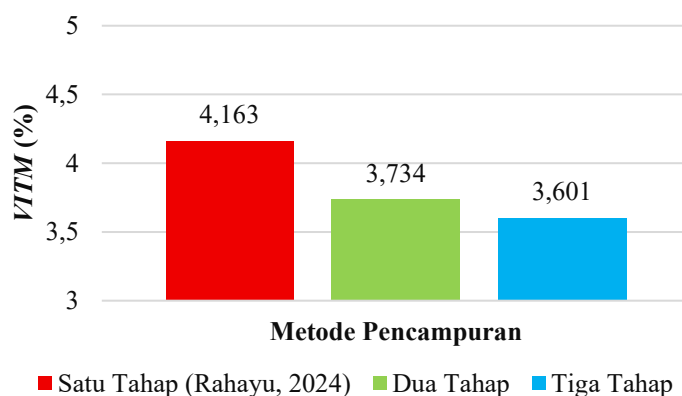
5.2.1 Tinjauan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Terhadap Karakteristik Volumetrik Campuran *SMA*

Kajian terhadap karakteristik volumetrik campuran *SMA* dengan penggunaan bahan pengikat aspal Pen 60/70 disajikan sebagai berikut. Adapun detail perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 1.

1. *Void In Total Mix (VITM)*

Nilai *VITM* menunjukkan persentase rongga udara yang masih tersisa di dalam campuran aspal setelah proses pemadatan dilakukan. Keberadaan rongga ini harus berada dalam batas yang disyaratkan, karena sangat berpengaruh terhadap kinerja perkerasan utamanya pada karakteristik volumetrik. Nilai *VITM* yang melebihi batas ketentuan, akan membuat

campuran bersifat berpori. Adapun jika nilai *VITM* kurang dari batas ketentuan maka campuran akan mengakibatkan ketidakstabilan yang menjadi kelelahan plastis. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *VITM* dapat dilihat pada Gambar 5. 2.



Gambar 5. 2 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai *VITM* Campuran SMA

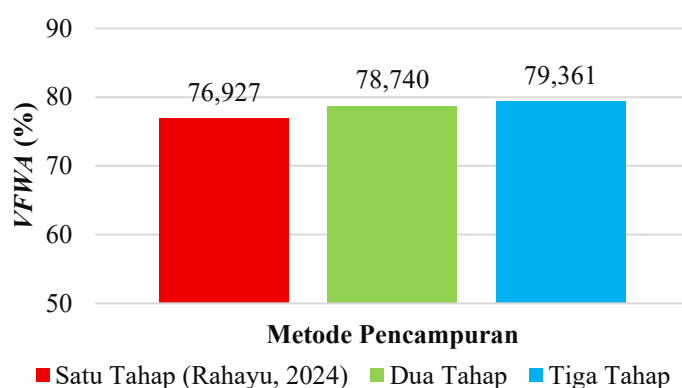
Pada Gambar 5. 2 menunjukkan bahwa metode tiga tahap memiliki nilai *VITM* paling rendah, disusul dengan metode pencampuran dua tahap, dan metode satu tahap. Kondisi ini disebabkan oleh campuran yang dihasilkan metode tiga tahap terdistribusi merata panasnya, dengan proses memasak agregat kasar, *filler*, dan agregat halus secara tunggal. Proses tersebut membuat suhu dalam masing-masing wajan dapat dipantau panasnya dengan akurasi yang lebih tinggi antar proporsi saringannya. Hasilnya, suhu pemanasan yang berakurasi akurat sesuai dengan ketentuan, menghasilkan partikel terdistribusi merata, sehingga menghasilkan campuran dengan hasil pemadatan yang tepat. Proses tersebut menjadikan nilai *VITM* pada metode tiga tahap lebih kecil dibandingkan metode lainnya.

Berdasarkan Direktorat Jenderal Bina Marga (2025), spesifikasi nilai *VITM* adalah 3-5%. Besaran nilai *VITM* pada metode satu tahap adalah 4,163%, metode pencampuran dua tahap adalah 3,734%, dan metode tiga tahap adalah 3,601%. Berdasarkan uji *One-Way MANOVA* didapatkan nilai signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap parameter *VITM* adalah 0.513 yang mana nilai tersebut lebih besar dari 0.05 sehingga H_0 diterima,

dan hasil analisis menunjukkan tidak signifikan perbedaan antara variasi metode pencampuran. Pada gambar grafik di atas seluruh variasi metode pencampuran memenuhi spesifikasi yang telah diisyaratkan. Penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Yaro dkk. (2021), yang menyatakan bahwa nilai *VITM* pada metode pencampuran bertahap cenderung rendah. Hal tersebut dikarenakan selama proses pencampuran *Waste Palm Fiber (WPOF)* metode bertahap mencegah kontak agregat mineral, sehingga membuat kapasitas *void* lebih sedikit.

2. *Void Filled With Asphalt (VFWA)*

Nilai *VFWA* merupakan parameter persentase rongga antar butiran agregat yang berhasil terisi oleh aspal setelah dilakukannya proses pemadatan campuran. Nilai *VFWA* berperan dalam menentukan elastisitas kekuatan campuran. *VFWA* yang terlalu rendah, menunjukkan bahwa aspal dalam campuran tersebut tidak dapat cukup mengisi rongga agregat. Permasalahan tersebut membuat sebuah campuran perkerasan menjadi rentan terhadap *hardening*. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *VFWA* dapat dilihat pada Gambar 5. 3.



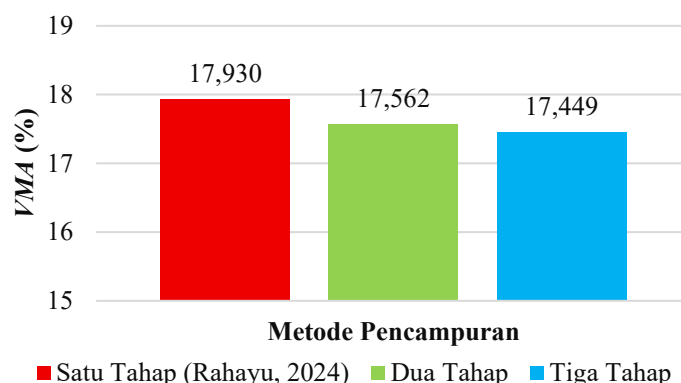
Gambar 5. 3 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai *VFWA* Campuran SMA

Gambar 5. 3 menunjukkan nilai *VFWA* terbesar pada metode pencampuran tiga tahap, lalu metode pencampuran dua tahap, terakhir metode pencampuran satu tahap. Hasil tersebut berhubungan dengan nilai *VITM* yang

berbanding terbalik dengan nilai *VFWA*. Semakin besar nilai *VITM*, maka nilai *VFWA* akan semakin kecil. Pada metode pencampuran tiga tahap, aspal dapat terdistribusikan secara merata karena memiliki kontrol tahapan yang tepat dengan proses memasukkan aspal dengan agregat kasar secara awal, disusul *filler* kemudian agregat halus. Hal tersebut membuat rongga kosong dalam campuran rendah karena rongga telah terisi aspal. selanjutnya pada metode dua tahap nilai *VFWA* lebih tinggi dibanding dengan metode satu tahap, dikarenakan pencampuran agregat kasar dengan aspal terdistribusi merata, disusul dengan agregat halus dan *filler* secara bersama-sama. Menghasilkan campuran yang memiliki *VITM* lebih sedikit, dan *VFWA* lebih besar dibanding metode satu tahap. Besaran nilai *VFWA* pada metode satu tahap senilai 75,927%, metode dua tahap senilai 78,740%, dan metode tiga tahap senilai 79,361%. Berdasarkan hasil uji *One-Way MANOVA*, diperoleh nilai signifikansi pengaruh variasi metode pencampuran terhadap parameter *VFWA* $0,534 > 0,05$ sehingga dinyatakan H_0 diterima dengan pengaruh tidak signifikan. Hal ini sejalan dengan penelitian Hadi dkk. (2025) yang menyatakan bahwa metode pencampuran tiga tahap memiliki nilai *VFWA* paling besar, diikuti oleh metode dua tahap dan metode satu tahap. Hal tersebut mengindikasikan bahwa distribusi aspal dan agregat yang merata pada metode pencampuran tiga tahap menghasilkan kemampuan penyerapan aspal yang lebih optimal. Penelitian Hesami dkk. (2015) juga menunjukkan bahwa pada metode bertahap nilai *VFWA* lebih tinggi dibanding dengan metode satu tahap.

3. *Void in Mineral Aggregate (VMA)*

VMA merupakan besar rongga dalam persentase yang terdapat antar butiran agregat pada campuran aspal setelah dilakukan pemadatan. Rongga tersebut mencakup volume yang terisi aspal serta udara dalam suatu campuran. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *VMA* dapat dilihat pada Gambar 5. 4.



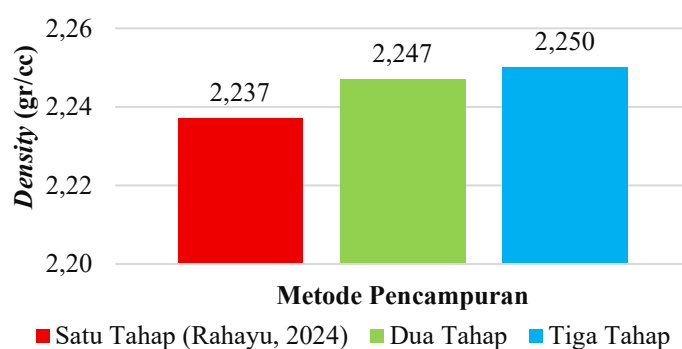
Gambar 5. 4 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai VMA Campuran SMA

Dalam Gambar 5. 4, didapatkan bahwa metode pencampuran tiga tahap memiliki nilai *VMA* paling rendah, diikuti metode pencampuran dua tahap, dan metode satu tahap memiliki *VMA* paling tinggi. Hal ini dikarenakan metode pencampuran tiga tahap cenderung menghasilkan ikatan adhesi yang lebih baik antar komponen campuran, sehingga jarak antar butir agregat menjadi rapat. Sebaliknya, metode satu tahap menghasilkan ikatan adhesi yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran tiga tahap. Hal ini disebabkan oleh proses pencampuran material secara sekaligus yang mengakibatkan distribusi agregat tidak merata. Spesifikasi nilai *VMA* untuk *SMA* minimal 17. Nilai *VMA* pada metode pencampuran adalah 17,930%, metode pencampuran dua tahap adalah 17,562%, dan metode tiga tahap adalah 17,449%. Berdasarkan nilai tersebut, seluruh variasi metode pencampuran telah memenuhi spesifikasi yang diisyaratkan. Hasil uji statistik melalui *One-Way MANOVA*, diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,512 > 0,05$ yang memiliki arti H_0 diterima dengan hasil tidak signifikan. Hal ini sejalan dengan penelitian Yaro dkk. (2021) yang menjelaskan bahwa campuran aspal yang memerlukan waktu pencampuran lebih singkat untuk mencapai lapisan bitumen yang memadai selama proses pencampuran diindikasikan memiliki adhesi aktif yang lebih baik. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa campuran *SMAC* yang disiapkan menggunakan metode pencampuran bertahap memiliki waktu pencampuran

yang relatif lebih singkat untuk semua kadar *WPOF* dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap.

4. Kepadatan (*Density*)

Nilai *density* adalah parameter yang menggambarkan tingkat kepadatan campuran agregat aspal. Semakin tinggi nilai *density*, semakin baik campuran tersebut mampu menahan beban lalu lintas. Hal ini disebabkan oleh pengurangan rongga di dalam campuran, yang menghasilkan struktur yang lebih padat, ketahanan terhadap udara dan kelembapan yang lebih besar membuat terhambatnya proses oksidasi. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *density* dapat dilihat pada Gambar 5. 5.



Gambar 5. 5 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai *Density* Campuran SMA

Berdasarkan Gambar 5. 5 didapatkan nilai *density* terbesar diperoleh oleh metode pencampuran tiga tahap, dan nilai *density* terkecil diperoleh oleh metode pencampuran satu tahap. Metode tiga tahap memiliki *density* besar dikarenakan rongga antar butiran kecil, yang ditandai dengan nilai *VITM* kecil, *VFWA* besar, dan *VMA* kecil dibandingkan variasi metode pencampuran lainnya. Hal tersebut membuat rongga terisi secara baik dengan bagian-bagian merata sehingga meningkatkan kepadatan campuran. Sebaliknya, metode satu tahap menghasilkan distribusi campuran yang kurang merata akibat pencampuran antarjenis agregat secara sekaligus. Hal ini berdampak pada nilai *density* yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pencampuran bertahap, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai *VITM* yang lebih tinggi, *VFWA*

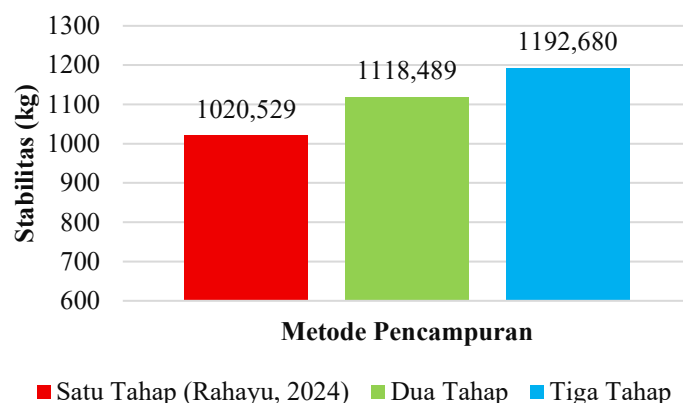
yang lebih rendah, dan *VMA* yang lebih tinggi. Pada metode pencampuran satu tahap, dua tahap, dan tiga tahap, nilai masing-masing *density* adalah 2,237 gr/cc, 2,247 gr/cc, dan 2,250 gr/cc. Hasil uji statistik menggunakan *One-Way MANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar $0,511 > 0,05$, sehingga H_0 diterima. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi metode pencampuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter yang diuji. Hal ini sejalan dengan penelitian Hadi dkk. (2025) yang menyatakan bahwa metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *density* yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode satu tahap akibat distribusi campuran yang lebih merata ditandai dengan semakin kompleks metode pencampuran yaitu metode tiga tahap, akan menghasilkan nilai *VMA* rendah, *VITM* rendah, dan *VFWA* tinggi. Meskipun demikian, perbedaan nilai antara kedua metode tersebut tidak signifikan. Penelitian ini juga sejalan dengan Priambodo dan Fauziah (2026) yang dalam penelitiannya menunjukkan metode pencampuran bertahap memiliki *density* yang lebih besar dibanding metode satu tahap.

5.2.2 Tinjauan Karakteristik Kekuatan Struktur Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA*

Kajian terhadap karakteristik kekuatan struktur campuran *SMA* dengan penggunaan aspal Pen 60/70 sebagai bahan pengikat dapat disajikan sebagai berikut. Lebih lanjut, perhitungan mengenai kekuatan struktur dapat dilihat pada Lampiran 1, Lampiran 4, dan Lampiran 7.

1. Stabilitas (*Stability*)

Stability adalah kemampuan lapis perkerasan dapat menahan beban lalu lintas hingga terjadi deformasi plastis. Nilai *stability* dipengaruhi oleh kadar aspal optimum dalam kondisi optimumnya. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *stability* dapat dilihat pada Gambar 5. 6.



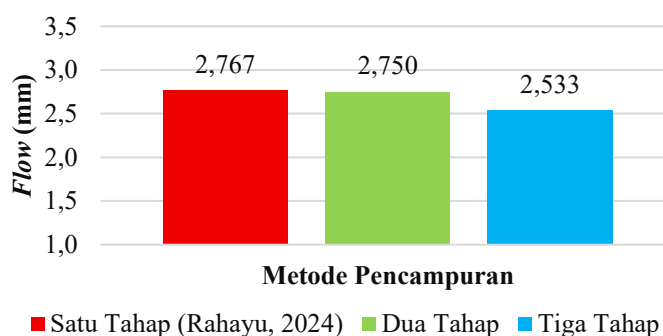
Gambar 5. 6 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai *Stability* Campuran SMA

Gambar 5. 6 menunjukkan nilai *stability* metode pencampuran satu tahap paling rendah, sedangkan nilai *stability* paling tinggi ditunjukkan oleh metode pencampuran tiga tahap. Hal tersebut terjadi karena pada metode pencampuran tiga tahap terjadi proses pelapisan awal aspal pada agregat kasar, sehingga rongga-rongga dalam campuran dapat terisi secara lebih efektif dan meningkatkan kemampuan campuran dalam menahan deformasi. Sebaliknya, metode satu tahap menghasilkan rongga yang tidak terisi aspal akibat proses pencampuran secara sekaligus, yang ditunjukkan oleh nilai *VFWA* yang lebih rendah. Kondisi ini mengindikasikan distribusi campuran yang tidak merata, sehingga menghasilkan nilai stabilitas paling rendah dibandingkan dengan metode pencampuran lainnya. Spesifikasi stabilitas *marshall* pada campuran SMA adalah minimal 600 kg. Nilai *stability* metode satu tahap , dua tahap, tiga tahap, secara berturut-turut adalah 1020,529 kg, 1118,489 kg, 1192,680 kg, sehingga keseluruhan metode pencampuran telah memenuhi spesifikasi yang diisyaratkan. Berdasarkan uji *One-Way ANOVA* didapatkan nilai signifikansi parameter *stability* adalah sebesar $>0,001$, yang dimana nilai tersebut $<0,05$ sehingga H_0 ditolak, menandakan variasi metode pencampuran memberikan pengaruh yang signifikan. Penelitian ini sejalan dengan Yaro dkk. (2021) yang menyatakan metode pencampuran bertahap memberikan nilai yang lebih baik untuk mencapai stabilitas tinggi pada SMAC. Juga sejalan dengan penelitian Iqbal dan Fauziah (2023) yang dalam

penelitiannya, kadar ban karet senilai 2% dengan metode pencampuran satu tahap menunjukkan nilai stabilitas sebesar 1185,883 kg, sedangkan pada metode pencampuran bertahap diperoleh nilai stabilitas yang lebih tinggi, yaitu sebesar 1204,524 kg.

2. Kelelahan (*Flow*)

Flow merupakan salah satu parameter kekuatan struktur yang menunjukkan kemampuan campuran mengalami deformasi saat menerima beban hingga mencapai kondisi kegagalan atau maksimumnya. Campuran yang memiliki nilai *flow* tinggi namun nilai stabilitas rendah mengindikasikan bahwa campuran tersebut bersifat lebih plastis sehingga relatif mengalami perubahan bentuk. Begitu pun sebaliknya. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *flow* dapat dilihat pada Gambar 5. 7 berikut.



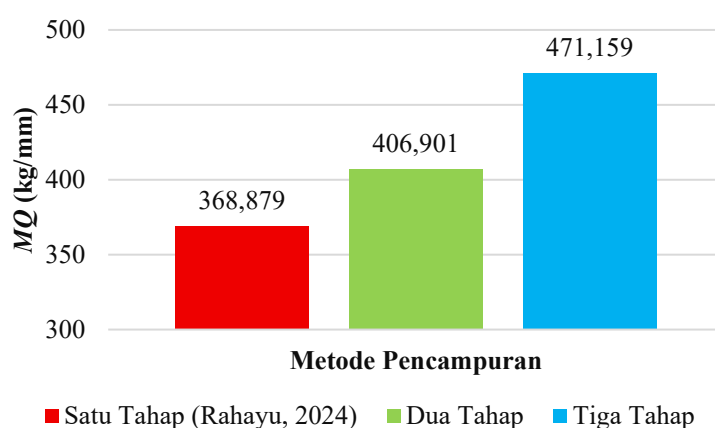
Gambar 5. 7 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai *Flow* Campuran SMA

Berdasarkan Gambar 5. 7, metode pencampuran satu tahap memiliki nilai paling tinggi, kemudian disusul dengan metode pencampuran dua tahap, dan yang terakhir adalah metode pencampuran 3. Hal ini disebabkan oleh metode pencampuran tiga tahap yang menghasilkan distribusi rongga lebih merata, ditunjukkan oleh nilai *VITM* yang lebih rendah, *VFWA* yang lebih tinggi, dan *VMA* yang lebih rendah dibandingkan dengan metode lainnya. Kondisi tersebut meningkatkan daya ikat antara agregat dan aspal, sehingga menghasilkan campuran yang lebih kaku dan memiliki kemampuan menahan beban yang lebih baik. Spesifikasi nilai *flow* dalam campuran SMA adalah 2-4,5 mm. Nilai *flow* pada metode satu tahap sebesar 2,767 mm, metode dua

tahap sebesar 2,750 mm, dan metode tiga tahap sebesar 2,533 mm. Hasil dalam penelitian ini, semua variasi metode pencampuran telah memenuhi spesifikasi yang diizinkan. Berdasarkan hasil uji *One-Way ANOVA*, diperoleh nilai signifikansi parameter *flow* sebesar $0,015 < 0,05$ yang memiliki maksud H_0 ditolak sehingga perbedaan antar variasi metode pencampuran signifikan. Hasil penelitian ini sejalan dengan Priambodo dan Fauziah (2026) yang menyatakan metode pencampuran bertahap menunjukkan nilai *stability Marshall* yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran satu tahap, tetapi nilai *flow* cenderung lebih rendah pada metode bertahap. Hal ini mengindikasikan kapasitas tegangan kegagalan yang lebih rendah.

3. *Marshall Quotient (MQ)*

MQ adalah parameter yang menunjukkan tingkat kelenturan atau fleksibilitas pada campuran perkerasan. Nilai *MQ* tinggi menunjukkan campuran kaku, sebaliknya jika *MQ* rendah campuran lunak. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *MQ* dapat dilihat pada Gambar 5. 8 berikut.



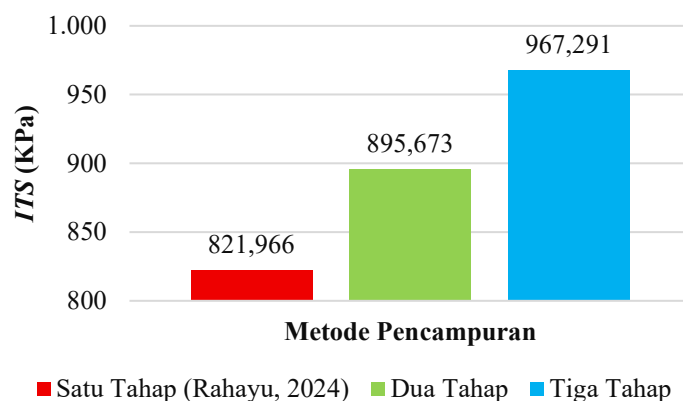
Gambar 5. 8 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA 50%* Terhadap Nilai *MQ* Campuran *SMA*

Dalam Gambar 5. 8, didapatkan nilai *MQ* terbesar ada pada metode pencampuran tiga tahap, dan nilai *MQ* paling rendah ada pada metode pencampuran satu tahap. Hal tersebut disebabkan oleh metode Pencampuran tiga tahap menghasilkan distribusi aspal yang lebih merata. Hal ini terjadi karena aspal terlebih dahulu dicampur dengan agregat kasar, kemudian

dilanjutkan dengan penambahan *filler* dan agregat halus. Proses tersebut memungkinkan aspal menyelimuti agregat secara lebih optimal sehingga campuran menjadi lebih homogen menghasilkan nilai *stability* tinggi dan *flow* rendah. Sebaliknya, metode pencampuran satu tahap menunjukkan nilai *stability* terendah dan *flow* tertinggi, sehingga menghasilkan nilai *MQ* paling rendah dibandingkan dengan metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap. Nilai *MQ* dimulai dari metode pencampuran satu tahap hingga metode pencampuran tiga tahap adalah 368,879 kg/mm, 406,901 kg/mm, dan 471,159 kg/mm. Hasil pengujian statistik menggunakan One-Way ANOVA menunjukkan bahwa parameter *MQ* memiliki nilai signifikansi kurang dari 0,001. Nilai tersebut berada di bawah batas signifikansi 0,05, sehingga H_0 ditolak. Dengan demikian, variasi metode pencampuran terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *MQ* campuran. Hal ini sejalan dalam penelitian Kok dan Kuloglu (2011) yang menyatakan bahwa metode pencampuran bertahap dapat meningkatkan nilai stabilitas karena menghasilkan gaya *interlocking* yang lebih baik antar agregat kasar. Penelitian tersebut menghasilkan nilai *MQ* yang besar pada metode pencampuran bertahap, dikarenakan *MQ* merupakan perbandingan antara stabilitas dengan *flow*.

4. *Indirect Tensile Strength (ITS)*

ITS adalah parameter untuk mengevaluasi kemampuan campuran dalam menahan tegangan tarik dengan mengidentifikasi potensi terjadinya retak pada lapis perkerasan. *ITS* juga disebut sebagai gaya kuat tarik tidak langsung pada campuran aspal. Semakin tinggi nilai *ITS* yang diperoleh, maka semakin besar pula kemampuan campuran dalam menahan gaya tarik yang bekerja. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *ITS* dapat dilihat pada Gambar 5. 9 berikut.



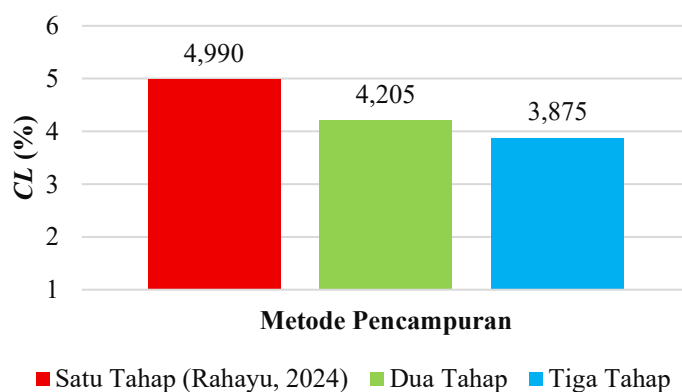
Gambar 5. 9 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai ITS Campuran SMA

Berdasarkan Gambar 5. 9 didapatkan nilai *ITS* paling besar berada pada metode pencampuran tiga tahap dan terakhir metode pencampuran satu tahap. Peningkatan *ITS* pada metode tiga tahap pada dasarnya dikontrol oleh kualitas pelapisan aspal pada campuran. pada metode tiga tahap di pemanasan agregat bagian awal, agregat kasar dan aspal dicampur dengan suhu yang telah ditentukan sehingga memberikan kesempatan bagi aspal untuk mengunci rongga-rongga agregat. Kondisi ini memperkuat struktur internal campuran, menjadikannya tahan terhadap tegangan tarik yang memicu keretakan. Berbeda halnya dengan metode satu tahap, waktu pencampuran yang relatif instan dikarenakan agregat kasar, *filler*, dan agregat halus dicampur secara bersamaan, membuat aspal kurang dapat menyebar merata ke seluruh fraksi agregat. Lemahnya ikatan adhesi mengakibatkan tingginya *VITM* secara langsung berdampak pada menurunnya kapasitas campuran dalam menahan beban tarik. Nilai *ITS* pada metode satu tahap, dua tahap, dan tiga tahap berturut-turut adalah 821,966 KPa, 895,673 KPa, dan 967,291 KPa. Untuk nilai signifikansi dari uji *One-Way MANOVA* adalah $0.001 < 0,05$ yang menandakan signifikan pengaruh variasi metode pencampuran terhadap parameter *ITS*, sehingga H_0 ditolak. Penelitian ini sejalan dengan Priambodo dan Fauziah (2026) yang dalam penelitiannya menunjukkan metode pencampuran bertahap memiliki nilai *ITS* yang lebih besar dibanding metode

satu tahap. Dengan demikian, metode pencampuran bertahap menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam mengurangi potensi terjadinya retak akibat kegagalan tarik pada perkerasan.

5. *Cantabro Loss (CL)*

CL menunjukkan kemampuan campuran beton aspal dalam menahan kehilangan berat akibat proses keausan. Nilai *CL* rendah menunjukkan bahwa mekanisme *interlocking* antara agregat dan aspal terbentuk dengan baik. Hal tersebut membuat campuran memiliki kemampuan yang lebih tinggi dalam mempertahankan kondisi awal terhadap pengaruh benturan. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *CL* dapat dilihat pada Gambar 5. 10.



Gambar 5. 10 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Terhadap Nilai *CL* Campuran SMA

Berdasarkan Gambar 5. 10, metode pencampuran satu tahap menunjukkan nilai tertinggi, diikuti oleh metode pencampuran dua tahap. Sedangkan nilai terendah diperoleh pada metode pencampuran tiga tahap. metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *CL* yang lebih rendah dibandingkan metode pencampuran satu tahap. Kondisi ini mengindikasikan bahwa prosedur metode bertahap yaitu pencampuran agregat kasar terlebih dahulu dengan aspal, diikuti penambahan *filler* dan agregat halus memungkinkan distribusi aspal yang lebih seragam dan penetrasi mastik ke rongga antar agregat yang lebih efektif. Proses ini menciptakan struktur agregat yang padat dengan *interlocking* optimal, sehingga nilai *VFWA* lebih

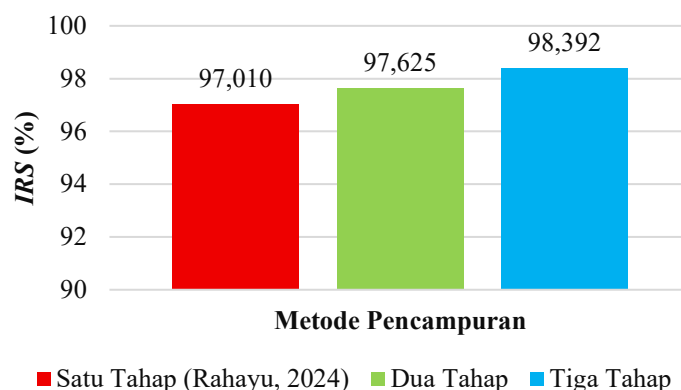
besar dibandingkan metode pencampuran lainnya. Akibatnya, ikatan antara aspal dengan agregat menjadi lebih kuat dan homogenitas baik. Pada metode pencampuran satu tahap cenderung menunjukkan sifat yang lebih abrasif dibandingkan metode pencampuran bertahap. Hal ini dikarenakan proses pencampuran agregat kasar, aspal, dan *filler* pada metode satu tahap secara serentak, sehingga terjadi gesekan antar partikel yang intens dan menghasilkan abrasi mekanis yang lebih tinggi pada permukaan agregat. Akibatnya, *interlocking* antar agregat melemah dan campuran menjadi rentan terhadap pemisahan material. Nilai *CL* secara berturut-turut dari metode satu tahap hingga tiga tahap adalah 4,990%, 4,205%, dan 3,875% yang telah memenuhi spesifikasi yaitu <20% dari Direktorat Jenderal Bina Marga 2025. Hasil uji *One-Way MANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,060 > 0,05 sehingga H_0 diterima. Hal ini menunjukkan bahwa variasi metode pencampuran terhadap parameter *CL* tidak signifikan perubahannya. Penelitian ini sejalan dengan hasil dari penelitian Hadi dkk. (2025) yang menyatakan penggunaan metode pencampuran tiga tahap menghasilkan nilai *CL* yang lebih rendah, dibandingkan metode pencampuran lainnya

5.2.3 Tinjauan Karakteristik Durabilitas Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA*

Analisis karakteristik durabilitas campuran *SMA* dengan penggunaan aspal Pen 60/70 sebagai bahan pengikat dapat diuraikan sebagai berikut. Secara detail, perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 2, Lampiran 3, Lampiran 6, dan Lampiran 8

1. *Indeks of Retained Strength (IRS)*

IRS merupakan parameter yang menunjukkan tingkat keawetan campuran setelah mengalami proses perendaman pada suhu 60°C selama 24 jam. Semakin tinggi stabilitas pada *IRS* maka menunjukkan campuran tersebut semakin baik. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *IRS* dapat dilihat pada Gambar 5. 11.



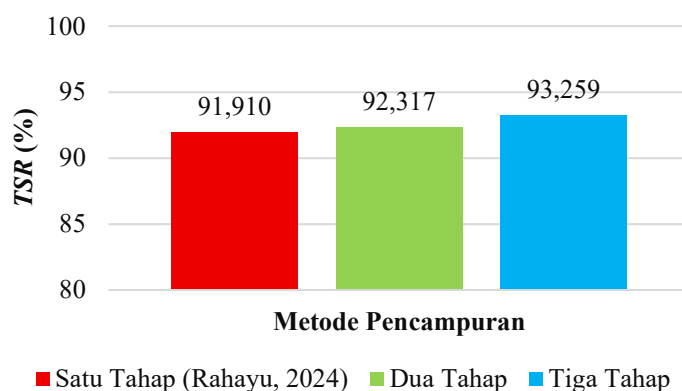
Gambar 5. 11 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler* BA 50% Terhadap Nilai IRS Campuran SMA

Berdasarkan Gambar 5. 11, nilai *IRS* paling besar berada pada metode pencampuran tiga tahap, kemudian metode pencampuran dua tahap, dan terakhir metode pencampuran satu tahap. Berdasarkan Gambar 5. 11 didapatkan nilai *IRS* untuk metode satu tahap, dua tahap, dan tiga tahap sebesar 97,010%, 97,625%, dan 98,392%. Nilai *IRS* pada semua variasi metode pencampuran telah memenuhi spesifikasi, yaitu minimal 90%. Berdasarkan nilai stabilitas 24 jam didapatkan hasil signifikansi dari analisis menggunakan *One-Way MANOVA* sebesar $0,002 < 0,05$. Hal tersebut menandakan H_0 ditolak, sehingga pengaruh variasi metode pencampuran terhadap stabilitas 24 jam adalah signifikan. Metode pencampuran bertahap, utamanya tiga tahap menghasilkan nilai *IRS* yang tinggi. Menandakan campuran dengan metode tersebut mampu meningkatkan kestabilan dengan nilai lebih tinggi dikarenakan nilai *VITM* rendah, *VFWA* tinggi, *VMA* rendah, dibanding variasi metode pencampuran lain. Metode pencampuran tiga tahap menghasilkan nilai *IRS* yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode satu tahap. Hal ini disebabkan oleh distribusi aspal dan agregat yang lebih merata, sehingga campuran menjadi lebih padat dan homogen. Selain itu, proses bertahap memungkinkan *filler* dapat mengisi sela-sela rongga, sehingga distribusi partikel merata. Adapun reaksi kimia antara *filler* dan aspal berlangsung lebih efektif, yang meningkatkan stabilitas serta daya tahan campuran terhadap beban dan kondisi lingkungan. Kondisi tersebut membuat

campuran memiliki daya lekat yang kuat, akibat *density* yang besar. Hal tersebut terjadi karena campuran yang dibuat dengan metode pencampuran bertahap, mendistribusikan rongga udara yang lebih merata. Pendistribusian tersebut menunjukkan bahwa proses pencampuran dan pemadatan berlangsung lebih optimal. Kondisi ini memungkinkan aspal melapisi agregat secara lebih homogen, sehingga terbentuk ikatan yang lebih kuat antar partikel menurut Hesami dkk. (2015). Hasilnya, campuran dengan distribusi rongga yang merata cenderung memiliki nilai stabilitas *Marshall* yang lebih tinggi, dikarenakan beban dapat tersalurkan secara merata ke seluruh struktur campuran.

2. *Tensile Strength Rasio (TSR)*

TSR merupakan parameter yang digunakan untuk mendapatkan potensi terjadinya retak dan alur pada campuran akibat pengaruh air berdasarkan hasil pengujian tarik tidak langsung. Tingginya nilai *TSR* yang diperoleh, maka semakin baik tingkat durabilitas campurannya. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *TSR* dapat dilihat pada Gambar 5. 12 berikut.



Gambar 5. 12 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Terhadap Nilai *TSR* Campuran *SMA*

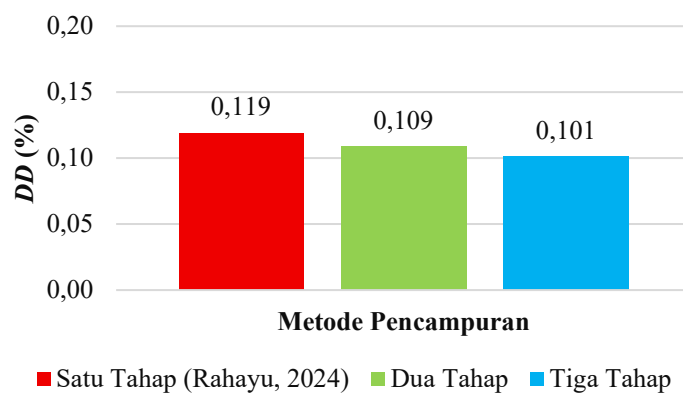
Berdasarkan Gambar 5. 12 didapatkan Nilai *TSR* tertinggi diperoleh pada metode pencampuran tiga tahap, diikuti oleh metode pencampuran dua tahap, lalu metode pencampuran satu tahap. Nilai *TSR* pada metode satu tahap , dua tahap, dan tiga tahap masing-masing sebesar 91,910%, 92,317%, dan

93,259%. Nilai *TSR* pada seluruh variasi metode pencampuran telah memenuhi ketentuan yang diisyaratkan, yaitu minimal 80%. Berdasarkan hasil analisis menggunakan *One-Way MANOVA*, diperoleh nilai signifikansi *ITS* perendaman 24 jam sebesar $0,001 < 0,05$ sehingga H_0 ditolak. Hasil tersebut menunjukkan bahwa variasi metode pencampuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *ITS* perendaman 24 jam. Nilai *TSR* yang tinggi menunjukkan ikatan kuat antar agregat, campuran dengan proses kontrol lebih tinggi ini membuat kekuatan campuran menjadi tinggi terhadap kelembapan dan kondisi ekstrim. Proses pencampuran dengan metode bertahap cenderung menghasilkan distribusi aspal yang lebih homogen pada campuran, sehingga rongga di antara agregat dapat terisi secara lebih optimal. Kondisi ini mendorong terbentuknya ikatan yang lebih baik antara aspal dan agregat, yang pada akhirnya meningkatkan ketahanan campuran terhadap pengaruh air. Ikatan yang kuat tersebut juga berperan dalam mempertahankan kekuatan tarik campuran setelah proses perendaman, sehingga nilai *TSR* yang diperoleh menjadi lebih tinggi dan mencerminkan durabilitas campuran yang lebih baik. Sebaliknya, metode pencampuran satu tahap umumnya dilakukan dalam waktu yang relatif singkat dengan tingkat kontrol yang lebih terbatas, sehingga berpotensi menghasilkan distribusi aspal yang kurang merata. Ketidaksempurnaan dalam pengisian rongga ini dapat melemahkan ikatan antara aspal dan agregat, yang berdampak pada menurunnya ketahanan campuran terhadap air serta menghasilkan nilai *TSR* yang lebih rendah. Menurut Kok dan Kuloglu (2011) peningkatan nilai *TSR* tertinggi terjadi pada campuran yang telah mengalami modifikasi. Hal ini menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap lebih efektif dalam mempertahankan kekuatan ikatan antara agregat dan aspal, sehingga campuran yang dihasilkan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gaya tarik, terutama setelah mengalami simulasi perendaman. Iqbal dan Fauziah (2023) menyatakan Penggunaan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai *ITS conditioned* yang lebih tinggi dibandingkan metode pencampuran satu tahap. Peningkatan nilai ini berkaitan dengan bertambahnya kohesi campuran, yang berfungsi

meningkatkan daya lekat antar agregat sehingga struktur campuran menjadi lebih kuat.

3. *Draindown (DD)*

DD merupakan parameter yang digunakan untuk melihat kemampuan jumlah aspal melapisi agregat. *DD* berpengaruh terhadap keseluruhan kinerja campuran. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap nilai *DD* dapat dilihat pada Gambar 5. 13.



Gambar 5. 13 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Terhadap Nilai *DD* Campuran *SMA*

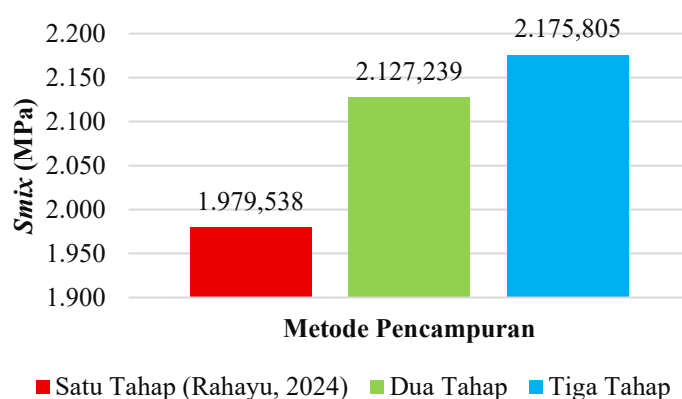
Berdasarkan gambar yang ditampilkan, metode pencampuran satu tahap menghasilkan nilai tertinggi, kemudian diikuti oleh metode pencampuran dua tahap, terakhir metode pencampuran tiga tahap. Penurunan persentase *DD* berkorelasi dengan distribusi aspal dalam mengisi pori campuran secara merata. Pada metode pencampuran bertahap, penambahan aspal yang diawali pada agregat kasar memungkinkan aspal menyelimuti permukaan agregat secara lebih merata pada area yang lebih luas. Pelapisan material yang homogen mampu mengikat agregat secara efektif dan mencegah *DD*. Kondisi ini dapat mengurangi potensi terjadinya pemisahan antara aspal dan agregat selama proses pencampuran. Distribusi aspal yang lebih homogen juga mendukung pengisian rongga antar agregat secara lebih optimal, sehingga kecenderungan terjadinya *DD* dapat diminimalkan. Sebaliknya, metode satu tahap yang mencampurkan material secara bersamaan justru menghasilkan

distribusi aspal yang parsial. Ketidakmerataan ini menciptakan bagian sampel menjadi tidak seimbang antara kadar aspalnya, menjadikan lemah daya ikat mastik dan terjadilah *DD* yang lebih besar. Nilai maksimal untuk *DD* dalam spesifikasi adalah 0,3%. Metode pencampuran satu tahap bernilai 0,119%, dua tahap sebesar 0,109%, dan tiga tahap sebesar 0,101%. Seluruh variasi metode pencampuran masih dalam spesifikasi yang diizinkan. Hasil pengujian statistik menggunakan *One-Way MANOVA* menunjukkan nilai signifikansi sebesar $0,316 > 0,05$ sehingga H_0 diterima. Dengan demikian, variasi metode pencampuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap parameter *DD*. Hal ini sejalan dengan penelitian Iqbal dan Fauziah (2023). Berdasarkan penelitian tersebut, metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan campuran yang lebih homogen sehingga dapat meminimalkan terjadinya pemisahan aspal. hal tersebut dikarenakan proses pemisahan pemanasan antar masing-masing agregat memiliki kontrol suhu yang tinggi sehingga distribusi aspal dapat merata.

5.2.4 Tinjauan Nilai *Stiffness Modulus* (*SM*) Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA 50%* Campuran Perkerasan *SMA*

SM terdiri atas dua komponen, yaitu *Sbit* dan *Smix*. *Sbit* adalah parameter yang menggambarkan tingkat kekakuan bitumen. *Sbit* dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain temperatur, lama waktu pembebanan, *Recoverde penetration index asphalt*, *Recovered Penetration*, dan penetrasi awal. Nilai *Sbit* yang besar menandakan aspal cenderung kaku sehingga kurang lentur, tingginya nilai *Sbit* mengakibatkan semakin tinggi juga nilai *Smix*. Nilai *Sbit* yang kecil menandakan jalan lebih lunak kondisi jalan lebih lentur, rendahnya nilai *Sbit* mengakibatkan semakin rendah juga nilai *Smix*. Dalam perhitungan nilai *Sbit*, digunakan kecepatan pembebanan sebesar 15 km/jam. Jika kecepatan rendah, maka jalan akan menerima pembebanan yang lama sehingga didapatkan nilai *Sbit* paling kecil berdasarkan tingkat kecepatan. Kecepatan tersebut merupakan representasi dari kondisi beban ekstrem berdasarkan batas minimum berkendara pada kelas jalan kolektor primer studi kasus ini. Nilai *Sbit* pada variasi metode pencampuran memiliki data yang sama yaitu sebesar 10,795 MPa

Setelah menghitung nilai S_{bit} , selanjutnya adalah mencari nilai S_{mix} . S_{mix} merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kekakuan campuran perkerasan dalam menahan beban roda kendaraan. Besarnya nilai kekakuan ini dipengaruhi oleh nilai S_{bit} , dan karakteristik volumetrik campuran ($VITM$, $VFWA$ dan VMA). Nilai volumetrik berpengaruh kepada kepadatan campuran. Nilai $VITM$ rendah, $VFWA$ tinggi, dan VMA rendah menunjukkan campuran yang padat sehingga lebih stabil. S_{mix} memiliki peranan penting dalam analisis tegangan dan regangan pada struktur perkerasan jalan, karena berkaitan langsung dengan respons perkerasan terhadap beban lalu lintas. Semakin tinggi nilai S_{mix} maka semakin besar kekuatan dalam menahan deformasi. Hasil perhitungan S_{mix} dengan penggunaan aspal Pen 60/70 sebagai bahan pengikat dapat dilihat pada Gambar 5. 14 berikut.



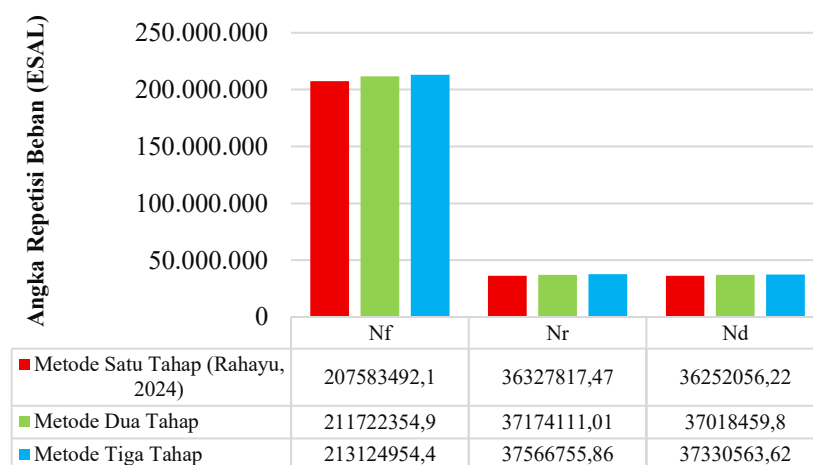
Gambar 5. 14 Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi Filler BA 50% Terhadap Nilai S_{mix} Campuran SMA

Berdasarkan gambar yang disajikan, metode pencampuran tiga tahap menunjukkan nilai tertinggi, diikuti oleh metode pencampuran dua tahap, sedangkan nilai terendah diperoleh pada metode pencampuran satu tahap. Rendahnya nilai VMA membuat nilai S_{mix} semakin tinggi. Metode pencampuran bertahap memiliki nilai VMA yang paling kecil di antara metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran satu tahap. Hal tersebut dikarenakan proses pencampuran agregat kasar dengan aspal, disusul dengan *filler* kemudian agregat halus, sehingga aspal dapat terdistribusi secara merata mengisi *void* mengakibatkan VMA memiliki nilai rendah setelah campuran dipadatkan. Nilai S_{mix} berdasarkan

metode satu tahap adalah 1.979,538 MPa, lalu metode dua tahap sebesar 2.127,239 MPa, dan metode tiga tahap sebesar 2.175,805 MPa. Penelitian ini sejalan dengan Hadi dkk. (2021) yang dalam penelitiannya menunjukkan nilai *VMA* pada campuran *Superpave* sebesar 17,70%, dan nilai *VMA* pada campuran *AC-WC* sebesar 19,48% dengan jenis aspal pen 60/70. Perbedaan nilai *VMA* tersebut menunjukkan bahwa campuran *AC-WC* memiliki rongga antar agregat yang lebih besar dibandingkan campuran *Superpave*. Didapatkan hasil *Smix* sebesar 1120,03 MPa untuk *Superpave* dan sebesar 782,72 MPa untuk campuran *AC-WC*. Dalam penelitian tersebut didapatkan bahwa semakin rendah nilai *VMA*, maka nilai *Smix* akan semakin besar.

5.2.5 Tinjauan Prediksi Umur Pelayanan Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA*

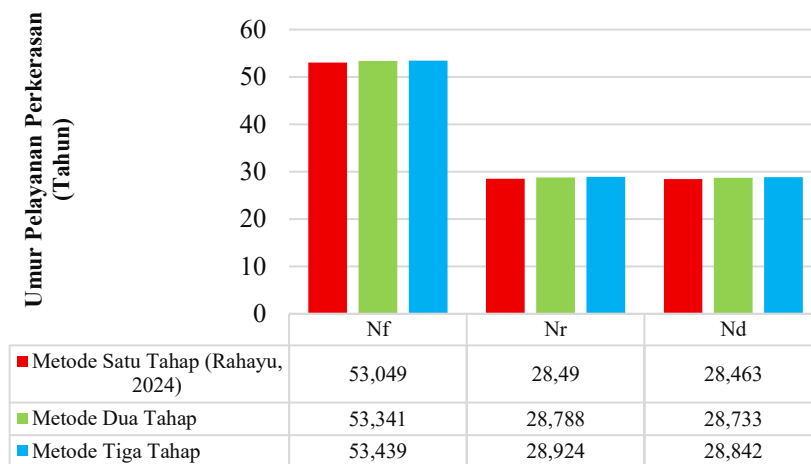
Prediksi umur pelayanan berdasarkan variasi metode pencampuran dari penggunaan limbah *BA* sebagai substitusi *filler* campuran perkerasan *SMA*, diharapkan dapat menjadi inovasi dalam mendukung keberlanjutan pada konstruksi perkerasan jalan. Apabila jenis perkerasan dan material tersebut diterapkan pada lalu lintas bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh maka akan menghasilkan nilai repetisi beban yang dapat dilihat Gambar 5. 15, secara detail perhitungan dapat dilihat pada Lampiran 13 hingga Lampiran 19.



Gambar 5. 15 Data Repetisi Beban dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran *SMA* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Berdasarkan gambar di atas didapatkan masing-masing kerusakan yang pertama terjadi pada metode pencampuran satu tahap, metode pencampuran dua tahap, dan metode pencampuran tiga tahap terjadi pada jenis kerusakan Nd. Gambar 5. 15 merupakan representasi berdasarkan Tabel 5. 5.

Pada metode pencampuran satu tahap , mampu menerima repetisi beban 207.583.492,09 *ESAL* hingga mengalami kerusakan Nf, 36.327.817,47 *ESAL* hingga mengalami kerusakan Nr dan nilai 36.252.056,22 *ESAL* hingga mengalami kerusakan Nd. Untuk metode pencampuran dua tahap, mampu menerima repetisi beban 211.722.354,94 *ESAL* sampai mengalami kerusakan Nf, 37.174.111,01 sampai mengalami kerusakan Nr dan 37.018.459,80 *ESAL* sampai mengalami kerusakan Nd. Pada metode pencampuran tiga tahap mampu menerima repetisi beban 213.124.954,42 *ESAL* hingga terjadi kerusakan Nf, 37.566.755,86 *ESAL* hingga terjadi kerusakan Nr dan 37.330.563,62 *ESAL* hingga terjadi kerusakan Nd. Seluruh variasi metode pencampuran memiliki nilai *ESAL* terkecil pada jenis kerusakan Nd. Berdasarkan perhitungan prediksi umur pelayanan, didapatkan lama tahun pelayanan sebagai berikut.



Gambar 5. 16 Prediksi Umur Pelayanan dengan Substitusi *Filler BA 50%* Campuran *SMA* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Berdasarkan hasil peninjauan dari Tabel 5. 1 hingga Tabel 5. 6 didapatkan perhitungan prediksi umur pelayanan campuran *SMA*. Berdasarkan Gambar 5. 16

didapatkan metode pencampuran satu tahap memiliki nilai paling rendah dibandingkan variasi metode pencampuran lainnya, yaitu 53 tahun 17 hari untuk kerusakan Nf, 28 tahun 5 bulan 26 hari untuk kerusakan Nr dan 28 tahun 5 bulan 16 hari untuk kerusakan Nd. Kemudian diikuti oleh metode pencampuran dua tahap dengan 53 tahun 4 bulan 2 hari untuk kerusakan Nf, 28 tahun 9 bulan 13 hari untuk kerusakan Nf, dan 28 tahun 8 bulan 24 hari untuk kerusakan Nd. Terakhir, metode pencampuran tiga tahap memiliki nilai umur pelayanan paling baik dengan nilai 53 tahun 5 bulan 8 hari untuk kerusakan Nf, 28 tahun 11 bulan 2 hari untuk kerusakan Nr, dan 28 tahun 10 bulan 3 hari untuk kerusakan Nd. Umur rencana yang dikehendaki adalah 20 tahun, dengan demikian seluruh variasi metode pencampuran pada perkerasan *SMA* dengan *filler BA* 50% memiliki kemampuan yang sangat baik, dikarenakan telah melebihi dari desain umur rencana. Campuran perkerasan *SMA* dirancang mampu tahan terhadap deformasi permanen seperti alur. Dalam penelitian ini, modulus yang dihasilkan dari seluruh variasi metode pencampuran pada campuran *SMA* jauh lebih besar dibanding modulus *AC-BC* yang merupakan letak lapisan *SMA* kasar. Modulus yang didapatkan dari metode pencampuran satu tahap hingga tiga tahap berturut-turut adalah 1.979,538 MPa, 2.127,239 MPa, dan 2.175,805 MPa. Sedangkan modulus *AC-BC* adalah 1.200 MPa. Kesenjangan nilai modulus ini membuat lapisan aspal pada desain perkerasan sangat baik, sehingga memiliki ketahanan yang lebih tinggi dibanding LFA. Secara nilai, prediksi umur pelayanan pada desain perkerasan penelitian ini mampu tahan terhadap Nd dan Nr. Meskipun Nd dan Nr telah melebihi umur rencana desain, Nf menghasilkan umur pelayanan yang lebih besar akibat inovasi dengan substitusi *filler BA* 50% yang merupakan kadar optimum substitusi limbah tersebut berdasarkan Rahayu (2024). Berdasarkan penelitian tersebut stabilitas maksimum dan *flow* terendah berada pada kadar 50%, dan *MQ* memperlihatkan daya tahan campuran pada kadar tersebut. Pada segi durabilitas, *BA* memiliki peningkatan paling baik pada parameter *IRS* dengan kadar 50%, menunjukkan campuran tahan terhadap kerusakan seperti keadaan yang lembab. Selain dari segi material, pada segi variasi metode pencampuran, dapat dilihat berdasarkan data bahwa metode pencampuran tiga tahap memiliki nilai paling besar modulusnya, menunjukkan

bahwa metode pencampuran mempengaruhi umur pelayanan. kerusakan Nd sejalan dengan penelitian Panjago dan Hadi (2024) menyebutkan bahwa kerusakan dengan pemodelan viskoelastik pertama terjadi pada Nd, lalu Nr, dan terakhir Nf. Penelitian tersebut menyebutkan pada hasil analisis dengan MDPJ 2017 menyebutkan lapisan aspal tebal, namun tidak diiringi LFA yang tebal mengakibatkan kurangnya daya dukung pada LFA tersebut, sehingga terjadilah kerusakan pertama pada Nd. Adapun jika distribusi beban tidak baik, maka lapisan aspal yang tebal tidak akan mampu menyebarkan beban secara efektif, menjadikan Nd mengalami rusak pertama kali.

5.2.6 Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* Terhadap Seluruh Karakteristik Pengujian

BA 50% Campuran Perkerasan *SMA* Terhadap Seluruh Karakteristik Pengujian

Berikut merupakan rekapitulasi hasil penelitian dari pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik volumetrik, kekuatan struktur, dan durabilitas dapat dilihat pada Tabel 5. 10 hingga Tabel 5. 12 berikut.

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* Terhadap Karakteristik Volumetrik

Metode	Pemenuhan Spesifikasi Terhadap Parameter			
	<i>VITM</i>	<i>VFWA</i>	<i>VMA</i>	<i>Density</i>
Dua tahap	√	√	√	√
Tiga tahap	√	√	√	√

Keterangan

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* Terhadap Karakteristik Kekuatan Struktur

Metode	Pemenuhan Spesifikasi Terhadap Parameter				
	<i>Stability</i>	<i>Flow</i>	<i>MQ</i>	<i>ITS</i>	<i>CL</i>
Dua tahap	√	√	√	√	√
Tiga tahap	√	√	√	√	√

Keterangan

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Tabel 5. 12 Rekapitulasi Pengaruh Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* Terhadap Karakteristik Durabilitas

Metode	Pemenuhan Spesifikasi Terhadap Parameter		
	<i>IRS</i>	<i>TSR</i>	<i>DD</i>
Dua tahap	√	√	√
Tiga tahap	√	√	√

Keterangan

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

5.2.7 Rekapitulasi Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* dan Prediksi Umur Pelayanan

Rekapitulasi hasil pengujian dengan menggunakan aspal pen 60/70 beserta prediksi umur pelayanan dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 5. 13 Rekapitulasi Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA 50%* Campuran Perkerasan *SMA* dan Prediksi Umur Pelayanan

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Satu Tahap (Rahayu, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
Karakteristik Volumetrik	<i>VITM</i> (%)	4,163	3,734	3,601	Metode pencampuran tiga tahap menunjukkan nilai <i>VITM</i> yang lebih rendah dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap tidak signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah rongga udara pada metode pencampuran tiga tahap lebih sedikit dibandingkan metode satu tahap , meskipun perbedaannya relatif kecil dan tidak terlalu signifikan.
	<i>VFWA</i> (%)	76,927	78,740	79,361	Metode pencampuran tiga tahap menunjukkan nilai <i>VFWA</i> lebih besar dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap. Hal ini menunjukkan rongga yang terisi aspal pada metode pencampuran tiga tahap paling besar. Adapun perbedaan tersebut tidak signifikan.
	<i>VMA</i> (%)	17,930	17,562	17,449	Metode pencampuran satu tahap memiliki nilai <i>VMA</i> paling besar. Hal ini menunjukkan persen rongga antar butiran agregat paling besar. Adapun dengan metode tiga tahap hasilnya tidak signifikan.
	<i>Density</i>	2,237	2,247	2,250	Metode pencampuran tiga tahap memiliki <i>density</i> paling besar di antara metode pencampuran yang lain. Hal ini menunjukkan nilai kepadatan semakin baik, dengan hasil analisis menunjukkan tidak signifikan.

Lanjutan Tabel 5. 13 Rekapitulasi Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* dan Prediksi Umur Pelayanan

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Satu Tahap (Rahayu, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
Kekuatan Struktur	<i>Stability</i> (kg)	1020,529	1118,489	1192,680	Nilai <i>stability</i> pada campuran dengan metode pencampuran tiga tahap cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap, dengan hasil analisis signifikan. Hal ini menunjukkan metode tersebut semakin baik dalam menahan beban lalu lintas.
	<i>Flow</i> (mm)	2,767	2,750	2,533	Nilai <i>flow</i> pada campuran dengan metode pencampuran tiga tahap cenderung lebih rendah dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap, dengan hasil analisis signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa metode tersebut bersifat lebih kaku untuk menahan beban lalu lintas.
	<i>MQ</i> (Kg/mm)	368,879	406,901	471,159	Nilai <i>MQ</i> pada campuran dengan metode pencampuran bertahap menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode pencampuran satu tahap dengan hasil yang signifikan. Hal tersebut sejalan dengan nilai stabilitas dan <i>flow</i> .
	<i>ITS</i> (KPa)	821,966	895,673	967,291	Nilai <i>ITS</i> pada metode pencampuran tiga tahap menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode satu tahap dengan hasil analisis signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa metode bertahap memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap gaya tarik tidak langsung.

Lanjutan Tabel 5. 13 Rekapitulasi Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* dan Prediksi Umur Pelayanan

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Satu Tahap (Rahayu, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
	<i>CL</i> (%)	4,990	4,205	3,875	Nilai <i>CL</i> pada metode tiga tahap menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan metode satu tahap secara tidak signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa campuran dengan metode bertahap memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap keausan serta durabilitas yang lebih tinggi dibandingkan metode satu tahap.
Karakteristik Durabilitas	<i>IRS</i> (%)	97,010	97,625	98,392	Nilai <i>IRS</i> pada metode pencampuran tiga tahap menunjukkan hasil tinggi dibandingkan dengan metode lainya dengan stabilitas signifikan, mencerminkan kemampuan campuran dalam mempertahankan kekuatannya terhadap pengaruh lingkungan, seperti suhu, kondisi cuaca, dan air.
	<i>TSR</i> (%)	91,910	92,317	93,259	Nilai <i>TSR</i> pada campuran dengan metode pencampuran tiga tahap menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan metode satu tahap dengan lama perendaman signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa campuran memiliki ketahanan tarik terhadap pengaruh kelembapan.
	<i>DD</i> (%)	0,119	0,109	0,101	Nilai <i>DD</i> pada pencampuran tiga tahap menunjukkan hasil lebih rendah dibandingkan metode lain dan tidak signifikan. Penurunan nilai <i>DD</i> mengindikasikan campuran aspal lebih baik dalam menahan aliran aspal pada suhu tinggi, sehingga lebih stabil tahan terhadap deformasi.

Lanjutan Tabel 5. 13 Rekapitulasi Hasil Pengujian Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran dengan Substitusi *Filler BA* 50% Campuran Perkerasan *SMA* dan Prediksi Umur Pelayanan

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Satu Tahap (Rahayu, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
<i>Stiffness Modulus</i>	<i>Sbit</i> (MPa)	10,795			Nilai <i>Sbit</i> pada ketiga metode pencampuran tidak menunjukkan perbedaan karena seluruh campuran menggunakan jenis aspal yang sama, pen 60/70.
	<i>Smix</i> (MPa)	1979,538	2127,239	2175,805	Metode pencampuran tiga tahap menghasilkan nilai <i>Smix</i> paling tinggi diantara metode lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap mampu meningkatkan kekakuan campuran yang didukung oleh karakteristik volumetrik yang lebih optimal.
Prediksi Umur Pelayanan	Nf	53 tahun 17 hari	53 tahun 4 bulan 2 hari	53 tahun 5 bulan 8 hari	Nilai umur pelayanan akibat kerusakan Nf paling besar terdapat pada metode pencampuran tiga tahap. Nilai umur pelayanan Nf merepresentasikan modulus <i>SMA</i> yang besar.
	Nr	28 tahun 5 bulan 26	28 tahun 9 bulan 13 hari	28 tahun 11 bulan 2 hari	Umur pelayanan akibat kerusakan Nr tertinggi diperoleh pada metode pencampuran tiga tahap. Pada variasi metode pencampuran, Nr merupakan kerusakan kedua yang terjadi.
	Nd	28 tahun 5 bulan 16 hari	28 tahun 8 bulan 24 hari	28 tahun 10 bulan 3 hari	Umur pelayanan terhadap kerusakan Nd pada metode pencampuran tiga tahap menunjukkan nilai yang paling tinggi dibandingkan metode lainnya. Kerusakan ini pertama kali terjadi karena modulus lapis aspal lebih tinggi dibanding modulus LFA.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dari rangkaian penelitian yang telah dilaksanakan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan pengaruh variasi metode pencampuran dengan penggunaan *filler* 50% *BA* pada campuran *SMA* sebagai berikut:

1. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik volumetrik menghasilkan metode tiga tahap lebih unggul dibandingkan metode satu tahap. Kondisi ini tercermin dari penyebaran aspal yang lebih homogen, sehingga campuran yang dihasilkan menjadi lebih padat. Berdasarkan uji statistik, didapatkan bahwa seluruh parameter karakteristik volumetrik memiliki pengaruh tidak signifikan dari pengaruh variasi metode pencampuran.
2. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik kekuatan struktur memberikan hasil bahwa metode pencampuran tiga tahap memiliki performa mekanis yang lebih baik dibandingkan metode satu tahap. Proses pencampuran yang lebih homogen menghasilkan susunan agregat yang lebih rapat, sehingga memiliki kemampuan lebih tinggi dalam menahan beban serta mengurangi potensi terjadinya disintegrasi. Parameter *flow*, *MQ*, dan *ITS* didapatkan pengaruh antar variasi metode pencampuran secara signifikan. Sedangkan nilai *CL* tidak signifikan pengaruh antar variasi metode pencampuran
3. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap karakteristik durabilitas menghasilkan metode pencampuran tiga tahap lebih baik dibanding metode satu tahap. Metode pencampuran tiga tahap dapat meningkatkan durabilitas dengan *void* yang lebih kecil, kekuatan yang lebih tinggi sehingga lebih tahan terhadap air dan temperatur. Diperoleh parameter stabilitas perendaman 24 jam dan *ITS* perendaman 24 jam menghasilkan pengaruh signifikan terhadap variasi metode pencampuran. Sedangkan parameter *DD* tidak signifikan .

4. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap *stiffness modulus* menghasilkan nilai *Sbit* yang sama dalam seluruh metode pencampuran. Sedangkan metode pencampuran tiga tahap menghasilkan nilai *Smix* paling tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh karakteristik volumetrik campuran yang memiliki rongga udara lebih kecil sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat.
5. Pengaruh variasi metode pencampuran terhadap prediksi umur pelayanan menghasilkan metode pencampuran tiga tahap memiliki umur pelayanan yang lebih panjang dibanding metode satu tahap. Hal tersebut dikarenakan metode tiga tahap memiliki nilai modulus yang jauh lebih tinggi.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian pengaruh variasi metode pencampuran dengan penggunaan *filler* 50% *BA* pada campuran *SMA*, maka peneliti memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Berdasarkan variasi metode pencampuran, metode pencampuran tiga tahap memiliki keunggulan yang paling baik dari seluruh karakteristik *SMA*, *SM*, dan umur pelayanan. Oleh karena itu, disarankan agar penelitian selanjutnya mengkaji aspek biaya dan waktu pelaksanaan berdasarkan variasi metode pencampuran yang digunakan, sehingga dapat diperoleh metode yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga efisien secara ekonomis dan praktis.
2. Penelitian ini belum mengkaji sifat senyawa serta kandungan kimia pada limbah *BA*. Oleh karena itu, diperlukan pengujian lanjutan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja campuran perkerasan.
3. Perlu dilakukan penelitian lanjutan terkait pemanfaatan limbah *BA* sebagai substitusi *filler* pada campuran bergradasi lainnya dengan variasi metode pencampuran. Upaya ini diharapkan dapat meningkatkan nilai guna limbah *BA* serta mendukung pengembangan material perkerasan yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, A. F., Pradani, N., dan Batti, J.F. 2018. Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Viatop⁶⁶ Pada Campuran Stone Matrix Asphalt Terhadap Titik Lembek Aspal Dan Sifat Drain Down Campuran. *Jurnal HPJI*, 4(1), 49-58. DOI: <https://doi.org/10.26593/jh.v4i1.2848.%25p>
- Badan Pusat Statistik. 2025. *Konstruksi Dalam Angka 2025. Volume 14, 2025*.
- Bulgis, B., dan Alkam, R. B. 2017. Pemanfaatan Agregat Alami dan Agregat Batu Pecah Sebagai Material Perkerasan Pada Campuran Aspal Beton. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 19(1). <https://doi.org/10.35313/potensi.v19i1.530>
- Chasanah, F., dan Sukmo, T. A. 2023. Pengaruh Bubuk Talk Sebagai Bahan Filler Pengganti pada Campuran AC-WC. Dalam *AJIE-Asian Journal of Innovation and Entrepreneurship*. 7(3), 23-32.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2024. *Manual Desain Perkerasan Jalan No. 03/M/BM/ 2024*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2025. *Spesifikasi Umum 2025* (Direktorat Jenderal Bina Marga). Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga
- Firdaus, R. M., dan Firdaus, F. 2025. Pemanfaatan Limbah Batu Bara (Bottom Ash) Sebagai Filler dan Pengaruh Kehalusan Pada Campuran Lapis Aus AC-WC. *Rang Teknik Journal*, 8(1), 1-5. DOI: <https://doi.org/10.31869/rtj.v8i1.5230>
- Hadi, M. A., Asrorunniam, A. F., dan Apriliyanti, H. R. 2025. Studi Eksperimental Terhadap Dampak Metode Pencampuran Dalam Mengoptimalkan Performa Perkerasan Bergradasi Superpave. *Jurnal Transportasi*, 25(3), 205–214. DOI: <https://doi.org/10.26593/jtrans.v25i3.9894.205-214>
- Hadi, M. A., dan Fauziah, M. 2022. Studi komparasi prediksi umur pelayanan antara campuran Superpave dan AC-WC menggunakan pemodelan viskoelastik dan elastik. *Teknisia*, 27(02), 71-82. DOI: <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol27.iss2.art1>
- Hadi, M. A., Fauziah, M., dan Subarkah. 2021. Comparative Study of Marshall Properties and Durability of Superpave and AC-WC Pavement by Using Starbit E-55 and Pen 60/70. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 933(1), 012003. DOI 10.1088/1755-1315/933/1/012003
- Hesami, E., Birgisson, B., and Kringos, N. 2015. Effect of mixing sequence on the workability and performance of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup2), 197-213. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1077008>

- Huang, Y. H., 2004. *Pavement analysis and design (2nd ed.)*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Hujiyanto, Lakawa, I., Hakiman, & Paembonan, M. Y. 2024. Analisis Pengaruh Ukuran Maksimum Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan dan Porositas Pada Beton Normal. *Sultra Civil Engineering Journal*, 5(2), 384–397.
- Intarti, D. E., Bethary, R. T., Budiman, A., dan Yohana, E. 2024. Kinerja Campuran Stone Matrix Asphalt Menggunakan Serat Selulosa Eceng Gondok. Dalam *Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia*, 10(2), 119–130. DOI: <https://doi.org/10.26593/jhpji.v10i2.8380.119-130>
- Iqbal, dan Fauziah, M. 2023. Studi Eksperimental Penggunaan Bahan Tambah Limbah Ban Karet dengan Metode Pencampuran Bertahap terhadap Kinerja Campuran Hot Rolled Sheet-Wearing Course. *Teknik*, 44(2), 167–175. DOI: 10.14710/teknik.v44i2.57565
- Iqbal, M. dan Prihutomo, N. B., 2025. Analisis Program *Kenpave* pada Perancangan Perkerasan Lentur Metode AASTHO 1993 dan MDP 2017. *CIVeng*, pp, 6(1), 39-48. DOI: <https://doi.org/10.30595/civeng.v6i1.23771>
- Ismael, M., Fattah, M. Y., dan Jasim, A. F. 2022. Permanent Deformation Characterization of Stone Matrix Asphalt Reinforced by Different Types of Fibers. *Journal of Engineering*, 28(2), 99–116. DOI: <https://doi.org/10.31026/j.eng.2022.02.07>
- Kim, Y. M., Kim, K., dan Le, T. H. M. 2024. Advancing Sustainability and Performance with Crushed Bottom Ash as Filler in Polymer-Modified Asphalt Concrete Mixtures. *Polymers*, 16(12), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16121683>
- Kok, B. V., dan Kuloglu, N. 2011. Effects of Two-Phase Mixing Method on Mechanical Properties of Hot Mix Asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 12(4), 721–738. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2011.9713892>
- Lia, N., dan Mahardi, P. 2022. Evaluasi Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Aplikasi *Kenpave*. *Rekayasa Teknik Sipil*, 4(2), 1-10.
- Mohammed, K. A., Mansi, A. I., dan Hussein, Y. R. 2021. Performance evaluation of asphalt binder modified by natural rock asphalt. *Revue des Composites et des Matériaux Avances*, 31(5), 291–295. DOI: 10.18280/rcma.310504
- Panjago, F., dan Hadi, M. A. 2024. Evaluasi Kerusakan Jalan dan Kinerja Jalan Menggunakan Program *Kenpave* Dengan Pemodelan Elastik Dan Viskoelastik Pada Ruas Jalan Klangon Tempel Yogyakarta. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 29(2), 297–308.
- Phale, A. H., dan Thakur, S. R. 2021. Comparative Analysis Of Modified Bitumen With Bottom Ash For Indian Road Construction. 6(4), 66-75. DOI 10.51397/OAIJSE04.2021.0013

- Priambodo, W., dan Fauziah, M. 2026. Pemanfaatan fly ash batu bara sebagai filler pengganti terhadap karakteristik campuran AC-BC dengan metode pencampuran satu tahap dan metode pencampuran bertahap. *CE ReForm*, 1(1), 356-365.
- Pursitasari, I. D., Harianto, B., Wulan, S. S., Hermanto, D., & Ardianto, D. (2024). Multivariat Analysis Of Variance (MANOVA) Di Bidang Kesehatan Dan Pendidikan MIPA. *Jurnal Ilmiah Kanderang Tingang*, 15(1), 117-126. DOI: <https://doi.org/10.37304/jikt.v15i1.307>
- Rahayu, W. 2024. *Pemanfaatan Limbah Bottom Ash Batu Bara Sebagai Filler Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA). Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia.
- Rencher, A.C.. 2002. *Methods of Multivariate Analysis*, 2nd ed. Canada.
- Setiowati, R., dan Putra, M. F. 2023. Struktur Biaya Produksi Aspal Buton Untuk Kebutuhan Infrastruktur Sebagai Substitusi Impor. *Jurnal Teknologi dan Manajemen*, 21(1), 35–42. DOI: <https://doi.org/10.52330/jtm.v21i1.94>
- Singh, A. K., dan Sahoo, J. P. 2021. Rutting prediction models for flexible pavement structures: A review of historical and recent developments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 8(3), 315-338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.04.003>
- Sonawane, S. K., Dwivedi, A. K., dan Naktode, P. L. 2024. A Comprehensive Systematic Review on the Application of Coal Ash in Bituminous Pavements Nanotechnology Perceptions A Comprehensive Systematic Review on the Application of Coal Ash in Bituminous Pavements. *Nanotechnology Perceptions*, 20 (S15), 1660-6795. DOI: 10.62441/nano-ntp.vi.4672
- Sugema, M. R., dan Maulana, R. 2024. Analisis Perbandingan Perencanaan Tebal Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Metode AASHTO 1993 dan MDP 2024 dalam Konteks Kebijakan Transportasi Berkelanjutan. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik*, 23(2), 112-118.
- Sukirman, S., 2010. Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur. Bandung; Nova.
- Tayh, S. A., dan Alghrery, H. S. J. 2021. Evaluation of The Effect of Gradation on Mechanical properties of Stone Mastic Asphalt Mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1105(1), 012087. DOI 10.1088/1757-899X/1105/1/012087
- Tutu, K. A., dan Tuffour, Y. A. 2016. Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 06(02), 84–93. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2016.62008>
- Yaro, N. S. A., Bin Napiyah, M., Sutanto, M. H., Usman, A., dan Saeed, S. M. 2021. Performance Evaluation of Waste Palm Oil Fiber Reinforced Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Traditional and Sequential Mixing Processes. *Case*

Studies in Construction Materials Journal, 15(1), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00783>.

Zangoeeinia, P., Moazami, D., Bilondi, M. P., dan Zaresefat, M. 2023. Improvement of pavement engineering properties with calcium carbide residue (CCR) as filler in Stone Mastic Asphalt. *Results in Engineering*, 20, 101501. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101501>

LAMPIRAN



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. ftp.uui.ac.id

Lampiran 1 Hasil Pengujian *Marshall Standard* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

HASIL PENGUJIAN MARSHALL STANDARD BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Tanggal Pengujian : Februari 2026
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Dikerjakan Oleh : Vania Nabila Damayanti
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	Benda Uji	Tinggi (mm)	Persentase Aspal (%)		Berat			Volume (gram)	Density (gr/cc)	VMA (%)	VFWA (%)	VITM (%)	Meas	Adjust	Angka Koreksi	Stability (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)
			(%)	(%)	Udara (gram)	Air (gram)	SSD (gram)											
Satu Tahap	1	70,720	6,838	6,4	1184,97	1196,62	661,08	535,540	2,213	18,826	72,326	5,210	63	1209,865	0,849	1026,772	2,800	366,704
	2	68,760	6,838	6,4	1186,55	1190,32	660,25	530,070	2,238	17,879	77,045	4,104	58	1113,844	0,890	991,321	2,750	360,480
	3	70,210	6,838	6,4	1192,36	1186,30	658,74	527,560	2,260	17,085	81,409	3,176	62	1190,660	0,876	1043,495	2,750	379,453
Rata-rata									2,237	17,930	76,927	4,163				1020,529	2,767	368,879
Dua Tahap	1	69,957	6,838	6,4	1190,10	1206,01	676,22	529,790	2,246	17,590	78,588	3,766	91	1304,068	0,844	1100,591	2,650	415,318
	2	69,583	6,838	6,4	1188,59	1204,09	675,36	528,730	2,248	17,530	78,917	3,696	94	1347,059	0,848	1141,752	2,850	400,615
	3	69,923	6,838	6,4	1184,89	1200,69	673,37	527,320	2,247	17,567	78,716	3,739	92	1318,399	0,844	1113,122	2,750	404,772
Rata-rata									2,247	17,562	78,740	3,734				1118,489	2,750	406,901
Tiga Tahap	1	66,744	6,838	6,4	1191,94	1207,83	678,07	529,760	2,250	17,458	79,309	3,612	95	1361,390	0,889	1210,514	2,450	494,087
	2	70,388	6,838	6,4	1190,82	1206,59	677,44	529,150	2,250	17,441	79,406	3,592	97	1390,051	0,840	1167,351	2,550	457,785
	3	68,859	6,838	6,4	1189,71	1205,51	676,81	528,700	2,250	17,447	79,368	3,600	98	1404,381	0,855	1200,174	2,600	461,605
Rata-rata									2,250	17,449	79,361	3,601				1192,680	2,533	471,159

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:



BERLIAN KUSHARI

E30CAEB7-49E5-44B7-AB04-E32E7F2E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Signed by:



MUHAMAD ABDUL HADI

25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

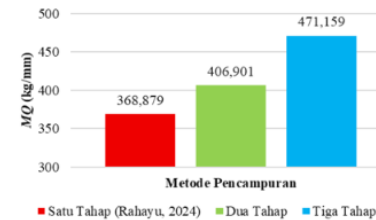
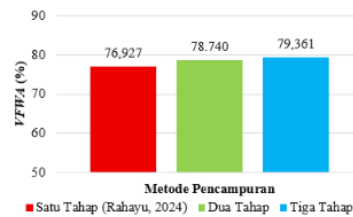
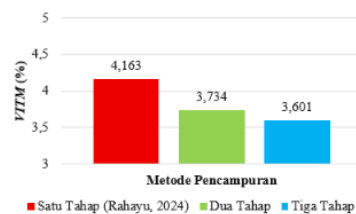
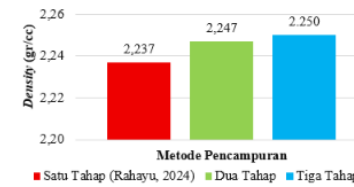
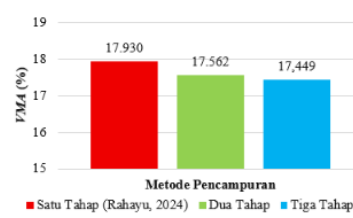
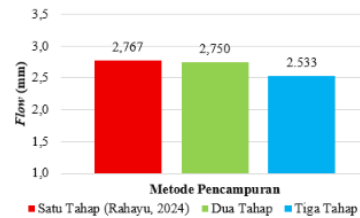
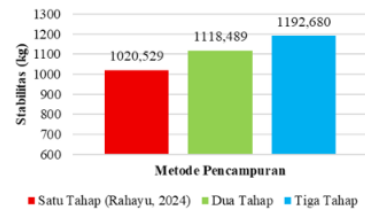
Yogyakarta, April 2026
Peneliti

[Signature]

Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064

Lanjutan Lampiran 1 Hasil Pengujian *Marshall Standard* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL PENGUJIAN *MARSHALL STANDARD* BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Signed by:

BERLIAN KUSHARI
E30CAEB7-49E5-44B7-ABC4-E32E7F2E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064

Lampiran 2 Hasil Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

HASIL PENGUJIAN INDEX OF RETAINED STRENGTH (IRS) BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Tanggal Pengujian : Februari 2026
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*
Dikerjakan Oleh : Vania Nabila Damayanti
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	Benda Uji	Tinggi	Tinggi Sampel				Koreksi Tinggi	Arloji Stability			Stability 24 Jam sampe
			Tinggi Sampel		Koreksi			Meas	Kalibrasi	Adjust	
		(mm)	MIN	MAX	MIN	MAX					
Satu Tahap	1	70,41	68,30	71,40	0,86	0,83	0,87	60	19,204	1152,252	1001,998
	2	69,12	68,30	71,40	0,86	0,83	0,89	59	19,204	1133,048	1008,413
	3	70,23	68,30	71,40	0,86	0,83	0,88	57	19,204	1094,639	959,634
Rata-rata											990,015
Dua Tahap	1	71,12	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	90	14,318	1288,601	1073,031
	2	71,42	71,40	73,00	0,83	0,81	0,83	93	14,318	1331,555	1104,913
	3	67,70	66,70	68,30	0,89	0,86	0,87	88	14,318	1259,966	1097,824
Rata-rata											1091,923
Tiga Tahap	1	68,09	66,70	68,30	0,89	0,86	0,86	97	14,318	1388,826	1199,946
	2	66,99	66,70	68,30	0,89	0,86	0,88	95	14,318	1360,190	1203,088
	3	71,37	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	94	14,318	1345,873	1117,465
Rata-rata											1173,500

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:

BERLIAN KUSHARI

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI

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

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

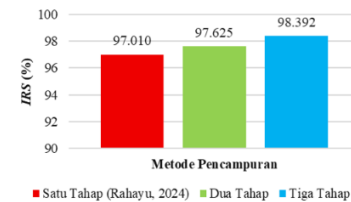
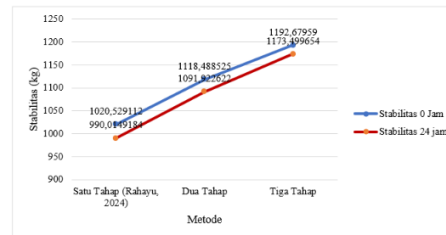


Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064

Lampiran 3 Rekapitulasi Hasil Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN INDEX OF RETAINED STRENGTH (IRS) BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Metode Pencampuran	Benda Uji	Stabilitas (KPa)		IRS (%)
		Rendaman 0,5 Jam	Rendaman 24 Jam	
Satu Tahap	1	1026,772	1001,998	97,587
	2	991,321	1008,413	101,724
	3	1043,495	959,634	91,963
Rata-rata				97,092
Dua Tahap	1	1100,591	1073,031	97,496
	2	1141,752	1104,913	96,773
	3	1113,122	1097,824	98,626
Rata-rata				97,632
Tiga Tahap	1	1210,514	1199,946	99,127
	2	1167,351	1203,088	103,061
	3	1200,174	1117,465	93,109
Rata-rata				98,432



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:

BERLIAN KUSHARI
E30CA8D7-49E5-4402-AB04-E32F72E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM, ASEAN, Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5E0A-4680-AF4
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti


Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 4 Hasil Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* Perendaman 0,5 Jam Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

HASIL PENGUJIAN INDIRECT TENSILE STRENGTH (ITS) PERENDAMAN 0,5 JAM BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Tanggal Pengujian : Februari 2026
Tipe Campuran : Stone Matrix Asphalt (SMA)

Dikerjakan Oleh : Vania Nabila Damayanti
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	Benda Uji	Tinggi (mm)	Angka Koreksi				Koreksi Tinggi	Diameter (inchi)	Diameter Sampel (inchi)				Koreksi Diameter (A0)	Arloji Stability			Stability 0, jam (kPa) sampel
			Tinggi Sampel		Koreksi				Tebal Sampel		Koreksi			Meas	Kalibrasi	Adjust	
			MIN	MAX	MIN	MAX			MIN	MAX	MIN	MAX					
Satu Tahap	1	70,35	68,30	71,40	0,86	0,83	0,84	4,01	4,00	4,10	0,16	0,15	0,16	32	31,565	1010,074	834,939
	2	72,21	71,40	73,00	0,83	0,81	0,82	4,01	4,00	4,10	0,16	0,15	0,16	33	31,565	1041,638	817,523
	3	70,28	68,30	71,40	0,86	0,83	0,84	3,99	3,90	4,00	0,16	0,16	0,16	31	31,565	978,509	813,437
Rata-rata																	821,966
Dua Tahap	1	72,45	71,40	73,00	0,83	0,81	0,82	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	35	31,565	1104,768	855,389
	2	71,36	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	4,03	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	36	31,565	1136,333	910,466
	3	71,00	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	4,02	4,00	4,10	0,16	0,15	0,16	36	31,565	1136,333	921,165
Rata-rata																	895,673
Tiga Tahap	1	71,78	71,40	73,00	0,83	0,81	0,83	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	38	31,565	1199,462	947,664
	2	71,01	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	39	31,565	1231,027	991,695
	3	71,20	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	38	31,565	1199,462	962,512
Rata-rata																	967,291

Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:

BERLIAN KUSHARI
E30CAE87-89E9-4487-ABCA-E32E7F2E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti


Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 4 Hasil Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* Perendaman 24 Jam Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

HASIL PENGUJIAN INDIRECT TENSILE STRENGTH (ITS) PERENDAMAN 24 JAM BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Tanggal Pengujian : Februari 2026
Tipe Campuran : Stone Matrix Asphalt (SMA)

Dikerjakan Oleh : Vania Nabila Damayanti
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	Benda Uji	Tinggi (mm)	Angka Koreksi				Koreksi Tinggi	Diameter (inci)	Diameter Sampel (inci)				Koreksi Diameter (A0)	Arloji Stability			Stability 24 jam (kPa)
			Tinggi Sampel		Koreksi				Tebal Sampel		Koreksi			Meas	Kalibrasi	Adjust	
			MIN	MAX	MIN	MAX			MIN	MAX	MIN	MAX					
Satu Tahap	1	72,35	71,40	73,00	0,83	0,81	0,82	3,99	3,90	4,00	0,16	0,16	0,16	29	31,565	915,379	720,419
	2	71,34	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	3,98	3,90	4,00	0,16	0,16	0,16	30	31,565	946,944	768,541
	3	71,14	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	3,96	3,90	4,00	0,16	0,16	0,16	30	31,565	946,944	777,444
Rata-rata																	755,468
Dua Tahap	1	71,61	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	4,03	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	32	31,565	1010,074	803,756
	2	72,07	71,40	73,00	0,83	0,81	0,82	4,05	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	34	31,565	1073,203	837,749
	3	70,98	68,30	71,40	0,86	0,83	0,83	4,05	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	33	31,565	1041,638	839,058
Rata-rata																	826,854
Tiga Tahap	1	72,52	71,40	73,00	0,83	0,81	0,82	4,02	4,00	4,10	0,16	0,15	0,16	36	31,565	1136,333	881,709
	2	72,50	71,40	73,00	0,83	0,81	0,82	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	37	31,565	1167,898	903,875
	3	71,92	71,40	73,00	0,83	0,81	0,82	4,03	4,00	4,10	0,16	0,15	0,15	37	31,565	1167,898	920,686
Rata-rata																	902,090

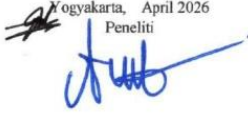
Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil


BERLIAN KUSHARI
E30DAEB7-49E5-4487-AB04-E92E7F3E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya


MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

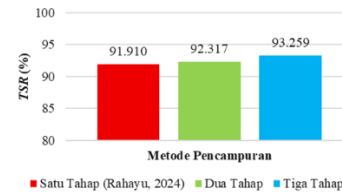
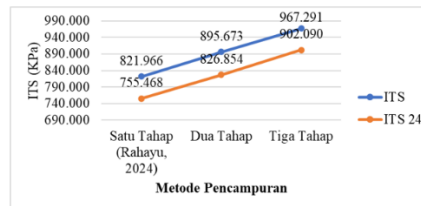
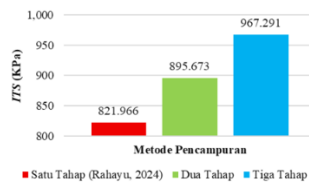

Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064



Lampiran 6 Rekap Hasil Pengujian ITS & TSR Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

REKAP HASIL PENELITIAN ITS & TSR BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Metode Pencampuran	Benda Uji	ITS (Kpa)		TSR (%)
		Rendaman 0,5 Jam	Rendaman 24 Jam	
Satu Tahap	1	834,939	720,419	86,284
	2	817,523	768,541	94,008
	3	813,437	777,444	95,575
Rata-rata		821,966	755,468	91,956
Dua Tahap	1	855,389	803,756	93,964
	2	910,466	837,749	92,013
	3	921,165	839,058	91,087
Rata-rata		895,673	826,854	92,355
Tiga Tahap	1	947,664	881,709	93,040
	2	991,695	903,875	91,144
	3	962,512	920,686	95,654
Rata-rata		967,291	902,090	93,280



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:

BERLIAN KUSHARI
E30C8A1E7-4B05-44B7-AB04-E32E727E6543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya

Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064

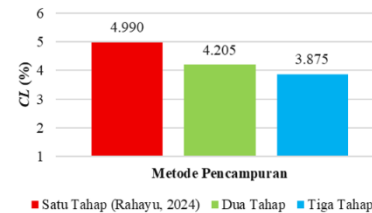
Lampiran 7 Rekap Hasil Pengujian *Cantabro Loss (CL)* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Tanggal Pengujian : Februari 2026
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Dikerjakan Oleh : Vania Nabila Damayanti
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

REKAP HASIL PENELITIAN *CANTABRO LOSS (CL)* BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Metode Pencampuran	Benda Uji	Berat (gram)		CL (%)
		Mo	Mi	
Satu Tahap	1	1176,770	1127,310	4,203
	2	1186,270	1117,570	5,791
	3	1179,480	1120,780	4,977
Rata-rata				4,990
Dua Tahap	1	1188,560	1138,476	4,214
	2	1190,350	1140,150	4,217
	3	1190,600	1140,800	4,183
Rata-rata				4,205
Tiga Tahap	1	1191,430	1145,298	3,872
	2	1190,630	1144,509	3,874
	3	1190,270	1144,090	3,880
Rata-rata				3,875



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:

BERLIAN KUSHARI
Ir. Berlian Kushari, M. Eng, TPM-ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalah. Jalan Raya

Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7804B-5E0A-4680-AF4
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti


Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064

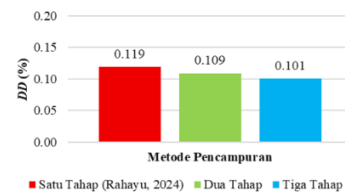
Lampiran 8 Rekap Hasil Pengujian *Draindown (DD)* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Tanggal Pengujian : Februari 2026
Tipe Campuran : *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Dikerjakan Oleh : Vania Nabila Damayanti
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

REKAP HASIL PENELITIAN *DRAINDOWN (DD)* BERDASARKAN VARIASI METODE PERCAMPURAN

Metode Pencampuran	Benda Uji	Berat (gram)			DD (%)
		m ₁	m ₂	m ₃	
Satu Tahap	1	346,130	1529,940	348,060	0.163
	2	345,410	1520,630	346,290	0.075
	3	347,260	1519,320	348,640	0.118
Rata-rata					0.119
Dua Tahap	1	197,210	1384,360	198,660	0.122
	2	338,090	1528,330	339,160	0.090
	3	339,020	1527,490	340,380	0.114
Rata-rata					0.109
Tiga Tahap	1	195,680	1376,670	196,960	0.108
	2	361,950	1552,170	363,010	0.089
	3	196,680	1378,450	197,920	0.105
Rata-rata					0.101



Disahkan Oleh
Manajer Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
Signed by:

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

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Vania Nabila Damayanti
NIN : 22 511 064



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 9 Hasil Analisis Nilai *Stiffness Modulus (SM)* Berdasarkan Variasi Metode Pencampuran

Tanggal Pengujian
Tipe Campuran

: Februari 2026
: Stone Matrix Asphalt (SMA)

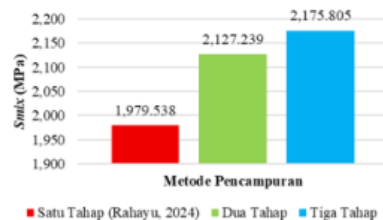
Dikerjakan Oleh
Diperiksa Oleh

: Vania Nabila Damayanti
: Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

HASIL ANALISIS NILAI STIFFNESS MODULUS (SM) BERDASARKAN VARIASI METODE PENCAMPURAN

STIFFNESS MODULUS (SM)

Metode Pencampuran	Temperature (°C)	Stiffness Modulus of Bitumen (<i>Sbit</i>) (Mpa)	Stiffness Modulus of Bitumen (<i>Smix</i>) (Mpa)
Satu Tahap	25	10,795	1979,538
Dua Tahap			2127,239
Tiga Tahap			2175,805



Disahkan Oleh
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Signed by:

BERLIAN KUSHARI
E30CAEB7-69E5-4487-AB04-63267E24543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kalab. Jalan Raya
Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
E25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Vania Nabila Damayanti
NIM : 22 511 064

Lampiran 10 Data Lalu Lintas Harian (LHR) Ruas Jalan Nasional Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh

Linkid	Nama Ruas	Veh1	Veh2	Veh3	Veh4	Veh5a	Veh5b	Veh6a	Veh6b	Veh7a	Veh7b	Veh7c	Veh8
1101600	BTS. KAB. BATANGHARI/KAB. SAROLANGUN - PAUH	4226	1732	61	503	16	5	120	1688	274	0	12	4

Sumber: Hasil Survei Kondisi Jalan TA. 2024 sesuai panjang SK 2022 No. 430/KPTS/M/2022

Lampiran 11 Data Pertumbuhan Lalu Lintas Didapatkan Dari Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Jambi Tahun 2022, 2023, 2024, dan 2025

Tahun	Mobil	Pertumbuhan (%)	Bus	Pertumbuhan (%)	Truk	Pertumbuhan (%)	kendaraan Bermotor - Sepeda Motor	Pertumbuhan (%)	Sarolangun	Pertumbuhan (%)
2022	6077		3465		9497		175347		194386	
2023	8052	32,500	2468	-28,773	10642	12,056	187353	6,847	208515	7,269
2024	8343	3,614	3466	40,438	10715	0,686	196527	4,897	219051	5,053
2025	10066	20,652	3476	0,289	11204	4,564	211723	7,732	236469	7,952
		18,922		0,000		5,769		6,492		6,758

Sumber: <https://jambi.bps.go.id/id/statistics-table/3/VjJ3NGRGa3dkRk5MTlU1bVNFOTVVbmQyVURSTVFUMDkjMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-kabupaten-kota-dan-jenis-kendaraan-di-provinsi-jambi---unit---2024.html> Akses (08.30 23/04/2026)

Lampiran 12 Hasil Perhitungan Nilai CESA 4 dan CESA 5 Berdasarkan Data LHR Ruas Jalan Nasional Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh dan Data Pertumbuhan Lalu Lintas BPS

Gol. Kend	LHR Tahun (Kend/Hari)			VDF 4		VDF 5		DD	DL	R		CESA 4		CESA 5	
	2024	2025	2028	Faktual	Normal	Faktual	Normal			(3 tahun)	(17 tahun)	Faktual	Normal	Faktual	Normal
	2025-2028	2028-2045	2025-2028	2028-2045	2025-2028	2028-2045	2025-2028			2025-2028	2028-2045	2025-2028	2028-2045	2025-2028	2028-2045
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
1	4226														
2	1732	1733,170	1736,686					0,5	1	3,002	17,092				
3	61	61,041	61,165					0,5	1	3,002	17,092				
4	503	503,340	504,361					0,5	1	3,002	17,092				
5a	16	16,011	16,043					0,5	1	3,002	17,092				
5b	5	5,003	5,014	1,2	1,2	1,3	1,3	0,5	1	3,002	17,092	3289,442	18766,618	3563,562	20330,502
6a	120	120,081	120,325	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	1	3,002	17,092	32894,418	187666,176	26315,534	150132,941
6b	1688	1689,141	1692,567	1,4	0,5	1,8	0,4	0,5	1	3,002	17,092	1295601,470	2639837,549	1665773,318	2111870,040
7a	274	274,185	274,741	13,8	4,6	25,4	6,0	0,5	1	3,002	17,092	2073006,211	3942240,814	3815533,171	5142053,236
7b	0	0,000	0,000					0,5	1	3,002	17,092				
7c	12	12,008	12,032	8,4	6,1	11,9	8,0	0,5	1	3,002	17,092	55262,622	228952,735	78288,714	300265,882
8	4														
Jumlah												3.460.054,16	7.017.463,89	5.589.474,30	7.724.652,60
Jumlah Faktual+Normal												10.477.518,06		13.314.126,90	

Keterangan Rumus

- (1) dan (2) = Didapatkan dari Lampiran 10
- (3) $= (2) \times \left(1 + \frac{i}{100}\right)^1$
- (4) $= (2) \times \left(1 + \frac{i}{100}\right)^4$
- (5) ,(6) ,(7), dan (8) = Didapatkan dari Tabel 3. 11
- (9) dan (10) = Didapatkan dari sub sub bab 3.10.1

Lanjutan Lampiran 12 Hasil Perhitungan Nilai *CESA* 4 dan *CESA* 5 Berdasarkan Data LHR Ruas Jalan Nasional Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh dan Data Pertumbuhan Lalu Lintas BPS

$$\begin{aligned}
 (11) \quad &= \frac{(1+0,01x\ i)^3-1}{0,001\ x\ i} \\
 (12) \quad &= \frac{(1+0,01x\ i)^{17}-1}{0,001\ x\ i} \\
 (13) \quad &= (3) \times (5) \times (9) \times (10) \times (11) \times 365 \\
 (14) \quad &= (4) \times (6) \times (9) \times (10) \times (12) \times 365 \\
 (15) \quad &= (3) \times (7) \times (9) \times (10) \times (11) \times 365 \\
 (16) \quad &= (4) \times (8) \times (9) \times (10) \times (12) \times 365
 \end{aligned}$$

Lampiran 13 Data *Properties* Material Lapis Perkerasan Dari Bagan 3A - FFF(1) 4

Lapis Perkerasan	Tebal Lapis Perkerasan		Modulus Elastisitas (KPa)			<i>Poisson Ratio</i>
	(mm)	(cm)	Satu Tahap	Dua Tahap	Tiga Tahap	
<i>AC-WC</i>	40	4	1100000	1100000	1100000	0,40
<i>SMA</i>	75	7,5	1979538,426	2127238,653	2175805,039	0,40
<i>AC BASE</i>	100	10	1500000	1500000	1500000	0,40
LFA A	200	20	220000	220000	220000	0,35
LFA B	150	15	170000	170000	170000	0,35
TP/ LFA C	200	20	131000	131000	131000	0,35
<i>Subgrade</i>	∞	∞	65000	65000	65000	0,45

Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan *Software KENPAVE* Metode Satu Tahap

```

INPUT FILE NAME -C:\Users\vania\Downloads\setupkenpave\Vania_Konvensional_20_04_2026.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Vania_Konvensional_04_20_2026

MATL = 3 FOR VISCOELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 7
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 5
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa|
unit weight in  $\text{kN/m}^3$ , and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 4 7.5 10 20 15 20
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.4 0.4 0.35 0.35 0.35 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 21.499 21.501 76.499
76.501
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.100E+06 2 1.980E+06
3 1.500E+06 4 2.200E+05 5 1.700E+05 6 1.310E+05 7 6.500E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 11
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 550
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 3
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 33

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 0.000 2 0.000 10.000
3 0.000 16.500

```

Ln 19, Col 57

32.027 characters

Plain text

Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software *KENPAVE* Metode Satu Tahap

DURATION OF MOVING LOAD (DUR) = 0
 NUMBER OF VISCOELASTIC LAYER (NVL) = 3
 LAYER NUMBERS WHICH ARE VISCOELASTIC (LNV) = 1 2 3
 CREEP TIMES (TYME) ARE: 0.001 0.003 0.01 0.03 0.1 0.3 1 3 10 30 100

FOR LAYER 1 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
 REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
 7.570E-10 2.269E-09 7.541E-09 2.244E-08 7.266E-08 2.010E-07 5.139E-07
 8.344E-07 9.089E-07 9.091E-07 9.091E-07

FOR LAYER 2 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
 REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
 4.206E-10 1.261E-09 4.191E-09 1.247E-08 4.038E-08 1.117E-07 2.856E-07
 4.637E-07 5.051E-07 5.052E-07 5.052E-07

FOR LAYER 3 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
 REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
 5.551E-10 1.664E-09 5.530E-09 1.645E-08 5.328E-08 1.474E-07 3.768E-07
 6.119E-07 6.665E-07 6.667E-07 6.667E-07

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

TIME = 0.001

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.00604	550.000 -6.672E-07	1186.636 5.206E-07	65.834 -6.672E-07	1181.356 5.150E-07
1	21.49900 (STRAIN)	0.00606	0.859 9.019E-07	0.859 9.019E-07	-2094.642 -7.266E-07	-1965.120 -7.266E-07
1	21.50100 (STRAIN)	0.00606	0.859 3.162E-06	0.863 3.186E-06	0.225 -7.269E-07	0.238 -7.269E-07
1	76.49900 (STRAIN)	0.00584	0.635 4.968E-06	0.635 4.971E-06	-0.025 -1.830E-06	-0.021 -1.830E-06
1	76.50100 (STRAIN)	0.00584	0.635 5.535E-06	0.636 5.549E-06	0.305 -1.830E-06	0.306 -1.830E-06

TIME = 0.003

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.00833	550.000 -1.635E-06	985.356 1.286E-06	65.833 -1.635E-06	980.421 1.270E-06
1	21.49900 (STRAIN)	0.00839	1.765 2.340E-06	1.765 2.340E-06	-1820.453 -1.904E-06	-1691.574 -1.904E-06
1	21.50100 (STRAIN)	0.00839	1.765 6.888E-06	1.779 6.976E-06	0.332 -1.905E-06	0.366 -1.905E-06
1	76.49900 (STRAIN)	0.00795	1.129 9.744E-06	1.130 9.755E-06	-0.217 -4.126E-06	-0.205 -4.126E-06
1	76.50100 (STRAIN)	0.00795	1.129 1.122E-05	1.131 1.127E-05	0.441 -4.126E-06	0.445 -4.126E-06

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

TIME = 0.01							
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL DISP.</u>	<u>VERTICAL STRESS (STRAIN)</u>	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	MINOR PRINCIAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)	
1	0.00000 (STRAIN)	0.01166	550.000 -4.740E-06	881.966 3.803E-06	72.790 -4.740E-06	871.409 3.691E-06	
1	21.49900 (STRAIN)	0.01173	4.106 6.638E-06	4.106 6.638E-06	-1558.837 -5.463E-06	-1431.623 -5.463E-06	
1	21.50100 (STRAIN)	0.01173	4.106 1.698E-05	4.160 1.732E-05	0.448 -5.463E-06	0.554 -5.463E-06	
1	76.49900 (STRAIN)	0.01073	2.159 2.079E-05	2.163 2.083E-05	-0.826 -9.971E-06	-0.790 -9.971E-06	
1	76.50100 (STRAIN)	0.01073	2.159 2.474E-05	2.166 2.490E-05	0.603 -9.971E-06	0.614 -9.970E-06	
TIME = 0.03							
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL DISP.</u>	<u>VERTICAL STRESS (STRAIN)</u>	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	MINOR PRINCIAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)	
1	0.00000 (STRAIN)	0.01593	550.000 -1.089E-05	702.507 8.887E-06	72.790 -1.089E-05	693.292 8.597E-06	
1	21.49900 (STRAIN)	0.01615	8.956 1.645E-05	8.957 1.645E-05	-1300.526 -1.371E-05	-1176.822 -1.371E-05	
1	21.50100 (STRAIN)	0.01615	8.956 3.860E-05	9.124 3.963E-05	0.431 -1.371E-05	0.727 -1.371E-05	
1	76.49900 (STRAIN)	0.01410	3.838 3.999E-05	3.848 4.010E-05	-2.054 -2.072E-05	-1.960 -2.072E-05	
1	76.50100 (STRAIN)	0.01410	3.838 4.859E-05	3.858 4.904E-05	0.730 -2.072E-05	0.758 -2.072E-05	
TIME = 0.1							
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL DISP.</u>	<u>VERTICAL STRESS (STRAIN)</u>	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	MINOR PRINCIAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)	
1	0.00000 (STRAIN)	0.02197	550.000 -2.602E-05	561.131 2.252E-05	83.925 -2.602E-05	543.980 2.078E-05	
1	21.49900 (STRAIN)	0.02229	19.899 4.083E-05	19.910 4.083E-05	-990.562 -3.455E-05	-875.186 -3.455E-05	
1	21.50100 (STRAIN)	0.02229	19.897 8.893E-05	20.409 9.207E-05	-0.226 -3.455E-05	0.666 -3.455E-05	
1	76.49900 (STRAIN)	0.01823	6.491 7.222E-05	6.521 7.253E-05	-4.379 -3.980E-05	-4.136 -3.980E-05	
1	76.50100 (STRAIN)	0.01823	6.491 8.916E-05	6.546 9.037E-05	0.710 -3.980E-05	0.782 -3.980E-05	

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

TIME = 0.3

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	<u>STRESS</u>	<u>STRESS</u>	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.02800	550.000	504.551	153.633	491.932
	(STRAIN)		-4.924E-05	4.952E-05	-4.924E-05	4.596E-05
1	21.49900	0.02830	37.567	37.633	-714.915	-613.430
	(STRAIN)		8.386E-05	8.387E-05	-7.144E-05	-7.144E-05
1	21.50100	0.02830	37.563	38.718	-2.114	0.145
	(STRAIN)		1.720E-04	1.791E-04	-7.144E-05	-7.144E-05
1	76.49900	0.02159	9.279	9.340	-7.182	-6.686
	(STRAIN)		1.077E-04	1.083E-04	-6.192E-05	-6.192E-05
1	76.50100	0.02159	9.278	9.391	0.485	0.629
	(STRAIN)		1.342E-04	1.368E-04	-6.192E-05	-6.192E-05

TIME = 1

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	<u>STRESS</u>	<u>STRESS</u>	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.03393	550.000	388.512	162.758	371.969
	(STRAIN)		-7.268E-05	8.973E-05	-7.268E-05	7.783E-05
1	21.49900	0.03409	63.347	63.636	-469.138	-387.968
	(STRAIN)		1.530E-04	1.532E-04	-1.279E-04	-1.279E-04
1	21.50100	0.03409	63.345	65.387	-5.415	-0.456
	(STRAIN)		2.940E-04	3.066E-04	-1.279E-04	-1.279E-04
1	76.49900	0.02424	11.939	12.043	-9.988	-9.139
	(STRAIN)		1.420E-04	1.430E-04	-8.400E-05	-8.400E-05
1	76.50100	0.02424	11.938	12.131	0.200	0.449
	(STRAIN)		1.778E-04	1.821E-04	-8.400E-05	-8.400E-05

TIME = 3

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	<u>STRESS</u>	<u>STRESS</u>	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.03836	550.000	454.395	292.414	441.624
	(STRAIN)		-5.506E-05	1.342E-04	-5.506E-05	1.192E-04
1	21.49900	0.03708	80.557	81.115	-350.691	-282.651
	(STRAIN)		2.042E-04	2.046E-04	-1.653E-04	-1.653E-04
1	21.50100	0.03708	80.551	83.054	-7.408	-0.336
	(STRAIN)		3.745E-04	3.898E-04	-1.653E-04	-1.653E-04
1	76.49900	0.02546	13.266	13.397	-11.334	-10.266
	(STRAIN)		1.586E-04	1.600E-04	-9.489E-05	-9.488E-05
1	76.50100	0.02546	13.266	13.506	0.093	0.407
	(STRAIN)		1.990E-04	2.043E-04	-9.489E-05	-9.489E-05

Lanjutan Lampiran 14 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Satu Tahap

TIME = 10

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.03901	550.000	443.179	292.414	431.044
	(STRAIN)		-5.206E-05	1.398E-04	-5.206E-05	1.243E-04
1	21.49900	0.03760	83.849	84.470	-330.665	-265.072
	(STRAIN)		2.144E-04	2.151E-04	-1.722E-04	-1.722E-04
1	21.50100	0.03760	83.842	86.419	-7.735	-0.243
	(STRAIN)		3.897E-04	4.055E-04	-1.723E-04	-1.723E-04
1	76.49900	0.02567	13.496	13.632	-11.558	-10.450
	(STRAIN)		1.615E-04	1.629E-04	-9.673E-05	-9.673E-05
1	76.50100	0.02567	13.496	13.744	0.081	0.407
	(STRAIN)		2.025E-04	2.081E-04	-9.673E-05	-9.673E-05

TIME = 30

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.03901	550.000	443.164	292.415	430.999
	(STRAIN)		-5.205E-05	1.398E-04	-5.205E-05	1.243E-04
1	21.49900	0.03760	83.859	84.480	-330.608	-265.023
	(STRAIN)		2.144E-04	2.152E-04	-1.723E-04	-1.723E-04
1	21.50100	0.03760	83.851	86.428	-7.736	-0.243
	(STRAIN)		3.897E-04	4.055E-04	-1.723E-04	-1.723E-04
1	76.49900	0.02567	13.497	13.633	-11.558	-10.450
	(STRAIN)		1.615E-04	1.629E-04	-9.673E-05	-9.673E-05
1	76.50100	0.02567	13.497	13.745	0.081	0.407
	(STRAIN)		2.025E-04	2.081E-04	-9.674E-05	-9.674E-05

TIME = 100

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.03901	550.000	443.164	292.415	430.999
	(STRAIN)		-5.205E-05	1.398E-04	-5.205E-05	1.243E-04
1	21.49900	0.03760	83.859	84.480	-330.608	-265.023
	(STRAIN)		2.144E-04	2.152E-04	-1.723E-04	-1.723E-04
1	21.50100	0.03760	83.851	86.428	-7.736	-0.243
	(STRAIN)		3.897E-04	4.055E-04	-1.723E-04	-1.723E-04
1	76.49900	0.02567	13.497	13.633	-11.558	-10.450
	(STRAIN)		1.615E-04	1.629E-04	-9.673E-05	-9.673E-05
1	76.50100	0.02567	13.497	13.745	0.081	0.407
	(STRAIN)		2.025E-04	2.081E-04	-9.674E-05	-9.674E-05

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

```

TIME = 0.001
 2      0.00000      0.00609      550.000      1252.605      69.904      1243.100
      (STRAIN)
 2      21.49900      0.00610      0.855      0.855      -2102.039      -1939.209
      (STRAIN)
 2      21.50100      0.00610      0.855      0.855      0.222      0.242
      (STRAIN)
 2      76.49900      0.00588      0.628      0.628      -0.025      -0.022
      (STRAIN)
 2      76.50100      0.00588      0.628      0.628      0.301      0.302
      (STRAIN)

```

```

TIME = 0.003
 2      0.00000      0.00832      550.000      1063.036      69.904      1053.741
      (STRAIN)
 2      21.49900      0.00835      1.773      1.773      -1844.231      -1681.822
      (STRAIN)
 2      21.50100      0.00835      1.773      1.775      0.328      0.388
      (STRAIN)
 2      76.49900      0.00790      1.127      1.127      -0.226      -0.218
      (STRAIN)
 2      76.50100      0.00790      1.127      1.127      0.434      0.438
      (STRAIN)

```

```

TIME = 0.01
 2      0.00000      0.01167      550.000      874.434      69.904      865.587
      (STRAIN)
 2      21.49900      0.01178      4.162      4.162      -1581.874      -1420.609
      (STRAIN)
 2      21.50100      0.01178      4.162      4.167      0.450      0.649
      (STRAIN)
 2      76.49900      0.01075      2.184      2.185      -0.842      -0.818
      (STRAIN)
 2      76.50100      0.01075      2.184      2.185      0.605      0.615
      (STRAIN)

```

```

TIME = 0.03
 2      0.00000      0.01614      550.000      777.633      84.075      763.715
      (STRAIN)
 2      21.49900      0.01627      9.093      9.093      -1319.887      -1161.152
      (STRAIN)
 2      21.50100      0.01627      9.093      9.107      0.432      1.014
      (STRAIN)
 2      76.49900      0.01417      3.894      3.896      -2.090      -2.026
      (STRAIN)
 2      76.50100      0.01417      3.894      3.897      0.735      0.762
      (STRAIN)

```

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

TIME = 0.1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02215	550.000 -2.653E-05	567.430 2.264E-05	84.075 -2.653E-05	555.671 2.144E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02257	20.210 4.066E-05	20.210 4.066E-05	-1004.654 -3.580E-05	-852.343 -3.580E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02257	20.210 8.967E-05	20.246 8.990E-05	-0.238 -3.580E-05	1.576 -3.580E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.01837	6.628 7.406E-05	6.632 7.411E-05	-4.479 -4.040E-05	-4.309 -4.040E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01837	6.628 9.152E-05	6.636 9.171E-05	0.714 -4.040E-05	0.786 -4.040E-05
TIME = 0.3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02871	550.000 -5.435E-05	556.645 5.552E-05	166.229 -5.435E-05	534.847 4.939E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02883	37.943 8.236E-05	37.947 8.237E-05	-721.224 -7.431E-05	-580.743 -7.431E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02883	37.941 1.719E-04	38.001 1.722E-04	-2.180 -7.432E-05	2.485 -7.432E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.02182	9.546 1.114E-04	9.555 1.115E-04	-7.391 -6.315E-05	-7.036 -6.315E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02182	9.545 1.390E-04	9.563 1.394E-04	0.484 -6.315E-05	0.635 -6.315E-05
TIME = 1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03470	550.000 -7.743E-05	404.220 9.378E-05	166.229 -7.743E-05	388.072 8.216E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.03492	62.932 1.461E-04	62.939 1.461E-04	-466.626 -1.333E-04	-345.441 -1.333E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03492	62.927 2.873E-04	62.979 2.876E-04	-5.613 -1.333E-04	4.756 -1.333E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02457	12.379 1.481E-04	12.396 1.483E-04	-10.348 -8.612E-05	-9.726 -8.612E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02457	12.378 1.858E-04	12.409 1.864E-04	0.191 -8.612E-05	0.455 -8.612E-05
TIME = 3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03784	550.000 -8.154E-05	336.419 1.173E-04	166.229 -8.154E-05	323.472 1.021E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03807	78.817 1.905E-04	78.823 1.905E-04	-344.354 -1.720E-04	-236.992 -1.720E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03807	78.808 3.589E-04	78.834 3.591E-04	-7.710 -1.720E-04	7.256 -1.720E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02585	13.811 1.662E-04	13.831 1.664E-04	-11.786 -9.755E-05	-10.994 -9.755E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02585	13.810 2.088E-04	13.849 2.096E-04	0.078 -9.755E-05	0.415 -9.755E-05

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

TIME = 10						
2	0.00000	0.04003	550.000	448.674	275.410	423.374
	(STRAIN)		-6.672E-05	1.537E-04	-6.672E-05	1.216E-04
2	21.49900	0.03862	81.773	81.778	-323.800	-219.134
	(STRAIN)		1.992E-04	1.993E-04	-1.792E-04	-1.792E-04
2	21.50100	0.03862	81.763	81.783	-8.056	7.843
	(STRAIN)		3.720E-04	3.721E-04	-1.792E-04	-1.792E-04
2	76.49900	0.02607	14.060	14.081	-12.026	-11.202
	(STRAIN)		1.693E-04	1.696E-04	-9.949E-05	-9.949E-05
2	76.50100	0.02607	14.059	14.099	0.064	0.415
	(STRAIN)		2.127E-04	2.136E-04	-9.949E-05	-9.949E-05
TIME = 30						
2	0.00000	0.04003	550.000	448.639	275.410	423.345
	(STRAIN)		-6.671E-05	1.538E-04	-6.671E-05	1.216E-04
2	21.49900	0.03862	81.781	81.786	-323.743	-219.085
	(STRAIN)		1.993E-04	1.993E-04	-1.792E-04	-1.792E-04
2	21.50100	0.03862	81.771	81.792	-8.057	7.845
	(STRAIN)		3.720E-04	3.721E-04	-1.792E-04	-1.792E-04
2	76.49900	0.02607	14.060	14.082	-12.027	-11.203
	(STRAIN)		1.693E-04	1.696E-04	-9.950E-05	-9.950E-05
2	76.50100	0.02607	14.060	14.100	0.064	0.415
	(STRAIN)		2.127E-04	2.136E-04	-9.950E-05	-9.950E-05
TIME = 100						
2	0.00000	0.04003	550.000	448.639	275.410	423.345
	(STRAIN)		-6.671E-05	1.538E-04	-6.671E-05	1.216E-04
2	21.49900	0.03862	81.781	81.786	-323.743	-219.085
	(STRAIN)		1.993E-04	1.993E-04	-1.792E-04	-1.792E-04
2	21.50100	0.03862	81.771	81.792	-8.057	7.845
	(STRAIN)		3.720E-04	3.721E-04	-1.792E-04	-1.792E-04
2	76.49900	0.02607	14.060	14.082	-12.027	-11.203
	(STRAIN)		1.693E-04	1.696E-04	-9.950E-05	-9.950E-05
2	76.50100	0.02607	14.060	14.100	0.064	0.415
	(STRAIN)		2.127E-04	2.136E-04	-9.950E-05	-9.950E-05
TIME = 0.001						
3	0.00000	0.00605	0.000	1191.855	50.739	1181.318
	(STRAIN)		-6.801E-07	5.291E-07	-6.801E-07	5.180E-07
3	21.49900	0.00606	0.804	0.804	-2045.532	-1864.309
	(STRAIN)		8.686E-07	8.686E-07	-7.217E-07	-7.217E-07
3	21.50100	0.00606	0.803	0.803	0.201	0.224
	(STRAIN)		2.977E-06	2.977E-06	-7.218E-07	-7.218E-07
3	76.49900	0.00585	0.579	0.579	-0.033	-0.031
	(STRAIN)		4.589E-06	<u>4.589E-06</u>	-1.718E-06	-1.718E-06
3	76.50100	0.00585	0.579	0.579	0.271	0.273
	(STRAIN)		5.138E-06	5.138E-06	-1.717E-06	-1.718E-06

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

```

TIME = 0.003
3      0.00000      0.00798      0.000      1042.789      50.739      1032.409
      (STRAIN)
3      21.49900      0.00801      1.722      1.722      -1842.162      -1661.308
      (STRAIN)
3      21.50100      0.00801      1.723      1.723      0.301      0.369
      (STRAIN)
3      76.49900      0.00757      1.079      1.079      -0.257      -0.250
      (STRAIN)
3      76.50100      0.00757      1.079      1.079      0.392      0.395
      (STRAIN)

```

```

TIME = 0.01
3      0.00000      0.01157      0.000      859.398      50.739      849.500
      (STRAIN)
3      21.49900      0.01166      4.180      4.180      -1586.935      -1407.152
      (STRAIN)
3      21.50100      0.01166      4.180      4.180      0.453      0.680
      (STRAIN)
3      76.49900      0.01061      2.218      2.218      -0.884      -0.862
      (STRAIN)
3      76.50100      0.01061      2.218      2.218      0.597      0.607
      (STRAIN)

```

```

TIME = 0.03
3      0.00000      0.01612      0.000      666.520      50.739      657.461
      (STRAIN)
3      21.49900      0.01638      9.077      9.077      -1310.075      -1132.693
      (STRAIN)
3      21.50100      0.01638      9.077      9.077      0.453      1.119
      (STRAIN)
3      76.49900      0.01426      3.950      3.950      -2.101      -2.042
      (STRAIN)
3      76.50100      0.01426      3.950      3.950      0.756      0.783
      (STRAIN)

```

```

TIME = 0.1
3      0.00000      0.02242      0.000      632.567      104.747      614.423
      (STRAIN)
3      21.49900      0.02266      20.019      20.019      -992.611      -821.439
      (STRAIN)
3      21.50100      0.02266      20.018      20.018      -0.222      1.859
      (STRAIN)
3      76.49900      0.01844      6.659      6.659      -4.478      -4.321
      (STRAIN)
3      76.50100      0.01844      6.659      6.659      0.729      0.802
      (STRAIN)

```

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

TIME = 0.3						
3	0.00000	0.02832	0.000	454.069	104.747	439.435
	(STRAIN)		-5.079E-05	4.752E-05	-5.079E-05	4.340E-05
3	21.49900	0.02892	37.348	37.348	-709.050	-549.619
	(STRAIN)		7.972E-05	<u>7.972E-05</u>	-7.432E-05	-7.432E-05
3	21.50100	0.02892	37.343	37.343	-2.159	3.206
	(STRAIN)		1.681E-04	<u>1.681E-04</u>	-7.432E-05	-7.432E-05
3	76.49900	0.02188	9.594	9.594	-7.415	-7.087
	(STRAIN)		1.120E-04	<u>1.120E-04</u>	-6.330E-05	-6.330E-05
3	76.50100	0.02188	9.594	9.594	0.492	0.644
	(STRAIN)		1.397E-04	<u>1.397E-04</u>	-6.330E-05	-6.330E-05
TIME = 1						
3	0.00000	0.03524	0.000	444.465	188.192	418.993
	(STRAIN)		-8.078E-05	1.036E-04	-8.078E-05	8.527E-05
3	21.49900	0.03504	61.260	61.260	-454.453	-314.961
	(STRAIN)		1.391E-04	<u>1.391E-04</u>	-1.330E-04	-1.330E-04
3	21.50100	0.03504	61.249	61.249	-5.581	6.418
	(STRAIN)		2.771E-04	<u>2.771E-04</u>	-1.330E-04	-1.330E-04
3	76.49900	0.02465	12.460	12.460	-10.404	-9.826
	(STRAIN)		1.492E-04	1.492E-04	-8.646E-05	-8.646E-05
3	76.50100	0.02465	12.459	12.459	0.195	0.462
	(STRAIN)		1.871E-04	<u>1.871E-04</u>	-8.646E-05	-8.646E-05
TIME = 3						
3	0.00000	0.03860	0.000	372.945	188.192	351.761
	(STRAIN)		-8.485E-05	1.310E-04	-8.485E-05	1.062E-04
3	21.49900	0.03819	76.053	76.053	-332.856	-208.071
	(STRAIN)		1.789E-04	<u>1.789E-04</u>	-1.714E-04	-1.714E-04
3	21.50100	0.03819	76.036	76.036	-7.673	9.757
	(STRAIN)		3.423E-04	<u>3.423E-04</u>	-1.714E-04	-1.714E-04
3	76.49900	0.02593	13.911	13.911	-11.861	-11.122
	(STRAIN)		1.676E-04	1.676E-04	-9.799E-05	-9.799E-05
3	76.50100	0.02593	13.911	13.911	0.080	0.421
	(STRAIN)		2.105E-04	2.105E-04	-9.799E-05	-9.799E-05
TIME = 10						
3	0.00000	0.03920	0.000	361.232	188.192	340.827
	(STRAIN)		-8.419E-05	1.360E-04	-8.419E-05	1.100E-04
3	21.49900	0.03874	78.764	78.764	-312.507	-190.632
	(STRAIN)		1.866E-04	<u>1.866E-04</u>	-1.785E-04	-1.785E-04
3	21.50100	0.03874	78.746	78.746	-8.019	10.524
	(STRAIN)		3.540E-04	3.540E-04	-1.785E-04	-1.785E-04
3	76.49900	0.02615	14.164	14.164	-12.104	-11.335
	(STRAIN)		1.707E-04	1.707E-04	-9.996E-05	-9.996E-05
3	76.50100	0.02615	14.163	14.163	0.066	0.421
	(STRAIN)		2.145E-04	<u>2.145E-04</u>	-9.996E-05	-9.996E-05

**Lanjutan Lampiran 14 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Satu Tahap**

TIME = 30						
3	0.00000	0.03920	0.000	361.200	188.192	340.796
	(STRAIN)		-8.419E-05	1.360E-04	-8.419E-05	1.100E-04
3	21.49900	0.03874	78.772	78.772	-312.450	-190.583
	(STRAIN)		1.867E-04	1.867E-04	-1.785E-04	-1.785E-04
3	21.50100	0.03874	78.754	78.754	-8.020	10.527
	(STRAIN)		3.540E-04	<u>3.540E-04</u>	-1.785E-04	-1.785E-04
3	76.49900	0.02615	14.165	14.165	-12.105	-11.336
	(STRAIN)		1.708E-04	1.708E-04	-9.996E-05	-9.996E-05
3	76.50100	0.02615	14.164	14.164	0.066	0.421
	(STRAIN)		2.145E-04	2.145E-04	-9.996E-05	-9.996E-05
TIME = 100						
3	0.00000	0.03920	0.000	361.200	188.192	340.796
	(STRAIN)		-8.419E-05	1.360E-04	-8.419E-05	1.100E-04
3	21.49900	0.03874	78.772	78.772	-312.450	-190.583
	(STRAIN)		1.867E-04	1.867E-04	-1.785E-04	-1.785E-04
3	21.50100	0.03874	78.754	78.754	-8.020	10.527
	(STRAIN)		3.540E-04	3.540E-04	-1.785E-04	-1.785E-04
3	76.49900	0.02615	14.165	14.165	-12.105	-11.336
	(STRAIN)		1.708E-04	1.708E-04	-9.996E-05	-9.996E-05
3	76.50100	0.02615	14.164	14.164	0.066	0.421
	(STRAIN)		2.145E-04	<u>2.145E-04</u>	-9.996E-05	-9.996E-05

Lampiran 15 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan *Software KENPAVE* Metode Dua Tahap

INPUT FILE NAME -C:\Users\vania\Downloads\setupkenpave\Vania_Bertahap2_20_04_2026_trial
0.1.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Vania_Konvensional_04_20_2026

MATL = 3 FOR VISCOELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 7
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 5
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in kN/m^3 , and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 4 7.5 10 20 15 20
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.4 0.4 0.35 0.35 0.35 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 21.499 21.501 76.499
76.501
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.100E+06 2 2.127E+06
3 1.500E+06 4 2.200E+05 5 1.700E+05 6 1.310E+05 7 6.500E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 11
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 550
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 3
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 33

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 0.000 2 0.000 10.000
3 0.000 16.500

DURATION OF MOVING LOAD (DUR) = 0
NUMBER OF VISCOELASTIC LAYER (NVL) = 3
LAYER NUMBERS WHICH ARE VISCOELASTIC (LNV) = 1 2 3
CREEP TIMES (TYME) ARE: 0.001 0.003 0.01 0.03 0.1 0.3 1 3 10 30 100

FOR LAYER 1 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
7.570E-10 2.269E-09 7.541E-09 2.244E-08 7.266E-08 2.010E-07 5.139E-07
8.344E-07 9.089E-07 9.091E-07 9.091E-07

FOR LAYER 2 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
3.914E-10 1.173E-09 3.900E-09 1.160E-08 3.757E-08 1.039E-07 2.657E-07
4.315E-07 4.700E-07 4.701E-07 4.701E-07

FOR LAYER 3 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
5.551E-10 1.664E-09 5.530E-09 1.645E-08 5.328E-08 1.474E-07 3.768E-07
6.119E-07 6.665E-07 6.667E-07 6.667E-07

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

TIME = 0.001						
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.00602	550.000	1165.038	65.833	1159.880
	(STRAIN)		-6.541E-07	5.108E-07	-6.541E-07	5.053E-07
1	21.49900	0.00603	0.851	0.851	-2083.893	-1955.808
	(STRAIN)		8.975E-07	8.975E-07	-7.227E-07	-7.227E-07
1	21.50100	0.00603	0.851	0.855	0.222	0.235
	(STRAIN)		3.136E-06	3.160E-06	-7.230E-07	-7.230E-07
1	76.49900	0.00582	0.631	0.631	-0.024	-0.020
	(STRAIN)		4.929E-06	4.932E-06	-1.814E-06	-1.814E-06
1	76.50100	0.00582	0.631	0.631	0.303	0.304
	(STRAIN)		5.490E-06	5.503E-06	-1.814E-06	-1.814E-06
TIME = 0.003						
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.00830	550.000	967.655	65.833	962.798
	(STRAIN)		-1.603E-06	1.262E-06	-1.603E-06	1.247E-06
1	21.49900	0.00836	1.747	1.747	-1810.189	-1682.733
	(STRAIN)		2.328E-06	2.328E-06	-1.893E-06	-1.893E-06
1	21.50100	0.00836	1.747	1.762	0.326	0.360
	(STRAIN)		6.828E-06	6.916E-06	-1.893E-06	-1.893E-06
1	76.49900	0.00792	1.121	1.122	-0.214	-0.203
	(STRAIN)		9.664E-06	9.675E-06	-4.088E-06	-4.088E-06
1	76.50100	0.00792	1.121	1.123	0.438	0.442
	(STRAIN)		1.113E-05	1.118E-05	-4.088E-06	-4.088E-06
TIME = 0.01						
POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.01161	550.000	866.549	72.790	856.203
	(STRAIN)		-4.648E-06	3.733E-06	-4.648E-06	3.623E-06
1	21.49900	0.01169	4.062	4.062	-1549.645	-1423.833
	(STRAIN)		6.600E-06	6.600E-06	-5.429E-06	-5.429E-06
1	21.50100	0.01169	4.062	4.116	0.435	0.539
	(STRAIN)		1.683E-05	1.716E-05	-5.430E-06	-5.430E-06
1	76.49900	0.01069	2.142	2.146	-0.817	-0.782
	(STRAIN)		2.061E-05	2.065E-05	-9.879E-06	-9.879E-06
1	76.50100	0.01069	2.142	2.149	0.600	0.610
	(STRAIN)		2.453E-05	2.469E-05	-9.879E-06	-9.879E-06

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

TIME = 0.03

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.01586	550.000	691.088	72.790	682.054
	(STRAIN)		-1.069E-05	8.731E-06	-1.069E-05	8.447E-06
1	21.49900	0.01608	8.858	8.859	-1292.918	-1170.557
	(STRAIN)		1.636E-05	1.636E-05	-1.363E-05	-1.363E-05
1	21.50100	0.01608	8.857	9.024	0.404	0.696
	(STRAIN)		3.824E-05	3.927E-05	-1.363E-05	-1.363E-05
1	76.49900	0.01405	3.808	3.819	-2.035	-1.943
	(STRAIN)		3.967E-05	3.978E-05	-2.055E-05	-2.055E-05
1	76.50100	0.01405	3.808	3.828	0.726	0.754
	(STRAIN)		4.820E-05	4.865E-05	-2.055E-05	-2.055E-05

TIME = 0.1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.02189	550.000	553.031	83.925	536.173
	(STRAIN)		-2.556E-05	2.216E-05	-2.556E-05	2.045E-05
1	21.49900	0.02220	19.678	19.689	-984.793	-870.618
	(STRAIN)		4.059E-05	4.059E-05	-3.434E-05	-3.434E-05
1	21.50100	0.02220	19.676	20.183	-0.280	0.601
	(STRAIN)		8.812E-05	9.123E-05	-3.434E-05	-3.434E-05
1	76.49900	0.01817	6.446	6.475	-4.347	-4.107
	(STRAIN)		7.172E-05	7.202E-05	-3.951E-05	-3.951E-05
1	76.50100	0.01817	6.446	6.500	0.706	0.777
	(STRAIN)		8.853E-05	8.973E-05	-3.951E-05	-3.951E-05

TIME = 0.3

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.02790	550.000	499.076	153.633	486.637
	(STRAIN)		-4.838E-05	4.884E-05	-4.838E-05	4.534E-05
1	21.49900	0.02819	37.148	37.214	-710.828	-610.314
	(STRAIN)		8.337E-05	8.339E-05	-7.099E-05	-7.099E-05
1	21.50100	0.02819	37.145	38.293	-2.207	0.026
	(STRAIN)		1.705E-04	1.775E-04	-7.099E-05	-7.099E-05
1	76.49900	0.02153	9.220	9.280	-7.138	-6.648
	(STRAIN)		1.070E-04	1.077E-04	-6.152E-05	-6.152E-05
1	76.50100	0.02153	9.219	9.331	0.481	0.623
	(STRAIN)		1.334E-04	1.359E-04	-6.152E-05	-6.152E-05

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

TIME = 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.03381	550.000 -7.146E-05	385.447 8.875E-05	162.758 -7.146E-05	369.088 7.698E-05
1	21.49900 (STRAIN)	0.03395	62.656 1.521E-04	62.944 1.523E-04	-466.643 -1.271E-04	-386.132 -1.271E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03395	62.654 2.914E-04	64.693 3.039E-04	-5.558 -1.271E-04	-0.652 -1.271E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02417	11.869 1.412E-04	11.973 1.423E-04	-9.938 -8.354E-05	-9.098 -8.354E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02417	11.869 1.769E-04	12.059 1.811E-04	0.194 -8.354E-05	0.440 -8.354E-05

TIME = 3

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.03820	550.000 -5.360E-05	452.146 1.330E-04	292.414 -5.360E-05	439.493 1.182E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03693	79.704 2.029E-04	80.261 2.034E-04	-348.973 -1.643E-04	-281.416 -1.643E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03693	79.697 3.712E-04	82.204 3.866E-04	-7.580 -1.643E-04	-0.578 -1.643E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02539	13.193 1.578E-04	13.323 1.592E-04	-11.285 -9.441E-05	-10.228 -9.441E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02539	13.193 1.980E-04	13.430 2.033E-04	0.084 -9.441E-05	0.395 -9.441E-05

TIME = 10

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.03885	550.000 -5.060E-05	441.130 1.386E-04	292.414 -5.060E-05	429.093 1.233E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03746	82.967 2.132E-04	83.588 2.138E-04	-329.077 -1.713E-04	-263.936 -1.713E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03745	82.960 3.864E-04	85.541 4.022E-04	-7.912 -1.713E-04	-0.493 -1.713E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02559	13.423 1.607E-04	13.557 1.621E-04	-11.509 -9.626E-05	-10.412 -9.626E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02559	13.422 2.016E-04	13.668 2.071E-04	0.071 -9.626E-05	0.394 -9.626E-05

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

TIME = 30

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.03885	550.000	441.107	292.415	429.056
	(STRAIN)		-5.059E-05	1.387E-04	-5.059E-05	1.233E-04
1	21.49900	0.03746	82.976	83.597	-329.021	-263.888
	(STRAIN)		2.133E-04	2.138E-04	-1.713E-04	-1.713E-04
1	21.50100	0.03746	82.969	85.550	-7.913	-0.493
	(STRAIN)		3.864E-04	4.022E-04	-1.713E-04	-1.713E-04
1	76.49900	0.02559	13.423	13.558	-11.510	-10.413
	(STRAIN)		1.607E-04	1.621E-04	-9.626E-05	-9.626E-05
1	76.50100	0.02559	13.423	13.669	0.071	0.394
	(STRAIN)		2.016E-04	2.071E-04	-9.626E-05	-9.626E-05

TIME = 100

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.03885	550.000	441.107	292.415	429.056
	(STRAIN)		-5.059E-05	1.387E-04	-5.059E-05	1.233E-04
1	21.49900	0.03746	82.976	83.597	-329.021	-263.888
	(STRAIN)		2.133E-04	2.138E-04	-1.713E-04	-1.713E-04
1	21.50100	0.03746	82.969	85.550	-7.913	-0.493
	(STRAIN)		3.864E-04	4.022E-04	-1.713E-04	-1.713E-04
1	76.49900	0.02559	13.423	13.558	-11.510	-10.413
	(STRAIN)		1.607E-04	1.621E-04	-9.626E-05	-9.626E-05
1	76.50100	0.02559	13.423	13.669	0.071	0.394
	(STRAIN)		2.016E-04	2.071E-04	-9.626E-05	-9.626E-05

TIME = 0.001

2	0.00000	0.00606	550.000	1229.593	69.904	1220.304
	(STRAIN)		-6.889E-07	5.401E-07	-6.889E-07	5.302E-07
2	21.49900	0.00607	0.847	0.847	-2091.910	-1931.802
	(STRAIN)		8.939E-07	8.939E-07	-7.325E-07	-7.325E-07
2	21.50100	0.00607	0.847	0.848	0.219	0.239
	(STRAIN)		3.121E-06	3.124E-06	-7.326E-07	-7.326E-07
2	76.49900	0.00586	0.623	0.623	-0.024	-0.022
	(STRAIN)		4.881E-06	4.881E-06	-1.793E-06	-1.793E-06
2	76.50100	0.00586	0.623	0.623	0.299	0.300
	(STRAIN)		5.439E-06	5.442E-06	-1.793E-06	-1.793E-06

TIME = 0.003

2	0.00000	0.00829	550.000	1043.661	69.904	1034.541
	(STRAIN)		-1.728E-06	1.366E-06	-1.728E-06	1.337E-06
2	21.49900	0.00832	1.756	1.756	-1834.500	-1674.806
	(STRAIN)		2.339E-06	2.339E-06	-1.939E-06	-1.939E-06
2	21.50100	0.00832	1.756	1.757	0.322	0.381
	(STRAIN)		6.861E-06	6.870E-06	-1.939E-06	-1.939E-06
2	76.49900	0.00787	1.118	1.119	-0.223	-0.215
	(STRAIN)		9.707E-06	9.709E-06	-4.114E-06	-4.114E-06
2	76.50100	0.00787	1.118	1.119	0.432	0.435
	(STRAIN)		1.120E-05	1.121E-05	-4.114E-06	-4.114E-06

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

```

TIME = 0.01
2      0.00000      0.01163      550.000      859.154      69.904      850.473
      (STRAIN)      -4.630E-06      3.703E-06      -4.630E-06      3.611E-06
2      21.49900      0.01173      4.119      4.119      -1573.439      -1414.867
      (STRAIN)      6.633E-06      6.633E-06      -5.581E-06      -5.581E-06
2      21.50100      0.01173      4.119      4.124      0.436      0.632
      (STRAIN)      1.701E-05      1.704E-05      -5.581E-06      -5.581E-06
2      76.49900      0.01071      2.167      2.168      -0.833      -0.810
      (STRAIN)      2.093E-05      2.093E-05      -9.989E-06      -9.989E-06
2      76.50100      0.01071      2.167      2.168      0.602      0.612
      (STRAIN)      2.493E-05      2.495E-05      -9.989E-06      -9.989E-06

```

```

TIME = 0.03
2      0.00000      0.01607      550.000      764.959      84.075      751.294
      (STRAIN)      -1.172E-05      9.666E-06      -1.172E-05      9.237E-06
2      21.49900      0.01620      8.997      8.997      -1313.019      -1156.929
      (STRAIN)      1.640E-05      1.640E-05      -1.405E-05      -1.405E-05
2      21.50100      0.01620      8.996      9.010      0.404      0.976
      (STRAIN)      3.867E-05      3.876E-05      -1.405E-05      -1.405E-05
2      76.49900      0.01412      3.864      3.865      -2.072      -2.008
      (STRAIN)      4.039E-05      4.041E-05      -2.078E-05      -2.078E-05
2      76.50100      0.01412      3.864      3.867      0.730      0.757
      (STRAIN)      4.912E-05      4.919E-05      -2.078E-05      -2.078E-05

```

```

TIME = 0.1
2      0.00000      0.02207      550.000      559.216      84.075      547.658
      (STRAIN)      -2.606E-05      2.227E-05      -2.606E-05      2.110E-05
2      21.49900      0.02247      19.997      19.998      -999.680      -849.882
      (STRAIN)      4.049E-05      4.049E-05      -3.558E-05      -3.558E-05
2      21.50100      0.02247      19.997      20.034      -0.295      1.488
      (STRAIN)      8.894E-05      8.917E-05      -3.558E-05      -3.558E-05
2      76.49900      0.01831      6.581      6.585      -4.446      -4.278
      (STRAIN)      7.353E-05      7.358E-05      -4.010E-05      -4.010E-05
2      76.50100      0.01831      6.581      6.589      0.710      0.781
      (STRAIN)      9.086E-05      9.105E-05      -4.010E-05      -4.010E-05

```

```

TIME = 0.3
2      0.00000      0.02812      550.000      489.198      143.825      476.683
      (STRAIN)      -4.875E-05      4.844E-05      -4.875E-05      4.492E-05
2      21.49900      0.02871      37.558      37.562      -717.995      -579.772
      (STRAIN)      8.206E-05      8.206E-05      -7.387E-05      -7.387E-05
2      21.50100      0.02871      37.556      37.618      -2.279      2.308
      (STRAIN)      1.706E-04      1.709E-04      -7.388E-05      -7.388E-05
2      76.49900      0.02175      9.483      9.493      -7.344      -6.994
      (STRAIN)      1.107E-04      1.108E-04      -6.274E-05      -6.274E-05
2      76.50100      0.02175      9.483      9.501      0.480      0.629
      (STRAIN)      1.381E-04      1.385E-04      -6.274E-05      -6.274E-05

```

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

TIME = 1						
2	0.00000	0.03458	550.000	401.003	166.229	385.012
	(STRAIN)		-7.614E-05	9.276E-05	-7.614E-05	8.125E-05
2	21.49900	0.03478	62.344	62.352	-464.985	-345.647
	(STRAIN)		1.457E-04	<u>1.457E-04</u>	-1.325E-04	-1.325E-04
2	21.50100	0.03478	62.340	62.396	-5.765	4.441
	(STRAIN)		2.854E-04	2.857E-04	-1.325E-04	-1.325E-04
2	76.49900	0.02450	12.305	12.321	-10.294	-9.680
	(STRAIN)		1.473E-04	1.474E-04	-8.564E-05	-8.564E-05
2	76.50100	0.02450	12.304	12.335	0.185	0.445
	(STRAIN)		1.847E-04	1.854E-04	-8.564E-05	-8.564E-05
TIME = 3						
2	0.00000	0.03771	550.000	334.370	166.229	321.519
	(STRAIN)		-8.021E-05	1.162E-04	-8.021E-05	1.012E-04
2	21.49900	0.03792	78.137	78.144	-343.422	-237.622
	(STRAIN)		1.900E-04	<u>1.900E-04</u>	-1.711E-04	-1.711E-04
2	21.50100	0.03792	78.128	78.158	-7.892	6.852
	(STRAIN)		3.567E-04	3.569E-04	-1.711E-04	-1.711E-04
2	76.49900	0.02577	13.732	13.753	-11.733	-10.950
	(STRAIN)		1.654E-04	1.656E-04	-9.705E-05	-9.705E-05
2	76.50100	0.02577	13.731	13.770	0.069	0.402
	(STRAIN)		2.077E-04	2.086E-04	-9.705E-05	-9.705E-05
TIME = 10						
2	0.00000	0.03936	550.000	417.700	257.414	400.309
	(STRAIN)		-6.343E-05	1.405E-04	-6.343E-05	1.184E-04
2	21.49900	0.03847	81.079	81.085	-322.979	-219.822
	(STRAIN)		1.988E-04	<u>1.988E-04</u>	-1.783E-04	-1.783E-04
2	21.50100	0.03847	81.069	81.094	-8.244	7.423
	(STRAIN)		3.698E-04	3.699E-04	-1.783E-04	-1.783E-04
2	76.49900	0.02599	13.980	14.002	-11.973	-11.158
	(STRAIN)		1.685E-04	1.687E-04	-9.899E-05	-9.899E-05
2	76.50100	0.02599	13.980	14.019	0.055	0.401
	(STRAIN)		2.116E-04	2.125E-04	-9.899E-05	-9.899E-05
TIME = 30						
2	0.00000	0.03936	550.000	417.669	257.414	400.278
	(STRAIN)		-6.342E-05	1.405E-04	-6.342E-05	1.184E-04
2	21.49900	0.03847	81.088	81.093	-322.922	-219.772
	(STRAIN)		1.988E-04	<u>1.988E-04</u>	-1.783E-04	-1.783E-04
2	21.50100	0.03847	81.078	81.102	-8.245	7.425
	(STRAIN)		3.698E-04	3.699E-04	-1.783E-04	-1.783E-04
2	76.49900	0.02599	13.981	14.002	-11.974	-11.159
	(STRAIN)		1.685E-04	1.687E-04	-9.900E-05	-9.900E-05
2	76.50100	0.02599	13.980	14.020	0.055	0.401
	(STRAIN)		2.117E-04	2.125E-04	-9.900E-05	-9.900E-05

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

TIME = 100						
2	0.00000	0.03936	550.000	417.669	257.414	400.278
	(STRAIN)		-6.342E-05	1.405E-04	-6.342E-05	1.184E-04
2	21.49900	0.03847	81.088	81.093	-322.922	-219.772
	(STRAIN)		1.988E-04	<u>1.988E-04</u>	-1.783E-04	-1.783E-04
2	21.50100	0.03847	81.078	81.102	-8.245	7.425
	(STRAIN)		3.698E-04	3.699E-04	-1.783E-04	-1.783E-04
2	76.49900	0.02599	13.981	14.002	-11.974	-11.159
	(STRAIN)		1.685E-04	1.687E-04	-9.900E-05	-9.900E-05
2	76.50100	0.02599	13.980	14.020	0.055	0.401
	(STRAIN)		2.117E-04	2.125E-04	-9.900E-05	-9.900E-05
TIME = 0.001						
3	0.00000	0.00603	0.000	1169.151	50.739	1158.803
	(STRAIN)		-6.665E-07	5.188E-07	-6.665E-07	5.078E-07
3	21.49900	0.00603	0.797	0.797	-2035.393	-1857.456
	(STRAIN)		8.648E-07	<u>8.648E-07</u>	-7.176E-07	-7.176E-07
3	21.50100	0.00603	0.796	0.796	0.198	0.221
	(STRAIN)		2.954E-06	<u>2.954E-06</u>	-7.177E-07	-7.177E-07
3	76.49900	0.00583	0.575	0.575	-0.032	-0.030
	(STRAIN)		4.552E-06	4.552E-06	-1.701E-06	-1.701E-06
3	76.50100	0.00583	0.575	0.575	0.270	0.271
	(STRAIN)		5.094E-06	<u>5.094E-06</u>	-1.701E-06	-1.701E-06
TIME = 0.003						
3	0.00000	0.00795	0.000	1023.103	50.739	1012.955
	(STRAIN)		-1.733E-06	1.356E-06	-1.733E-06	1.324E-06
3	21.49900	0.00798	1.705	1.705	-1832.591	-1655.021
	(STRAIN)		2.324E-06	<u>2.324E-06</u>	-1.949E-06	-1.949E-06
3	21.50100	0.00798	1.705	1.705	0.295	0.362
	(STRAIN)		6.705E-06	<u>6.705E-06</u>	-1.949E-06	-1.949E-06
3	76.49900	0.00754	1.069	1.069	-0.253	-0.246
	(STRAIN)		9.498E-06	<u>9.498E-06</u>	-4.132E-06	-4.132E-06
3	76.50100	0.00754	1.069	1.069	0.389	0.392
	(STRAIN)		1.104E-05	<u>1.104E-05</u>	-4.132E-06	-4.132E-06
TIME = 0.01						
3	0.00000	0.01152	0.000	844.047	50.739	834.341
	(STRAIN)		-4.680E-06	3.695E-06	-4.680E-06	3.593E-06
3	21.49900	0.01161	4.137	4.137	-1579.084	-1402.569
	(STRAIN)		6.619E-06	<u>6.619E-06</u>	-5.639E-06	-5.639E-06
3	21.50100	0.01161	4.137	4.137	0.439	0.661
	(STRAIN)		1.705E-05	<u>1.705E-05</u>	-5.640E-06	-5.640E-06
3	76.49900	0.01057	2.200	2.200	-0.875	-0.854
	(STRAIN)		2.141E-05	2.141E-05	-1.028E-05	-1.028E-05
3	76.50100	0.01057	2.200	2.200	0.593	0.603
	(STRAIN)		2.556E-05	<u>2.556E-05</u>	-1.028E-05	-1.028E-05

Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Dua Tahap

```

TIME = 0.03
3      0.00000      0.01605      0.000      655.413      50.739      646.522
      (STRAIN)      -1.055E-05      8.448E-06      -1.055E-05      8.168E-06
3      21.49900      0.01631      8.984      8.984      -1303.823      -1129.655
      (STRAIN)      1.616E-05      1.616E-05      -1.408E-05      -1.408E-05
3      21.50100      0.01631      8.984      8.984      0.424      1.078
      (STRAIN)      3.844E-05      3.844E-05      -1.408E-05      -1.408E-05
3      76.49900      0.01420      3.920      3.920      -2.083      -2.025
      (STRAIN)      4.090E-05      4.090E-05      -2.096E-05      -2.096E-05
3      76.50100      0.01420      3.920      3.920      0.751      0.778
      (STRAIN)      4.971E-05      4.971E-05      -2.096E-05      -2.096E-05

```

```

TIME = 0.1
3      0.00000      0.02234      0.000      623.549      104.747      605.695
      (STRAIN)      -2.812E-05      2.466E-05      -2.812E-05      2.284E-05
3      21.49900      0.02256      19.816      19.816      -988.151      -820.055
      (STRAIN)      3.959E-05      3.959E-05      -3.560E-05      -3.560E-05
3      21.50100      0.02256      19.815      19.815      -0.279      1.764
      (STRAIN)      8.770E-05      8.770E-05      -3.560E-05      -3.560E-05
3      76.49900      0.01838      6.612      6.612      -4.444      -4.290
      (STRAIN)      7.381E-05      7.381E-05      -4.013E-05      -4.013E-05
3      76.50100      0.01838      6.612      6.612      0.725      0.797
      (STRAIN)      9.118E-05      9.118E-05      -4.013E-05      -4.013E-05

```

```

TIME = 0.3
3      0.00000      0.02822      0.000      448.627      104.747      434.194
      (STRAIN)      -4.993E-05      4.685E-05      -4.993E-05      4.279E-05
3      21.49900      0.02880      36.989      36.989      -706.329      -549.704
      (STRAIN)      7.952E-05      7.952E-05      -7.389E-05      -7.389E-05
3      21.50100      0.02880      36.983      36.983      -2.259      3.012
      (STRAIN)      1.669E-04      1.669E-04      -7.390E-05      -7.390E-05
3      76.49900      0.02181      9.531      9.531      -7.368      -7.044
      (STRAIN)      1.113E-04      1.113E-04      -6.289E-05      -6.289E-05
3      76.50100      0.02181      9.531      9.531      0.488      0.638
      (STRAIN)      1.388E-04      1.388E-04      -6.289E-05      -6.289E-05

```

```

TIME = 1
3      0.00000      0.03511      0.000      441.046      188.192      415.801
      (STRAIN)      -7.942E-05      1.025E-04      -7.942E-05      8.433E-05
3      21.49900      0.03490      60.737      60.737      -453.273      -316.125
      (STRAIN)      1.389E-04      1.389E-04      -1.323E-04      -1.323E-04
3      21.50100      0.03490      60.726      60.726      -5.735      6.063
      (STRAIN)      2.755E-04      2.755E-04      -1.323E-04      -1.323E-04
3      76.49900      0.02457      12.385      12.385      -10.350      -9.779
      (STRAIN)      1.483E-04      1.483E-04      -8.597E-05      -8.597E-05
3      76.50100      0.02457      12.384      12.384      0.189      0.452
      (STRAIN)      1.861E-04      1.861E-04      -8.597E-05      -8.597E-05

```

**Lanjutan Lampiran 15 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Dua Tahap**

TIME = 3						
3	0.00000	0.03846	0.000	370.790	188.192	349.732
	(STRAIN)		-8.345E-05	1.298E-04	-8.345E-05	1.052E-04
3	21.49900	0.03804	75.472	75.472	-332.329	-209.559
	(STRAIN)		1.788E-04	<u>1.788E-04</u>	-1.705E-04	-1.705E-04
3	21.50100	0.03804	75.456	75.456	-7.857	9.291
	(STRAIN)		3.407E-04	<u>3.407E-04</u>	-1.705E-04	-1.705E-04
3	76.49900	0.02586	13.831	13.831	-11.806	-11.076
	(STRAIN)		1.667E-04	<u>1.667E-04</u>	-9.749E-05	-9.749E-05
3	76.50100	0.02586	13.831	13.831	0.071	0.409
	(STRAIN)		2.095E-04	<u>2.095E-04</u>	-9.749E-05	-9.749E-05
TIME = 10						
3	0.00000	0.03906	0.000	359.273	188.192	338.980
	(STRAIN)		-8.281E-05	1.349E-04	-8.281E-05	1.091E-04
3	21.49900	0.03859	78.177	78.177	-312.078	-192.154
	(STRAIN)		1.865E-04	<u>1.865E-04</u>	-1.776E-04	-1.776E-04
3	21.50100	0.03859	78.160	78.160	-8.208	10.038
	(STRAIN)		3.524E-04	<u>3.524E-04</u>	-1.776E-04	-1.776E-04
3	76.49900	0.02608	14.083	14.083	-12.050	-11.290
	(STRAIN)		1.699E-04	1.699E-04	-9.945E-05	-9.945E-05
3	76.50100	0.02608	14.083	14.083	0.057	0.408
	(STRAIN)		2.134E-04	<u>2.134E-04</u>	-9.945E-05	-9.945E-05
TIME = 30						
3	0.00000	0.03906	0.000	359.244	188.192	338.947
	(STRAIN)		-8.280E-05	1.349E-04	-8.280E-05	1.091E-04
3	21.49900	0.03859	78.184	78.184	-312.021	-192.106
	(STRAIN)		1.866E-04	<u>1.866E-04</u>	-1.776E-04	-1.776E-04
3	21.50100	0.03859	78.167	78.167	-8.209	10.040
	(STRAIN)		3.524E-04	<u>3.524E-04</u>	-1.776E-04	-1.776E-04
3	76.49900	0.02608	14.084	14.084	-12.051	-11.290
	(STRAIN)		1.699E-04	<u>1.699E-04</u>	-9.946E-05	-9.946E-05
3	76.50100	0.02608	14.084	14.084	0.056	0.408
	(STRAIN)		2.135E-04	<u>2.135E-04</u>	-9.946E-05	-9.946E-05
TIME = 100						
3	0.00000	0.03906	0.000	359.244	188.192	338.947
	(STRAIN)		-8.280E-05	1.349E-04	-8.280E-05	1.091E-04
3	21.49900	0.03859	78.184	78.184	-312.021	-192.106
	(STRAIN)		1.866E-04	<u>1.866E-04</u>	-1.776E-04	-1.776E-04
3	21.50100	0.03859	78.167	78.167	-8.209	10.040
	(STRAIN)		3.524E-04	<u>3.524E-04</u>	-1.776E-04	-1.776E-04
3	76.49900	0.02608	14.084	14.084	-12.051	-11.290
	(STRAIN)		1.699E-04	1.699E-04	-9.946E-05	-9.946E-05
3	76.50100	0.02608	14.084	14.084	0.056	0.408
	(STRAIN)		2.135E-04	<u>2.135E-04</u>	-9.946E-05	-9.946E-05

Lampiran 16 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan *Software KENPAVE* Metode Tiga Tahap

```

INPUT FILE NAME -C:\Users\vania\Downloads\setupkenpave\Vania_Bertahap3_20_04_2026_trial 0.1.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Vania_Konvensional_04_20_2026

MATL = 3 FOR VISCOELASTIC LAYERED SYSTEM
NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.001
NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 7
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 5
LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
unit weight in  $\text{kN/m}^3$ , and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 4 7.5 10 20 15 20
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.4 0.4 0.35 0.35 0.35 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 21.499 21.501 76.499
76.501
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.100E+06 2 2.176E+06
3 1.500E+06 4 2.200E+05 5 1.700E+05 6 1.310E+05 7 6.500E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 11
CONTACT PRESSURE (CP)----- = 550
NO. OF POINTS AT WHICH RESULTS ARE DESIRED (NPT)-- = 3
WHEEL SPACING ALONG X-AXIS (XW)----- = 0
WHEEL SPACING ALONG Y-AXIS (YW)----- = 33

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 0.000 2 0.000 10.000
3 0.000 16.500

```

Lanjutan Lampiran 16 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

DURATION OF MOVING LOAD (DUR) = 0
 NUMBER OF VISCOELASTIC LAYER (NVL) = 3
 LAYER NUMBERS WHICH ARE VISCOELASTIC (LNV) = 1 2 3
 CREEP TIMES (TYME) ARE: 0.001 0.003 0.01 0.03 0.1 0.3 1 3 10 30 100

FOR LAYER 1 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
 REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
 7.570E-10 2.269E-09 7.541E-09 2.244E-08 7.266E-08 2.010E-07 5.139E-07
 8.344E-07 9.089E-07 9.091E-07 9.091E-07

FOR LAYER 2 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
 REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
 3.827E-10 1.147E-09 3.813E-09 1.134E-08 3.673E-08 1.016E-07 2.598E-07
 4.218E-07 4.595E-07 4.596E-07 4.596E-07

FOR LAYER 3 TIME TEMPERATURE SHIFT FACTOR (BETA) = 0.113
 REFERENCE TEMPERATURE (TEMREF) = 25

CREEP COMPLIANCES (CREEP) AT REFERENCE TEMP. (TEMREF) OF 25 ARE:
 5.551E-10 1.664E-09 5.530E-09 1.645E-08 5.328E-08 1.474E-07 3.768E-07
 6.119E-07 6.665E-07 6.667E-07 6.667E-07

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

TIME = 0.001

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL DISP.</u>	<u>VERTICAL STRESS (STRAIN)</u>	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.00601	550.000	1158.495	65.833	1153.357
	(STRAIN)		-6.502E-07	5.078E-07	-6.502E-07	5.024E-07
1	21.49900	0.00603	0.849	0.849	-2080.786	-1953.152
	(STRAIN)		8.962E-07	<u>8.962E-07</u>	-7.216E-07	-7.216E-07
1	21.50100	0.00603	0.849	0.853	0.222	0.234
	(STRAIN)		3.129E-06	3.153E-06	-7.218E-07	-7.218E-07
1	76.49900	0.00581	0.629	0.630	-0.024	-0.020
	(STRAIN)		4.918E-06	4.921E-06	-1.809E-06	-1.809E-06
1	76.50100	0.00581	0.629	0.630	0.303	0.304
	(STRAIN)		5.478E-06	5.491E-06	-1.810E-06	-1.809E-06

TIME = 0.003

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL DISP.</u>	<u>VERTICAL STRESS (STRAIN)</u>	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS (STRAIN)</u>	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.00829	550.000	962.143	65.833	957.305
	(STRAIN)		-1.593E-06	1.254E-06	-1.593E-06	1.239E-06
1	21.49900	0.00835	1.742	1.742	-1807.001	-1679.997
	(STRAIN)		2.324E-06	2.324E-06	-1.890E-06	-1.890E-06
1	21.50100	0.00835	1.742	1.757	0.324	0.358
	(STRAIN)		6.810E-06	6.898E-06	-1.890E-06	-1.890E-06
1	76.49900	0.00791	1.118	1.119	-0.213	-0.202
	(STRAIN)		9.640E-06	9.651E-06	-4.076E-06	-4.076E-06
1	76.50100	0.00791	1.118	1.120	0.438	0.441
	(STRAIN)		1.110E-05	1.115E-05	-4.076E-06	-4.076E-06

Lanjutan Lampiran 16 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

TIME = 0.01

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.01160	550.000	861.717	72.790	851.436
	(STRAIN)		-4.619E-06	3.711E-06	-4.619E-06	3.602E-06
1	21.49900	0.01167	4.048	4.048	-1546.730	-1421.355
	(STRAIN)		6.588E-06	6.588E-06	-5.419E-06	-5.419E-06
1	21.50100	0.01167	4.048	4.102	0.431	0.535
	(STRAIN)		1.678E-05	1.711E-05	-5.419E-06	-5.419E-06
1	76.49900	0.01068	2.137	2.140	-0.814	-0.779
	(STRAIN)		2.056E-05	2.060E-05	-9.851E-06	-9.851E-06
1	76.50100	0.01068	2.136	2.144	0.598	0.609
	(STRAIN)		2.446E-05	2.462E-05	-9.850E-06	-9.850E-06

TIME = 0.03

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.01584	550.000	687.510	72.790	678.529
	(STRAIN)		-1.063E-05	8.683E-06	-1.063E-05	8.400E-06
1	21.49900	0.01606	8.827	8.828	-1290.522	-1168.580
	(STRAIN)		1.633E-05	1.633E-05	-1.360E-05	-1.360E-05
1	21.50100	0.01606	8.826	8.993	0.395	0.687
	(STRAIN)		3.813E-05	3.915E-05	-1.360E-05	-1.360E-05
1	76.49900	0.01403	3.799	3.809	-2.030	-1.938
	(STRAIN)		3.957E-05	3.968E-05	-2.049E-05	-2.049E-05
1	76.50100	0.01403	3.799	3.819	0.725	0.752
	(STRAIN)		4.808E-05	4.852E-05	-2.049E-05	-2.049E-05

TIME = 0.1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	<u>VERTICAL</u> DISP.	<u>VERTICAL</u> STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL <u>STRESS</u> (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000	0.02186	550.000	550.490	83.925	533.718
	(STRAIN)		-2.541E-05	2.205E-05	-2.541E-05	2.034E-05
1	21.49900	0.02217	19.609	19.620	-982.982	-869.180
	(STRAIN)		4.052E-05	4.052E-05	-3.427E-05	-3.427E-05
1	21.50100	0.02217	19.607	20.113	-0.297	0.581
	(STRAIN)		8.787E-05	9.097E-05	-3.427E-05	-3.427E-05
1	76.49900	0.01815	6.432	6.461	-4.337	-4.098
	(STRAIN)		7.156E-05	7.186E-05	-3.942E-05	-3.942E-05
1	76.50100	0.01815	6.432	6.486	0.705	0.775
	(STRAIN)		8.833E-05	8.953E-05	-3.942E-05	-3.942E-05

Lanjutan Lampiran 16 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

TIME = 0.3

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	STRESS	STRESS	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.02786	550.000	497.345	153.633	484.964
	(STRAIN)		-4.810E-05	4.863E-05	-4.810E-05	4.514E-05
1	21.49900	0.02815	37.018	37.084	-709.545	-609.334
	(STRAIN)		8.322E-05	8.324E-05	-7.085E-05	-7.085E-05
1	21.50100	0.02815	37.015	38.161	-2.235	-0.010
	(STRAIN)		1.700E-04	1.770E-04	-7.086E-05	-7.086E-05
1	76.49900	0.02150	9.201	9.261	-7.124	-6.636
	(STRAIN)		1.068E-04	1.075E-04	-6.140E-05	-6.140E-05
1	76.50100	0.02150	9.201	9.312	0.479	0.621
	(STRAIN)		1.332E-04	1.356E-04	-6.140E-05	-6.140E-05

TIME = 1

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	STRESS	STRESS	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.03378	550.000	384.469	162.758	368.171
	(STRAIN)		-7.107E-05	8.844E-05	-7.107E-05	7.671E-05
1	21.49900	0.03391	62.442	62.729	-465.860	-385.556
	(STRAIN)		1.518E-04	1.520E-04	-1.269E-04	-1.269E-04
1	21.50100	0.03391	62.440	64.477	-5.601	-0.712
	(STRAIN)		2.906E-04	3.031E-04	-1.269E-04	-1.269E-04
1	76.49900	0.02415	11.847	11.951	-9.923	-9.086
	(STRAIN)		1.409E-04	1.420E-04	-8.340E-05	-8.340E-05
1	76.50100	0.02415	11.847	12.037	0.192	0.437
	(STRAIN)		1.766E-04	1.808E-04	-8.340E-05	-8.340E-05

TIME = 3

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	STRESS	STRESS	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.03815	550.000	451.426	292.414	438.801
	(STRAIN)		-5.313E-05	1.326E-04	-5.313E-05	1.179E-04
1	21.49900	0.03689	79.439	79.996	-348.433	-281.027
	(STRAIN)		2.025E-04	2.030E-04	-1.640E-04	-1.640E-04
1	21.50100	0.03689	79.432	81.939	-7.632	-0.653
	(STRAIN)		3.702E-04	3.856E-04	-1.640E-04	-1.640E-04
1	76.49900	0.02536	13.170	13.300	-11.270	-10.216
	(STRAIN)		1.576E-04	1.589E-04	-9.427E-05	-9.427E-05
1	76.50100	0.02536	13.170	13.407	0.082	0.391
	(STRAIN)		1.977E-04	2.030E-04	-9.427E-05	-9.427E-05

Lanjutan Lampiran 16 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

TIME = 10

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	STRESS	STRESS	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.03880	550.000	440.466	292.414	428.465
	(STRAIN)		-5.013E-05	1.383E-04	-5.013E-05	1.230E-04
1	21.49900	0.03741	82.693	83.314	-328.577	-263.579
	(STRAIN)		2.128E-04	2.134E-04	-1.709E-04	-1.709E-04
1	21.50100	0.03741	82.686	85.268	-7.966	-0.570
	(STRAIN)		3.853E-04	4.012E-04	-1.710E-04	-1.710E-04
1	76.49900	0.02557	13.399	13.534	-11.494	-10.400
	(STRAIN)		1.604E-04	1.618E-04	-9.611E-05	-9.611E-05
1	76.50100	0.02557	13.399	13.644	0.068	0.390
	(STRAIN)		2.013E-04	2.067E-04	-9.611E-05	-9.611E-05

TIME = 30

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	STRESS	STRESS	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.03880	550.000	440.446	292.415	428.425
	(STRAIN)		-5.012E-05	1.383E-04	-5.012E-05	1.230E-04
1	21.49900	0.03741	82.702	83.323	-328.521	-263.530
	(STRAIN)		2.128E-04	2.134E-04	-1.710E-04	-1.710E-04
1	21.50100	0.03741	82.695	85.277	-7.967	-0.570
	(STRAIN)		3.854E-04	4.012E-04	-1.710E-04	-1.710E-04
1	76.49900	0.02557	13.400	13.534	-11.495	-10.401
	(STRAIN)		1.604E-04	1.618E-04	-9.612E-05	-9.612E-05
1	76.50100	0.02557	13.400	13.645	0.068	0.390
	(STRAIN)		2.013E-04	2.068E-04	-9.612E-05	-9.612E-05

TIME = 100

POINT	VERTICAL	<u>VERTICAL</u>	<u>VERTICAL</u>	MAJOR	MINOR	INTERMEDIATE
NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	PRINCIPAL	PRINCIAL	P. STRESS
			(STRAIN)	STRESS	STRESS	(HORIZONTAL
				(STRAIN)	(STRAIN)	P. STRAIN)
1	0.00000	0.03880	550.000	440.446	292.415	428.425
	(STRAIN)		-5.012E-05	1.383E-04	-5.012E-05	1.230E-04
1	21.49900	0.03741	82.702	83.323	-328.521	-263.530
	(STRAIN)		2.128E-04	2.134E-04	-1.710E-04	-1.710E-04
1	21.50100	0.03741	82.695	85.277	-7.967	-0.570
	(STRAIN)		3.854E-04	4.012E-04	-1.710E-04	-1.710E-04
1	76.49900	0.02557	13.400	13.534	-11.495	-10.401
	(STRAIN)		1.604E-04	1.618E-04	-9.612E-05	-9.612E-05
1	76.50100	0.02557	13.400	13.645	0.068	0.390
	(STRAIN)		2.013E-04	2.068E-04	-9.612E-05	-9.612E-05

Lanjutan Lampiran 16 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

TIME = 0.001						
2	0.00000	0.00606	550.000	1222.673	69.904	1213.377
	(STRAIN)		-6.847E-07	5.370E-07	-6.847E-07	5.271E-07
2	21.49900	0.00607	0.845	0.845	-2089.018	-1929.758
	(STRAIN)		8.928E-07	<u>8.928E-07</u>	-7.313E-07	-7.313E-07
2	21.50100	0.00607	0.845	0.846	0.218	0.238
	(STRAIN)		3.115E-06	3.117E-06	-7.314E-07	-7.314E-07
2	76.49900	0.00585	0.622	0.622	-0.024	-0.021
	(STRAIN)		4.871E-06	<u>4.871E-06</u>	-1.788E-06	-1.788E-06
2	76.50100	0.00585	0.622	0.622	0.299	0.300
	(STRAIN)		5.428E-06	5.430E-06	-1.788E-06	-1.788E-06
TIME = 0.003						
2	0.00000	0.00828	550.000	1037.635	69.904	1028.575
	(STRAIN)		-1.717E-06	1.357E-06	-1.717E-06	1.329E-06
2	21.49900	0.00831	1.751	1.751	-1831.501	-1672.649
	(STRAIN)		2.335E-06	<u>2.335E-06</u>	-1.935E-06	-1.935E-06
2	21.50100	0.00831	1.751	1.752	0.320	0.379
	(STRAIN)		6.844E-06	6.852E-06	-1.936E-06	-1.936E-06
2	76.49900	0.00786	1.116	1.116	-0.222	-0.214
	(STRAIN)		9.682E-06	9.684E-06	-4.102E-06	-4.102E-06
2	76.50100	0.00786	1.116	1.116	0.431	0.434
	(STRAIN)		1.117E-05	1.118E-05	-4.102E-06	-4.102E-06
TIME = 0.01						
2	0.00000	0.01161	550.000	854.359	69.904	845.735
	(STRAIN)		-4.601E-06	3.681E-06	-4.601E-06	3.590E-06
2	21.49900	0.01171	4.105	4.106	-1570.752	-1413.016
	(STRAIN)		6.623E-06	<u>6.623E-06</u>	-5.570E-06	-5.570E-06
2	21.50100	0.01171	4.105	4.110	0.432	0.626
	(STRAIN)		1.697E-05	1.700E-05	-5.571E-06	-5.571E-06
2	76.49900	0.01070	2.161	2.162	-0.830	-0.807
	(STRAIN)		2.087E-05	2.088E-05	-9.960E-06	-9.960E-06
2	76.50100	0.01070	2.161	2.163	0.601	0.611
	(STRAIN)		2.486E-05	2.489E-05	-9.960E-06	-9.960E-06
TIME = 0.03						
2	0.00000	0.01605	550.000	760.989	84.075	747.396
	(STRAIN)		-1.165E-05	9.612E-06	-1.165E-05	9.185E-06
2	21.49900	0.01618	8.967	8.967	-1310.851	-1155.583
	(STRAIN)		1.638E-05	<u>1.638E-05</u>	-1.402E-05	-1.402E-05
2	21.50100	0.01618	8.966	8.980	0.395	0.964
	(STRAIN)		3.857E-05	3.866E-05	-1.402E-05	-1.402E-05
2	76.49900	0.01410	3.854	3.856	-2.066	-2.003
	(STRAIN)		4.029E-05	4.030E-05	-2.072E-05	-2.072E-05
2	76.50100	0.01410	3.854	3.857	0.729	0.756
	(STRAIN)		4.899E-05	4.906E-05	-2.072E-05	-2.072E-05
TIME = 0.1						
2	0.00000	0.02204	550.000	556.639	84.075	545.139
	(STRAIN)		-2.591E-05	2.216E-05	-2.591E-05	2.099E-05
2	21.49900	0.02244	19.931	19.932	-998.114	-849.096
	(STRAIN)		4.043E-05	<u>4.043E-05</u>	-3.551E-05	-3.551E-05
2	21.50100	0.02244	19.931	19.968	-0.313	1.461
	(STRAIN)		8.871E-05	8.894E-05	-3.551E-05	-3.551E-05
2	76.49900	0.01829	6.566	6.571	-4.435	-4.268
	(STRAIN)		7.336E-05	7.341E-05	-4.001E-05	-4.001E-05
2	76.50100	0.01829	6.566	6.575	0.709	0.780
	(STRAIN)		9.065E-05	9.084E-05	-4.001E-05	-4.001E-05

Lanjutan Lampiran 16 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

TIME = 0.3						
2	0.00000	0.02809	550.000	487.467	143.825	475.013
	(STRAIN)		-4.848E-05	4.823E-05	-4.848E-05	4.473E-05
2	21.49900	0.02867	37.437	37.441	-716.956	-579.386
	(STRAIN)		8.196E-05	<u>8.196E-05</u>	-7.373E-05	-7.373E-05
2	21.50100	0.02867	37.436	37.499	-2.309	2.254
	(STRAIN)		1.702E-04	1.705E-04	-7.374E-05	-7.374E-05
2	76.49900	0.02173	9.464	9.473	-7.330	-6.981
	(STRAIN)		1.105E-04	1.105E-04	-6.261E-05	-6.261E-05
2	76.50100	0.02173	9.463	9.481	0.479	0.627
	(STRAIN)		1.378E-04	1.382E-04	-6.261E-05	-6.261E-05
TIME = 1						
2	0.00000	0.03454	550.000	399.976	166.229	384.039
	(STRAIN)		-7.573E-05	9.243E-05	-7.573E-05	8.096E-05
2	21.49900	0.03473	62.162	62.170	-464.467	-345.704
	(STRAIN)		1.455E-04	<u>1.455E-04</u>	-1.323E-04	-1.323E-04
2	21.50100	0.03473	62.157	62.214	-5.811	4.344
	(STRAIN)		2.848E-04	2.851E-04	-1.323E-04	-1.323E-04
2	76.49900	0.02448	12.281	12.298	-10.277	-9.666
	(STRAIN)		1.470E-04	1.472E-04	-8.549E-05	-8.549E-05
2	76.50100	0.02448	12.281	12.311	0.183	0.442
	(STRAIN)		1.844E-04	1.851E-04	-8.548E-05	-8.548E-05
TIME = 3						
2	0.00000	0.03767	550.000	333.716	166.229	320.888
	(STRAIN)		-7.978E-05	1.159E-04	-7.978E-05	1.009E-04
2	21.49900	0.03787	77.926	77.933	-343.126	-237.814
	(STRAIN)		1.899E-04	<u>1.899E-04</u>	-1.708E-04	-1.708E-04
2	21.50100	0.03787	77.916	77.947	-7.948	6.727
	(STRAIN)		3.561E-04	3.562E-04	-1.708E-04	-1.708E-04
2	76.49900	0.02575	13.707	13.728	-11.716	-10.936
	(STRAIN)		1.651E-04	1.653E-04	-9.689E-05	-9.689E-05
2	76.50100	0.02575	13.707	13.745	0.066	0.398
	(STRAIN)		2.074E-04	2.082E-04	-9.689E-05	-9.689E-05
TIME = 10						
2	0.00000	0.03931	550.000	417.034	257.414	399.677
	(STRAIN)		-6.296E-05	1.401E-04	-6.296E-05	1.181E-04
2	21.49900	0.03842	80.864	80.870	-322.718	-220.031
	(STRAIN)		1.986E-04	<u>1.986E-04</u>	-1.780E-04	-1.780E-04
2	21.50100	0.03842	80.854	80.879	-8.301	7.293
	(STRAIN)		3.691E-04	3.692E-04	-1.780E-04	-1.780E-04
2	76.49900	0.02597	13.956	13.977	-11.957	-11.145
	(STRAIN)		1.682E-04	1.684E-04	-9.884E-05	-9.884E-05
2	76.50100	0.02597	13.955	13.994	0.052	0.397
	(STRAIN)		2.113E-04	2.122E-04	-9.884E-05	-9.884E-05
TIME = 30						
2	0.00000	0.03931	550.000	416.995	257.414	399.654
	(STRAIN)		-6.295E-05	1.402E-04	-6.295E-05	1.181E-04
2	21.49900	0.03842	80.872	80.878	-322.661	-219.982
	(STRAIN)		1.986E-04	<u>1.986E-04</u>	-1.780E-04	-1.780E-04
2	21.50100	0.03842	80.862	80.888	-8.302	7.294
	(STRAIN)		3.691E-04	3.693E-04	-1.780E-04	-1.780E-04
2	76.49900	0.02597	13.956	13.978	-11.957	-11.145
	(STRAIN)		1.682E-04	1.684E-04	-9.884E-05	-9.884E-05
2	76.50100	0.02597	13.956	13.995	0.052	0.397
	(STRAIN)		2.113E-04	2.122E-04	-9.884E-05	-9.884E-05

Lanjutan Lampiran 16 Output Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

TIME = 100						
2	0.00000	0.03931	550.000	416.995	257.414	399.654
	(STRAIN)		-6.295E-05	1.402E-04	-6.295E-05	1.181E-04
2	21.49900	0.03842	80.872	80.878	-322.661	-219.982
	(STRAIN)		1.986E-04	<u>1.986E-04</u>	-1.780E-04	-1.780E-04
2	21.50100	0.03842	80.862	80.888	-8.302	7.294
	(STRAIN)		3.691E-04	3.693E-04	-1.780E-04	-1.780E-04
2	76.49900	0.02597	13.956	13.978	-11.957	-11.145
	(STRAIN)		1.682E-04	1.684E-04	-9.884E-05	-9.884E-05
2	76.50100	0.02597	13.956	13.995	0.052	0.397
	(STRAIN)		2.113E-04	2.122E-04	-9.884E-05	-9.884E-05
TIME = 0.001						
3	0.00000	0.00602	0.000	1161.903	50.739	1151.645
	(STRAIN)		-6.621E-07	5.154E-07	-6.621E-07	5.046E-07
3	21.49900	0.00603	0.794	0.794	-2031.968	-1855.054
	(STRAIN)		8.635E-07	<u>8.635E-07</u>	-7.162E-07	-7.162E-07
3	21.50100	0.00603	0.794	0.794	0.197	0.220
	(STRAIN)		2.946E-06	<u>2.946E-06</u>	-7.163E-07	-7.163E-07
3	76.49900	0.00582	0.573	0.573	-0.032	-0.029
	(STRAIN)		4.539E-06	4.539E-06	-1.695E-06	-1.695E-06
3	76.50100	0.00582	0.573	0.573	0.269	0.271
	(STRAIN)		5.079E-06	<u>5.079E-06</u>	-1.696E-06	-1.695E-06
TIME = 0.003						
3	0.00000	0.00794	0.000	1016.906	50.739	1006.797
	(STRAIN)		-1.722E-06	1.348E-06	-1.722E-06	1.315E-06
3	21.49900	0.00797	1.699	1.699	-1829.514	-1652.962
	(STRAIN)		2.321E-06	<u>2.321E-06</u>	-1.945E-06	-1.945E-06
3	21.50100	0.00797	1.700	1.700	0.293	0.360
	(STRAIN)		6.687E-06	<u>6.687E-06</u>	-1.945E-06	-1.945E-06
3	76.49900	0.00753	1.067	1.067	-0.252	-0.245
	(STRAIN)		9.471E-06	<u>9.471E-06</u>	-4.119E-06	-4.119E-06
3	76.50100	0.00753	1.067	1.067	0.388	0.392
	(STRAIN)		1.101E-05	<u>1.101E-05</u>	-4.119E-06	-4.119E-06
TIME = 0.01						
3	0.00000	0.01150	0.000	839.296	50.739	829.628
	(STRAIN)		-4.652E-06	3.674E-06	-4.652E-06	3.572E-06
3	21.49900	0.01159	4.124	4.124	-1576.663	-1401.156
	(STRAIN)		6.610E-06	<u>6.610E-06</u>	-5.629E-06	-5.629E-06
3	21.50100	0.01159	4.124	4.124	0.434	0.656
	(STRAIN)		1.701E-05	<u>1.701E-05</u>	-5.630E-06	-5.630E-06
3	76.49900	0.01056	2.194	2.194	-0.873	-0.851
	(STRAIN)		2.135E-05	2.135E-05	-1.025E-05	-1.025E-05
3	76.50100	0.01056	2.194	2.194	0.592	0.602
	(STRAIN)		2.549E-05	<u>2.549E-05</u>	-1.025E-05	-1.025E-05
TIME = 0.03						
3	0.00000	0.01603	0.000	651.918	50.739	643.094
	(STRAIN)		-1.048E-05	8.400E-06	-1.048E-05	8.123E-06
3	21.49900	0.01629	8.955	8.955	-1301.840	-1128.669
	(STRAIN)		1.614E-05	<u>1.614E-05</u>	-1.405E-05	-1.405E-05
3	21.50100	0.01629	8.954	8.954	0.416	1.066
	(STRAIN)		3.835E-05	<u>3.835E-05</u>	-1.405E-05	-1.405E-05
3	76.49900	0.01419	3.910	3.910	-2.077	-2.020
	(STRAIN)		4.079E-05	<u>4.079E-05</u>	-2.091E-05	-2.091E-05
3	76.50100	0.01419	3.910	3.910	0.750	0.777
	(STRAIN)		4.959E-05	<u>4.959E-05</u>	-2.091E-05	-2.091E-05

Lanjutan Lampiran 16 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan Software KENPAVE Metode Tiga Tahap

TIME = 0.1						
3	0.00000	0.02231	0.000	620.715	104.747	602.954
	(STRAIN)		-2.795E-05	2.453E-05	-2.795E-05	2.273E-05
3	21.49900	0.02253	19.753	19.753	-986.744	-819.603
	(STRAIN)		3.955E-05	<u>3.955E-05</u>	-3.553E-05	-3.553E-05
3	21.50100	0.02253	19.752	19.752	-0.297	1.735
	(STRAIN)		8.749E-05	<u>8.749E-05</u>	-3.553E-05	-3.553E-05
3	76.49900	0.01836	6.597	6.597	-4.434	-4.280
	(STRAIN)		7.364E-05	7.364E-05	-4.003E-05	-4.003E-05
3	76.50100	0.01836	6.597	6.597	0.724	0.795
	(STRAIN)		9.097E-05	<u>9.097E-05</u>	-4.003E-05	-4.003E-05
TIME = 0.3						
3	0.00000	0.02819	0.000	446.906	104.747	432.541
	(STRAIN)		-4.966E-05	4.663E-05	-4.966E-05	4.259E-05
3	21.49900	0.02876	36.877	36.877	-705.471	-549.717
	(STRAIN)		7.945E-05	<u>7.945E-05</u>	-7.376E-05	-7.376E-05
3	21.50100	0.02876	36.871	36.871	-2.290	2.952
	(STRAIN)		1.665E-04	<u>1.665E-04</u>	-7.376E-05	-7.376E-05
3	76.49900	0.02179	9.511	9.511	-7.353	-7.031
	(STRAIN)		1.110E-04	<u>1.110E-04</u>	-6.276E-05	-6.276E-05
3	76.50100	0.02179	9.511	9.511	0.487	0.636
	(STRAIN)		1.386E-04	<u>1.386E-04</u>	-6.276E-05	-6.276E-05
TIME = 1						
3	0.00000	0.03507	0.000	439.956	188.192	414.784
	(STRAIN)		-7.898E-05	1.021E-04	-7.898E-05	8.403E-05
3	21.49900	0.03485	60.574	60.574	-452.898	-316.481
	(STRAIN)		1.388E-04	<u>1.388E-04</u>	-1.321E-04	-1.321E-04
3	21.50100	0.03485	60.563	60.563	-5.782	5.953
	(STRAIN)		2.750E-04	<u>2.750E-04</u>	-1.321E-04	-1.321E-04
3	76.49900	0.02455	12.361	12.361	-10.333	-9.764
	(STRAIN)		1.481E-04	1.481E-04	-8.581E-05	-8.581E-05
3	76.50100	0.02455	12.361	12.361	0.187	0.449
	(STRAIN)		1.858E-04	<u>1.858E-04</u>	-8.581E-05	-8.581E-05
TIME = 3						
3	0.00000	0.03841	0.000	370.098	188.192	349.077
	(STRAIN)		-8.300E-05	1.295E-04	-8.300E-05	1.049E-04
3	21.49900	0.03799	75.291	75.291	-332.160	-210.017
	(STRAIN)		1.788E-04	<u>1.788E-04</u>	-1.703E-04	-1.703E-04
3	21.50100	0.03799	75.275	75.275	-7.913	9.147
	(STRAIN)		3.402E-04	<u>3.402E-04</u>	-1.703E-04	-1.703E-04
3	76.49900	0.02583	13.806	13.806	-11.790	-11.062
	(STRAIN)		1.664E-04	<u>1.664E-04</u>	-9.733E-05	-9.733E-05
3	76.50100	0.02583	13.806	13.806	0.068	0.405
	(STRAIN)		2.091E-04	<u>2.091E-04</u>	-9.733E-05	-9.733E-05
TIME = 10						
3	0.00000	0.03901	0.000	358.642	188.192	338.384
	(STRAIN)		-8.236E-05	1.345E-04	-8.236E-05	1.087E-04
3	21.49900	0.03854	77.994	77.994	-311.939	-192.624
	(STRAIN)		1.865E-04	<u>1.865E-04</u>	-1.773E-04	-1.773E-04
3	21.50100	0.03854	77.977	77.977	-8.266	9.887
	(STRAIN)		3.519E-04	<u>3.519E-04</u>	-1.774E-04	-1.774E-04
3	76.49900	0.02605	14.058	14.058	-12.034	-11.276
	(STRAIN)		1.696E-04	1.696E-04	-9.929E-05	-9.929E-05
3	76.50100	0.02605	14.058	14.058	0.054	0.404
	(STRAIN)		2.131E-04	<u>2.131E-04</u>	-9.929E-05	-9.929E-05

**Lanjutan Lampiran 16 *Output* Nilai Regangan dan Tegangan Menggunakan
Software KENPAVE Metode Tiga Tahap**

TIME = 30						
3	0.00000	0.03902	0.000	358.611	188.192	338.353
	(STRAIN)		-8.236E-05	1.345E-04	-8.236E-05	1.088E-04
3	21.49900	0.03854	78.002	78.002	-311.883	-192.576
	(STRAIN)		1.865E-04	<u>1.865E-04</u>	-1.774E-04	-1.774E-04
3	21.50100	0.03854	77.985	77.985	-8.267	9.889
	(STRAIN)		3.519E-04	<u>3.519E-04</u>	-1.774E-04	-1.774E-04
3	76.49900	0.02605	14.059	14.059	-12.034	-11.276
	(STRAIN)		1.696E-04	<u>1.696E-04</u>	-9.930E-05	-9.930E-05
3	76.50100	0.02605	14.058	14.058	0.054	0.404
	(STRAIN)		2.131E-04	<u>2.131E-04</u>	-9.930E-05	-9.930E-05
TIME = 100						
3	0.00000	0.03902	0.000	358.611	188.192	338.353
	(STRAIN)		-8.236E-05	1.345E-04	-8.236E-05	1.088E-04
3	21.49900	0.03854	78.002	78.002	-311.883	-192.576
	(STRAIN)		1.865E-04	<u>1.865E-04</u>	-1.774E-04	-1.774E-04
3	21.50100	0.03854	77.985	77.985	-8.267	9.889
	(STRAIN)		3.519E-04	<u>3.519E-04</u>	-1.774E-04	-1.774E-04
3	76.49900	0.02605	14.059	14.059	-12.034	-11.276
	(STRAIN)		1.696E-04	<u>1.696E-04</u>	-9.930E-05	-9.930E-05
3	76.50100	0.02605	14.058	14.058	0.054	0.404
	(STRAIN)		2.131E-04	<u>2.131E-04</u>	-9.930E-05	-9.930E-05

Lampiran 17 Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur Pelayanan Pada Metode Pencampuran Satu Tahap

Nf							
Time	Fatigue	Horizontal Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	-7,27E-07	7,266E-07	-7,37E-07	7,365E-07	-7,22E-07	7,217E-07
0,003	21,4990	-1,90E-06	0,000001904	-1,95E-06	0,00000195	-1,96E-06	0,000001961
0,01	21,4990	-5,46E-06	0,000005463	-5,62E-06	0,000005615	-5,67E-06	0,000005673
0,03	21,4990	-1,37E-05	0,00001371	-1,41E-05	0,00001413	-1,42E-05	0,00001416
0,1	21,4990	-3,46E-05	0,00003455	-3,58E-05	0,0000358	-3,58E-05	0,00003581
0,3	21,4990	-7,14E-05	0,00007144	-7,43E-05	0,00007431	-7,43E-05	0,00007432
1	21,4990	-1,28E-04	0,0001279	-1,33E-04	0,0001333	-1,33E-04	0,000133
3	21,4990	-1,65E-04	0,0001653	-1,72E-04	0,000172	-1,71E-04	0,0001714
10	21,4990	-1,72E-04	0,0001722	-1,79E-04	0,0001792	-1,79E-04	0,0001785
30	21,4990	-1,72E-04	0,0001723	-1,79E-04	0,0001792	-1,79E-04	0,0001785

Nr							
Time	Rutting	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	9,02E-07	9,019E-07	8,98E-07	8,978E-07	8,69E-07	8,686E-07
0,003	21,4990	2,34E-06	0,00000234	2,35E-06	0,00000235	2,34E-06	0,000002335
0,01	21,4990	6,64E-06	0,000006638	6,67E-06	0,000006665	6,65E-06	0,000006646
0,03	21,4990	1,65E-05	0,00001645	1,65E-05	0,00001648	1,62E-05	0,00001623
0,1	21,4990	4,08E-05	0,00004083	4,07E-05	0,00004066	3,97E-05	0,00003973
0,3	21,4990	8,39E-05	0,00008386	8,24E-05	0,00008236	7,97E-05	0,00007972
1	21,4990	1,53E-04	0,000153	1,46E-04	0,0001461	1,39E-04	0,0001391
3	21,4990	2,04E-04	0,0002042	1,91E-04	0,0001905	1,79E-04	0,0001789
10	21,4990	2,14E-04	0,0002144	1,99E-04	0,0001992	1,87E-04	0,0001866
30	21,4990	2,14E-04	0,0002144	1,99E-04	0,0001993	1,87E-04	0,0001867

Nd							
Time	Permanent	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	76,5010	5,54E-06	0,000005535	5,48E-06	0,000005484	5,14E-06	0,000005138
0,003	76,5010	1,12E-05	0,00001122	1,13E-05	0,0000113	1,12E-05	0,00001115
0,01	76,5010	2,47E-05	0,00002474	2,52E-05	0,00002515	2,58E-05	0,00002578
0,03	76,5010	4,86E-05	0,00004859	4,95E-05	0,00004952	5,01E-05	0,00005011
0,1	76,5010	8,92E-05	0,00008916	9,15E-05	0,00009152	9,18E-05	0,00009184
0,3	76,5010	1,34E-04	0,0001342	1,39E-04	0,000139	1,40E-04	0,0001397
1	76,5010	1,78E-04	0,0001778	1,86E-04	0,0001858	1,87E-04	0,0001871
3	76,5010	1,99E-04	0,000199	2,09E-04	0,0002088	2,11E-04	0,0002105
10	76,5010	2,03E-04	0,0002025	2,13E-04	0,0002127	2,15E-04	0,0002145
30	76,5010	2,03E-04	0,0002025	2,13E-04	0,0002127	2,15E-04	0,0002145

Max	0	10	16,5	Dipakai	Nilai
Nr	0,0001723	0,0001792	0,0001785	0,0001792	207.583.492,09
Nf	0,0002144	0,0001993	0,0001867	0,0002144	36.327.817,47
Nd	0,0002025	0,0002127	0,0002145	0,0002145	36.252.056,22

Golongan	i 2025-2045 (%)	LHR 2025	Faktor VFD 5 Normal	DL (%)	DD	CESA 5
MP	6,758	1733,17	0,0	100	0,5	0
5B	6,758	5,00	1,3	100	0,5	1187,052
6A	6,758	120,08	0,4	100	0,5	8765,920
6B	6,758	1689,14	0,4	100	0,5	123307,271
7A2	6,758	274,19	6	100	0,5	300232,750
7C1	6,758	12,01	8,0	100	0,5	17531,839

**Lanjutan Lampiran 17 Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur
Pelayanan Pada Metode Pencampuran Satu Tahap**

Nf			
207.583.492	=	0 a	untuk Gol. MP
		1187,051627 a	untuk Gol. 5B
		8765,919709 a	untuk Gol. 6A
		123307,2706 a	untuk Gol. 6B
		300232,75 a	untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a	
a	=	460,25	
b^UR	=	32,10	
b	=	1,067576581	
UR	=	53,049 Tahun	
Status		Struktur OK	

Nr			
36.327.817	=	0 a	untuk Gol. MP
		1187,051627 a	untuk Gol. 5B
		8765,919709 a	untuk Gol. 6A
		123307,2706 a	untuk Gol. 6B
		300232,75 a	untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a	
a	=	80,55	
b^UR	=	6,44	
b	=	1,067576581	
UR	=	28,490 Tahun	
Status		Struktur OK	

Nd			
36.252.056	=	0 a	untuk Gol. MP
		1187,051627 a	untuk Gol. 5B
		8765,919709 a	untuk Gol. 6A
		123307,2706 a	untuk Gol. 6B
		300232,75 a	untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a	
a	=	80,38	
b^UR	=	6,43	
b	=	1,067576581	
UR	=	28,463 Tahun	
Status		Struktur OK	

Lampiran 18 Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur Pelayanan Pada Metode Pencampuran Dua Tahap

Nf							
Time	Fatigue	Horizontal Strain					
		0	10	10	16,5	16,5	16,5
0,001	21,4990	-7,23E-07	7,227E-07	-7,33E-07	7,325E-07	-7,18E-07	7,176E-07
0,003	21,4990	-1,89E-06	0,000001893	-1,94E-06	0,000001939	-1,95E-06	0,000001949
0,01	21,4990	-5,43E-06	0,000005429	-5,58E-06	0,000005581	-5,64E-06	0,000005639
0,03	21,4990	-1,36E-05	0,00001363	-1,41E-05	0,00001405	-1,41E-05	0,00001408
0,1	21,4990	-3,43E-05	0,00003434	-3,56E-05	0,00003558	-3,56E-05	0,0000356
0,3	21,4990	-7,10E-05	0,00007099	-7,39E-05	0,00007387	-7,39E-05	0,00007389
1	21,4990	-1,27E-04	0,0001271	-1,33E-04	0,0001325	-1,32E-04	0,0001323
3	21,4990	-1,64E-04	0,0001643	-1,71E-04	0,0001711	-1,71E-04	0,0001705
10	21,4990	-1,71E-04	0,0001713	-1,78E-04	0,0001783	-1,78E-04	0,0001776
30	21,4990	-1,71E-04	0,0001713	-1,78E-04	0,0001783	-1,78E-04	0,0001776

Nr							
Time	Rutting	Vertical Strain					
		0	10	10	16,5	16,5	16,5
0,001	21,4990	8,98E-07	8,975E-07	8,94E-07	8,939E-07	8,65E-07	8,648E-07
0,003	21,4990	2,33E-06	0,000002328	2,34E-06	0,000002339	2,32E-06	0,000002324
0,01	21,4990	6,60E-06	0,0000066	6,63E-06	0,000006633	6,62E-06	0,000006619
0,03	21,4990	1,64E-05	0,00001636	1,64E-05	0,0000164	1,62E-05	0,00001616
0,1	21,4990	4,06E-05	0,00004059	4,05E-05	0,00004049	3,96E-05	0,00003959
0,3	21,4990	8,34E-05	0,00008337	8,21E-05	0,00008206	7,95E-05	0,00007952
1	21,4990	1,52E-04	0,0001521	1,46E-04	0,0001457	1,39E-04	0,0001389
3	21,4990	2,03E-04	0,0002029	1,90E-04	0,00019	1,79E-04	0,0001788
10	21,4990	2,13E-04	0,0002132	1,99E-04	0,0001988	1,87E-04	0,0001865
30	21,4990	2,13E-04	0,0002133	1,99E-04	0,0001988	1,87E-04	0,0001866

Nd							
Time	Permanent	Vertical Strain					
		0	10	10	16,5	16,5	16,5
0,001	76,5010	5,49E-06	0,00000549	5,44E-06	0,000005439	5,09E-06	0,000005094
0,003	76,5010	1,11E-05	0,00001113	1,12E-05	0,0000112	1,10E-05	0,00001104
0,01	76,5010	2,45E-05	0,00002453	2,49E-05	0,00002493	2,56E-05	0,00002556
0,03	76,5010	4,82E-05	0,0000482	4,91E-05	0,00004912	4,97E-05	0,00004971
0,1	76,5010	8,85E-05	0,00008853	9,09E-05	0,00009086	9,12E-05	0,00009118
0,3	76,5010	1,33E-04	0,0001334	1,38E-04	0,0001381	1,39E-04	0,0001388
1	76,5010	1,77E-04	0,0001769	1,85E-04	0,0001847	1,86E-04	0,0001861
3	76,5010	1,98E-04	0,000198	2,08E-04	0,0002077	2,10E-04	0,0002095
10	76,5010	2,02E-04	0,0002016	2,12E-04	0,0002116	2,13E-04	0,0002134
30	76,5010	2,02E-04	0,0002016	2,12E-04	0,0002117	2,14E-04	0,0002135

Max	0	10	16,5	Dipakai	Nilai
Nr	0,0001713	0,0001783	0,0001776	0,0001783	211.722.354,94
Nf	0,0002133	0,0001988	0,0001866	0,0002133	37.174.111,01
Nd	0,0002016	0,0002117	0,0002135	0,0002135	37.018.459,80

Golongan	i 2025-2045 (%)	LHR 2025	Faktor VFD 5 Normal	DL (%)	DD	CESA 5
MP	6,758	1733,17	0,0	100	0,5	0
5B	6,758	5,00	1,3	100	0,5	1187,052
6A	6,758	120,08	0,4	100	0,5	8765,920
6B	6,758	1689,14	0,4	100	0,5	123307,271
7A2	6,758	274,19	6	100	0,5	300232,750
7C1	6,758	12,01	8,0	100	0,5	17531,839

**Lanjutan Lampiran 18 Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur
Pelayanan Pada Metode Pencampuran Dua Tahap**

Nf			
211.722.355	=	0 a	untuk Gol. MP
		1187,051627 a	untuk Gol. 5B
		8765,919709 a	untuk Gol. 6A
		123307,2706 a	untuk Gol. 6B
		300232,75 a	untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a	
a	=	469,4250521	
b^UR	=	32,72	
b	=	1,067576581	
UR	=	53,341 Tahun	
Status		Struktur OK	

Nr			
37.174.111	=	0 a	untuk Gol. MP
		1187,051627 a	untuk Gol. 5B
		8765,919709 a	untuk Gol. 6A
		123307,2706 a	untuk Gol. 6B
		300232,75 a	untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a	
a	=	82,42	
b^UR	=	6,57	
b	=	1,067576581	
UR	=	28,788 Tahun	
Status		Struktur OK	

Nd			
37.018.460	=	0 a	untuk Gol. MP
		1187,051627 a	untuk Gol. 5B
		8765,919709 a	untuk Gol. 6A
		123307,2706 a	untuk Gol. 6B
		300232,75 a	untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a	
a	=	82,08	
b^UR	=	6,55	
b	=	1,067576581	
UR	=	28,734 Tahun	
Status		Struktur OK	

Lampiran 19 Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur Pelayanan Pada Metode Pencampuran Tiga Tahap

Nf							
Time	Fatigue	Horizontal Strain					
		0	10	10	10	16,5	16,5
0,001	21,4990	-7,22E-07	7,216E-07	-7,31E-07	7,313E-07	-7,16E-07	7,162E-07
0,003	21,4990	-1,89E-06	0,00000189	-1,94E-06	0,000001935	-1,95E-06	0,000001945
0,01	21,4990	-5,42E-06	0,000005419	-5,57E-06	0,00000557	-5,63E-06	0,000005629
0,03	21,4990	-1,36E-05	0,0000136	-1,40E-05	0,00001402	-1,41E-05	0,00001405
0,1	21,4990	-3,43E-05	0,00003427	-3,55E-05	0,00003551	-3,55E-05	0,00003553
0,3	21,4990	-7,09E-05	0,00007085	-7,37E-05	0,00007373	-7,38E-05	0,00007376
1	21,4990	-1,27E-04	0,0001269	-1,32E-04	0,0001323	-1,32E-04	0,0001321
3	21,4990	-1,64E-04	0,000164	-1,71E-04	0,0001708	-1,70E-04	0,0001703
10	21,4990	-1,71E-04	0,0001709	-1,78E-04	0,000178	-1,77E-04	0,0001773
30	21,4990	-1,71E-04	0,000171	-1,78E-04	0,000178	-1,77E-04	0,0001774

Nr							
Time	Rutting	Vertical Strain					
		0	10	10	10	16,5	16,5
0,001	21,4990	8,96E-07	8,962E-07	8,93E-07	8,928E-07	8,64E-07	8,635E-07
0,003	21,4990	2,32E-06	0,000002324	2,34E-06	0,000002335	2,32E-06	0,000002321
0,01	21,4990	6,59E-06	0,000006588	6,62E-06	0,000006623	6,61E-06	0,00000661
0,03	21,4990	1,63E-05	0,00001633	1,64E-05	0,00001638	1,61E-05	0,00001614
0,1	21,4990	4,05E-05	0,00004052	4,04E-05	0,00004043	3,96E-05	0,00003955
0,3	21,4990	8,32E-05	0,00008322	8,20E-05	0,00008196	7,95E-05	0,00007945
1	21,4990	1,52E-04	0,0001518	1,46E-04	0,0001455	1,39E-04	0,0001388
3	21,4990	2,03E-04	0,0002025	1,90E-04	0,0001899	1,79E-04	0,0001788
10	21,4990	2,13E-04	0,0002128	1,99E-04	0,0001986	1,87E-04	0,0001865
30	21,4990	2,13E-04	0,0002128	1,99E-04	0,0001986	1,87E-04	0,0001865

Nd							
Time	Permanent	Vertical Strain					
		0	10	10	10	16,5	16,5
0,001	76,5010	5,48E-06	0,000005478	5,43E-06	0,000005428	5,08E-06	0,000005079
0,003	76,5010	1,11E-05	0,0000111	1,12E-05	0,00001117	1,10E-05	0,00001101
0,01	76,5010	2,45E-05	0,00002446	2,49E-05	0,00002486	2,55E-05	0,00002549
0,03	76,5010	4,81E-05	0,00004808	4,90E-05	0,00004899	4,96E-05	0,00004959
0,1	76,5010	8,83E-05	0,00008833	9,07E-05	0,00009065	9,10E-05	0,00009097
0,3	76,5010	1,33E-04	0,0001332	1,38E-04	0,0001378	1,39E-04	0,0001386
1	76,5010	1,77E-04	0,0001766	1,84E-04	0,0001844	1,86E-04	0,0001858
3	76,5010	1,98E-04	0,0001977	2,07E-04	0,0002074	2,09E-04	0,0002091
10	76,5010	2,01E-04	0,0002013	2,11E-04	0,0002113	2,13E-04	0,0002131
30	76,5010	2,01E-04	0,0002013	2,11E-04	0,0002113	2,13E-04	0,0002131

Max	0	10	16,5	Dipakai	Nilai
Nr	0,000171	0,000178	0,0001774	0,000178	213.124.954,42
Nf	0,0002128	0,0001986	0,0001865	0,0002128	37.566.755,86
Nd	0,0002013	0,0002113	0,0002131	0,0002131	37.330.563,62

Golongan	i 2025-2045 (%)	LHR 2025	Faktor VFD 5 Normal	DL (%)	DD	CESA 5
MP	6,758	1733,17	0,0	100	0,5	0
5B	6,758	5,00	1,3	100	0,5	1187,052
6A	6,758	120,08	0,4	100	0,5	8765,920
6B	6,758	1689,14	0,4	100	0,5	123307,271
7A2	6,758	274,19	6	100	0,5	300232,750
7C1	6,758	12,01	8,0	100	0,5	17531,839

**Lanjutan Lampiran 19 Hasil Analisis Repetisi Beban dan Prediksi Umur
Pelayanan Pada Metode Pencampuran Tiga Tahap**

Nf				
213.124.954	=	0 a		untuk Gol. MP
		1187,051627 a		untuk Gol. 5B
		8765,919709 a		untuk Gol. 6A
		123307,2706 a		untuk Gol. 6B
		300232,75 a		untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	+	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a		
a	=	472,53		
b^UR	=	32,93		
b	=	1,067576581		
UR	=	53,439 Tahun		
	Status	Struktur OK		

Nr				
37.566.756	=	0 a		untuk Gol. MP
		1187,051627 a		untuk Gol. 5B
		8765,919709 a		untuk Gol. 6A
		123307,2706 a		untuk Gol. 6B
		300232,75 a		untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	+	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a		
a	=	83,29		
b^UR	=	6,63		
b	=	1,067576581		
UR	=	28,924 Tahun		
	Status	Struktur OK		

Nd				
37.330.564	=	0 a		untuk Gol. MP
		1187,051627 a		untuk Gol. 5B
		8765,919709 a		untuk Gol. 6A
		123307,2706 a		untuk Gol. 6B
		300232,75 a		untuk Gol. 7A2
		17531,83942 a	+	untuk Gol. 7C1
		451024,8313 a		
a	=	82,77		
b^UR	=	6,59		
b	=	1,067576581		
UR	=	28,842 Tahun		
	Status	Struktur OK		

Lampiran 20 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

Multivariate Tests^a

Effect		Value	F	Hypothesis df
Intercept	Pillai's Trace	1.000	1038925720.507 ^b	6.000
	Wilks' Lambda	.000	1038925522.470 ^b	6.000
	Hotelling's Trace	6233553134.821	1038925522.470 ^b	6.000
	Roy's Largest Root	6233553134.821	1038925522.470 ^b	6.000
Metode_Pencampuran	Pillai's Trace	1.781	2.707	12.000
	Wilks' Lambda	.001	4.235 ^b	12.000
	Hotelling's Trace	150.935	.000	12.000
	Roy's Largest Root	147.230	49.077 ^c	6.000

a. Design: Intercept + Metode_Pencampuran

b. Exact statistic

c. The statistic is an upper bound on F that yields a lower bound on the significance level.

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
VITM	Based on Mean	4.544	2	6	.063
	Based on Median	3.735	2	6	.088
	Based on Median and with adjusted df	3.735	2	2.006	.211
	Based on trimmed mean	4.497	2	6	.064
VFWA	Based on Mean	4.111	2	6	.075
	Based on Median	3.793	2	6	.086
	Based on Median and with adjusted df	3.793	2	2.007	.208
	Based on trimmed mean	4.093	2	6	.076
VMA	Based on Mean	4.546	2	6	.063
	Based on Median	3.735	2	6	.088
	Based on Median and with adjusted df	3.735	2	2.006	.211
	Based on trimmed mean	4.498	2	6	.064
Density	Based on Mean	4.354	2	6	.068
	Based on Median	3.784	2	6	.086
	Based on Median and with adjusted df	3.784	2	2.007	.208
	Based on trimmed mean	4.321	2	6	.069

Lanjutan Lampiran 20 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
Stabilitas	Based on Mean	.119	2	6	.890
	Based on Median	.043	2	6	.958
	Based on Median and with adjusted df	.043	2	5.832	.958
	Based on trimmed mean	.112	2	6	.896
Flow	Based on Mean	1.040	2	6	.409
	Based on Median	.875	2	6	.464
	Based on Median and with adjusted df	.875	2	4.923	.473
	Based on trimmed mean	1.035	2	6	.411
MQ	Based on Mean	3.198	2	6	.113
	Based on Median	.341	2	6	.724
	Based on Median and with adjusted df	.341	2	2.898	.736
	Based on trimmed mean	2.744	2	6	.143
ITS	Based on Mean	2.624	2	6	.152
	Based on Median	.427	2	6	.671
	Based on Median and with adjusted df	.427	2	3.385	.684
	Based on trimmed mean	2.327	2	6	.179
CL	Based on Mean	4.070	2	6	.076
	Based on Median	3.883	2	6	.083
	Based on Median and with adjusted df	3.883	2	2.006	.204
	Based on trimmed mean	4.060	2	6	.077
Stabilitas Perendaman 24_Jam	Based on Mean	3.675	2	6	.091
	Based on Median	.263	2	6	.777
	Based on Median and with adjusted df	.263	2	3.246	.784
	Based on trimmed mean	2.985	2	6	.126

Lanjutan Lampiran 20 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

Levene's Test of Equality of Error Variances^a

		Levene Statistic	df1	df2	Sig.
ITS_Perendaman_24_Jam	Based on Mean	.894	2	6	.457
	Based on Median	.117	2	6	.892
	Based on Median and with adjusted df	.117	2	4.601	.893
	Based on trimmed mean	.782	2	6	.499
DD	Based on Mean	1.728	2	6	.255
	Based on Median	1.549	2	6	.287
	Based on Median and with adjusted df	1.549	2	3.384	.333
	Based on trimmed mean	1.724	2	6	.256

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.^a

a. Design: Intercept + Metode_Pencampuran

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
Corrected Model	VITM	.518 ^a	2	.259	.748	.513	.200
	VFWA	9.601 ^b	2	4.800	.697	.534	.188
	VMA	.380 ^c	2	.190	.749	.512	.200
	Density	.000 ^d	2	.000	.753	.511	.201
	Stabilitas	44736.057 ^e	2	22368.028	40.356	.000	.931
	Flow	.102 ^f	2	.051	9.150	.015	.753
	MQ	16035.926 ^g	2	8017.963	43.822	.000	.936
	ITS	31680.782 ^h	2	15840.391	25.305	.001	.894
	CL	1.969 ⁱ	2	.984	4.681	.060	.609
	Stabilitas_Perendaman_24_Jam	50706.602 ^j	2	25353.301	22.771	.002	.884
	ITS_Perendaman_24_Jam	32254.425 ^k	2	16127.213	28.065	.001	.903
	DD	.000 ^l	2	.000	.316	.741	.095
Intercept	VITM	132.212	1	132.212	382.013	.000	.985
	VFWA	55238.161	1	55238.161	8018.850	.000	.999
	VMA	2802.749	1	2802.749	11053.135	.000	.999
	Density	45.347	1	45.347	245560.051	.000	1.000

Lanjutan Lampiran 20 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
	Stabilitas	11100207.121	1	11100207.121	20026.838	.000	1.000
	Flow	64.802	1	64.802	11664.450	.000	.999
	MQ	1554858.532	1	1554858.532	8497.953	.000	.999
	ITS	7208849.105	1	7208849.105	11516.127	.000	.999
	CL	170.834	1	170.834	812.280	.000	.993
	Stabilitas_Perendaman_24_Jam	10597872.231	1	10597872.231	9518.598	.000	.999
	ITS_Perendaman_24_Jam	6172304.642	1	6172304.642	10741.233	.000	.999
	DD	.108	1	.108	139.237	.000	.959
Metode_Pencampuran	VITM	.518	2	.259	.748	.513	.200
	VFWA	9.601	2	4.800	.697	.534	.188
	VMA	.380	2	.190	.749	.512	.200
	Density	.000	2	.000	.753	.511	.201
	Stabilitas	44736.057	2	22368.028	40.356	.000	.931
	Flow	.102	2	.051	9.150	.015	.753
	MQ	16035.926	2	8017.963	43.822	.000	.936
	ITS	31680.782	2	15840.391	25.305	.001	.894
	CL	1.969	2	.984	4.681	.060	.609
	Stabilitas_Perendaman_24_Jam	50706.602	2	25353.301	22.771	.002	.884
	ITS_Perendaman_24_Jam	32254.425	2	16127.213	28.065	.001	.903
	DD	.000	2	.000	.316	.741	.095
Error	VITM	2.077	6	.346			
	VFWA	41.331	6	6.889			
	VMA	1.521	6	.254			
	Density	.001	6	.000			
	Stabilitas	3325.600	6	554.267			
	Flow	.033	6	.006			
	MQ	1097.812	6	182.969			
	ITS	3755.872	6	625.979			
	CL	1.262	6	.210			

Lanjutan Lampiran 20 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Partial Eta Squared
	Stabilitas_Perendaman_24_Jam	6680.315	6	1113.386			
	ITS_Perendaman_24_Jam	3447.819	6	574.637			
	DD	.005	6	.001			
Total	VITM	134.806	9				
	VFWA	55289.093	9				
	VMA	2804.651	9				
	Density	45.348	9				
	Stabilitas	11148268.777	9				
	Flow	64.938	9				
	MQ	1571992.270	9				
	ITS	7244285.758	9				
	CL	174.064	9				
	Stabilitas_Perendaman_24_Jam	10655259.149	9				
	ITS_Perendaman_24_Jam	6208006.886	9				
	DD	.113	9				
Corrected Total	VITM	2.595	8				
	VFWA	50.932	8				
	VMA	1.901	8				
	Density	.001	8				
	Stabilitas	48061.656	8				
	Flow	.135	8				
	MQ	17133.738	8				
	ITS	35436.653	8				
	CL	3.231	8				
	Stabilitas_Perendaman_24_Jam	57386.918	8				
	ITS_Perendaman_24_Jam	35702.244	8				
	DD	.005	8				

a. R Squared = .200 (Adjusted R Squared = -.067)

b. R Squared = .188 (Adjusted R Squared = -.082)

c. R Squared = .200 (Adjusted R Squared = -.067)

Lanjutan Lampiran 20 Analisis Statistik *One-Way MANOVA*

- d. R Squared = .201 (Adjusted R Squared = -.066)
- e. R Squared = .931 (Adjusted R Squared = .908)
- g. R Squared = .936 (Adjusted R Squared = .915)
- h. R Squared = .894 (Adjusted R Squared = .859)
- i. R Squared = .609 (Adjusted R Squared = .479)
- j. R Squared = .884 (Adjusted R Squared = .845)
- k. R Squared = .903 (Adjusted R Squared = .871)