

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH BERBAGAI METODE PENCAMPURAN TERHADAP KARAKTERISTIK DAN UMUR LAYAN PERKERASAN *STONE MATRIX ASPHALT* (SMA) BERFILLER *FLY ASH* BATU BARA (*ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VARIOUS MIXING METHODS ON THE CHARACTERISTICS AND SERVICE LIFE OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) PAVEMENT WITH COAL FLY ASH FILLER PAVEMENT*)

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



**Saphira Ashya Aulia
22511223**

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

TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH BERBAGAI METODE PENCAMPURAN TERHADAP KARAKTERISTIK DAN UMUR LAYAN PERKERASAN *STONE MATRIX ASPHALT* (SMA) BERFILLER *FLY ASH* BATU BARA (*ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF VARIOUS MIXING METHODS ON THE CHARACTERISTICS AND SERVICE LIFE OF STONE MATRIX ASPHALT (SMA) PAVEMENT WITH COAL FLY ASH FILLER PAVEMENT*)

Disusun Oleh

Saphira Ashya Aulia
22511223

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

Diuji pada tanggal 11 Mei 2026

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Penguji I

Penguji II

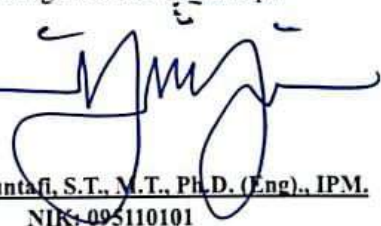

Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK: 215111307


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


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 di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 20 Mei 2026

Yang membuat pernyataan,



Saphira Ashya Aulia
(22511223)

DEDIKASI

Alhamdulillahil rabbil ‘alamin

“Pertama-tama dengan penuh rasa syukur dan kebahagiaan, saya panjatkan puji syukur kehadirat ALLAH SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya.

Selanjutnya, ucapan terima kasih sebesar-besarnya juga saya sampaikan kepada Umi dan Ayah, Mbak dan Adek, keluarga besar, serta orang-orang tercinta.

Terima kasih telah hadir, mendukung, dan menemani setiap proses dalam perjalanan ini. I am truly grateful to have all off you in my life, and I love you All. “

KATA PENGANTAR

Assalamu‘alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul *Analisis Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan Stone Matrix Asphalt (SMA) Berfiller Fly Ash Batu Bara*. Laporan ini merupakan salah satu persyaratan akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Selama proses penyusunan laporan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa laporan ini tidak mungkin dapat terselesaikan tanpa adanya bimbingan, saran, kritik, serta dorongan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, berkaitan dengan hal tersebut, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang dengan penuh kesabaran dan ketulusan senantiasa membimbing, memberikan arahan, serta masukan berharga kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir ini, sehingga penulis dapat melewati setiap tahapan prosesnya dengan baik hingga akhirnya dapat terselesaikan.
2. Ibu Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji I dalam Sidang Tugas Akhir, yang telah banyak memberikan saran, kritikan dan masukan kepada penulis untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Penguji II dalam Sidang Tugas Akhir, yang telah banyak memberikan saran, kritikan dan masukan kepada penulis untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

5. Bapak Sukamto dan Mas Giri Widhiatmoko, S.T., M.T., selaku Laboran Laboratorium Jalan Raya yang telah banyak membantu penulis selama proses penelitian di Laboratorium.
6. Bapak Lili Syafri, S.T., M.Si. dan Ibu Prasetyawati, S.K.M., selaku kedua orang tua penulis, yang doa-doanya tidak pernah terputus, yang selalu menguatkan di setiap keadaan, serta memberikan kasih sayang dan pengorbanan yang tak ternilai. Terima kasih karena selalu menjadi tempat pulang, sumber kekuatan, dan alasan terbesar penulis untuk terus berjuang hingga detik ini.
7. Nisya Listy Kartika dan Afiqa Listy Hafizah, selaku kedua adik kandung penulis, yang selalu memberikan dukungan dan semangat, serta menjadi sumber motivasi bagi penulis.
8. Vania Nabila Damayanti, selaku partner penelitian penulis, yang sejak awal hingga akhir selalu menemani proses ini sebagai teman berdiskusi dan berbagi pemikiran. Terima kasih atas kerja sama, dukungan, serta kebersamaan yang membuat setiap tahapannya terasa lebih ringan untuk dijalani.
9. Liyen Putri Lestari dan Lushyva Firatri Kurnia Dewi, selaku sahabat-sahabat penulis sejak awal masa perkuliahan hingga saat ini, yang tidak hanya senantiasa memberikan dukungan dan semangat, tetapi juga setia menemani setiap proses yang dilalui penulis dalam keadaan suka maupun duka. Setiap kebersamaan, canda tawa, serta ketulusan yang telah diberikan akan selalu menjadi kenangan berharga yang akan selalu melekat dalam perjalanan ini.
10. Teruntuk pemilik NRP 04020889, terima kasih karena selalu menemani, mendengarkan, dan memberikan dukungan kepada penulis. *Your presence made everything feel a little lighter.*
11. Semua pihak yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini, yang mungkin tidak dapat disebutkan satu per satu. Terima kasih atas bantuan, dukungan, dan doa yang diberikan.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna dan masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat

mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai bahan perbaikan di waktu yang akan datang. Penulis juga berharap laporan ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi para pihak yang membacanya.

Wassalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh

Yogyakarta, 20 Mei 2026
Penulis,

Saphira Ashya Aulia
22511223

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xxii
ABSTRAK	xxvi
<i>ABSTRACT</i>	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II STUDI PUSTAKA	8
2.1 Kinerja Perkerasan <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	8
2.2 Kinerja Perkerasan Aspal Berfiller FA Batu Bara	9
2.3 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Kinerja Perkerasan Aspal	12
2.4 Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan dengan <i>Software KENPAVE</i>	13
2.5 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini	15
BAB III LANDASAN TEORI	20
3.1 Perkerasan Lentur	20
3.2 Struktur Lapisan Perkerasan Lentur	20

3.3	Bahan Penyusun Perkerasan Lentur	22
3.3.1	Aspal	22
3.3.2	Agregat	23
3.3.3	Gradasi Agregat	25
3.3.4	Bahan Aditif	26
3.4	Campuran SMA	27
3.5	<i>Fly Ash</i>	28
3.6	Metode Pencampuran Perkerasan	29
3.6.1	Metode Pencampuran Konvensional	29
3.6.2	Metode Pencampuran Dua Tahap	30
3.6.3	Metode Pencampuran Tiga Tahap	30
3.7	Tinjauan Karakteristik Volumetrik Campuran SMA	31
3.7.1	<i>Voids In Total Mix</i> (VITM)	31
3.7.2	<i>Voids Filled With Asphalt</i> (VFWA)	32
3.7.3	<i>Voids in Mineral Agregate</i> (VMA)	33
3.7.4	Kepadatan (<i>Density</i>)	33
3.8	Tinjauan Kekuatan Pada Campuran SMA	34
3.8.1	Stabilitas (<i>Stability</i>)	34
3.8.2	Kelelehan (<i>Flow</i>)	35
3.8.3	<i>Marshall Quotient</i> (MQ)	35
3.8.4	<i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS)	36
3.8.5	<i>Cantabro Loss</i> (CL)	36
3.9	Tinjauan Durabilitas Pada Campuran SMA	37
3.9.1	<i>Index of Retained Strength</i> (IRS)	37
3.9.2	<i>Tensile Strength Ratio</i> (TSR)	37
3.9.3	<i>Draindown</i> (DD)	38
3.10	Modulus Kekakuan (<i>Stiffness Modulus</i>)	38
3.10.1	<i>Stiffness Modulus of Bitumen</i> (Sbit)	39
3.10.1	<i>Stiffness Modulus of Mixture</i> (Smix)	40
3.11	Analisis Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan	40
3.11.1	Perencanaan Desain Tebal Perkerasan	40

3.11.2 Analisis Respons Struktur Perkerasan Menggunakan <i>Software</i> KENPAVE	57
3.11.3 Analisis Tingkat Kerusakan dan Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan	74
3.12 Analisis Statistik	77
BAB IV METODE PENELITIAN	80
4.1 Metode Penelitian	80
4.2 Metode Pengambilan Sampel	80
4.3 Metode Pengumpulan Data	80
4.3.1 Pengumpulan Data Sekunder	81
4.3.2 Pengumpulan Data Primer	81
4.4 Tahapan Penelitian	82
4.4.1 Pengumpulan Data Sekunder	82
4.4.2 Penentuan Jumlah Benda Uji	89
4.4.3 Penentuan Proporsi Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara	89
4.4.4 Pembuatan Benda Uji	90
4.4.5 Pengujian <i>Marshall Standard</i> (MS)	92
4.4.6 Pengujian <i>Index of Retained Strength</i> (IRS)	93
4.4.7 Pengujian <i>Indirect Tensile Strenght</i> (ITS)	93
4.4.8 Pengujian <i>Tensile Strenght Ratio</i> (TSR)	94
4.4.9 Pengujian <i>Cantabro Loss</i> (CL)	94
4.4.10 Pengujian <i>Draindown</i> (DD)	94
4.5 Analisis Data Pengujian	95
4.5.1 Analisis Parameter Volumetrik Campuran SMA	95
4.5.2 Analisis Parameter Kekuatan Campuran SMA	95
4.5.3 Analisis Parameter Durabilitas Campuran SMA	96
4.5.4 Analisis <i>Stiffness Modulus</i>	96
4.6 Tahapan Analisis Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan	96
4.6.1 Tahapan Perencanaan Desain Tebal Perkerasan Metode MDPJ 2024	96

4.6.2	Analisis Hasil Desain Perkerasan Menggunakan <i>Software</i> KENPAVE	97
4.6.3	Menghitung Tingkat Kerusakan dan Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan	99
4.7	Analisis Statistik <i>One-Way</i> MANOVA	99
4.8	Bagan Alir Penelitian	101
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		103
5.1	Hasil Penelitian	103
5.1.1	Hasil Pengujian Karakteristik Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap	103
5.1.2	Hasil Analisis Nilai <i>Stiffness Modulus</i> Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	104
5.1.3	Hasil Analisis Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	104
5.1.4	Hasil Analisis Statistik <i>One-Way</i> MANOVA Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Campuran	106
5.2	Pembahasan	108
5.2.1	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Parameter Volumetrik pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	108
5.2.2	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Parameter Kekuatan pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	115
5.2.3	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Parameter Durabilitas pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	123

5.2.4	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik <i>Stiffness Modulus</i> pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	130
5.2.5	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Perkiraan Umur Pelayanan pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	132
5.2.6	Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Keseluruhan Parameter Pengujian pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	136
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		142
6.1	Kesimpulan	142
6.2	Saran	143
DAFTAR PUSTAKA		144
LAMPIRAN		151

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini Bagian 1	16
Tabel 2. 2	Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini Bagian 2	18
Tabel 3. 1	Persyaratan Aspal Pen 60/70	23
Tabel 3. 2	Persyaratan Agregat Kasar	24
Tabel 3. 3	Persyaratan Agregat Halus	25
Tabel 3. 4	Gradasi Agregat Gabungan untuk Campuran SMA	26
Tabel 3. 5	Persyaratan <i>Stabilizer</i> untuk Campuran SMA	27
Tabel 3. 6	Ketentuan Sifat-sifat Campuran SMA	28
Tabel 3. 7	Umur Rencana Perkerasan	41
Tabel 3. 8	Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan	42
Tabel 3. 9	Faktor Laju Petumbuhan Lalu Lintas, i (%)	44
Tabel 3. 10	Faktor Distribusi Lajur (DL)	45
Tabel 3. 11	Faktor Ekuivalen Beban Wilayah Jambi	46
Tabel 3. 12	Pemilihan Jenis Perkerasan	47
Tabel 3. 13	Bagan Desain-3(1) Desain Perkerasan Lentur dengan 150 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	49
Tabel 3. 14	Bagan Desain-3(2) Desain Perkerasan Lentur dengan 200 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	50
Tabel 3. 15	Bagan Desain-3(3) Desain Perkerasan Lentur dengan 250 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	51
Tabel 3. 16	Bagan Desain-3(4) Desain Perkerasan Lentur dengan 300 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	52
Tabel 3. 17	Bagan Desain-3A Desain Perkerasan Lentur – Aspal dengan Lapis Fondasi Agregat (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	53
Tabel 3. 18	Bagan Desain-3B Penyesuaian Tebal Lapis Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilitas Semen (Hanya	

untuk Bagan Desain-3A) Beban Rencana 20 Tahun > 5 Juta ESA 5	54
Tabel 3. 19 Bagan Desain-4 Desain Perkerasan Lentur dengan HRS	54
Tabel 3. 20 Bagan Desain-5 Perkerasan Berbutir dengan Laburan	55
Tabel 3. 21 Bagan Desain-6 Perkerasan dengan Stabilisasi Tanah Semen (<i>Soil Cement</i>)	55
Tabel 3. 22 Bagan Desain-7 Perkerasan dengan <i>Improve Subgrade</i> Stabilisasi Semen	56
Tabel 3. 23 Satuan <i>English</i> dan SI	61
Tabel 3. 24 Nilai <i>Poisson's Ratio</i>	63
Tabel 3. 25 Nilai Modulus Elastisitas	65
Tabel 3. 26 Waktu Bawaan (<i>Default</i>)	70
Tabel 4. 1 Karakteristik Aspal Pen 60/70	82
Tabel 4. 2 Karakteristik Agregat Kasar	83
Tabel 4. 3 Karakteristik Agregat Halus	83
Tabel 4. 4 Karakteristik <i>Filler</i>	83
Tabel 4. 5 Rencana Gradasi Agregat Campuran SMA 25 mm	84
Tabel 4. 6 Karakteristik Volumetrik Campuran SMA Ber <i>filler</i> FA batu bara 50% melalui Metode Pencampuran Konvensional	86
Tabel 4. 7 Karakteristik Kekuatan Campuran SMA Ber <i>filler</i> FA batu bara 50% melalui Metode Pencampuran Konvensional	87
Tabel 4. 8 Karakteristik Durabilitas Campuran SMA Ber <i>filler</i> FA batu bara 50% melalui Metode Pencampuran Konvensional	87
Tabel 4. 9 Data LHR Ruas Jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun - Pauh	88
Tabel 4. 10 Jumlah Benda Uji untuk Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga tahap	89
Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Karakteristik Volumetrik Campuran SMA Ber <i>filler</i> FA Batu Bara 50% Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap	103

Tabel 5. 2	Hasil Pengujian Karakteristik Kekuatan Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap	103
Tabel 5. 3	Hasil Pengujian Karakteristik Durabilitas Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap	104
Tabel 5. 4	Rekapitulasi Nilai <i>Stiffness Modulus</i> Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	104
Tabel 5. 5	Rekapitulasi Hasil Analisis Nilai Repetisi Beban Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	106
Tabel 5. 6	Rekapitulasi Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	106
Tabel 5. 7	Rekapitulasi Hasil Analisis Statistik <i>One-Way</i> MANOVA Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Volumetrik Campuran	107
Tabel 5. 8	Rekapitulasi Hasil Analisis Statistik <i>One-Way</i> MANOVA Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Kekuatan Campuran	107
Tabel 5. 9	Rekapitulasi Hasil Analisis Statistik <i>One-Way</i> MANOVA Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Durabilitas Campuran	107
Tabel 5. 10	Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Parameter Volumetrik pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	136
Tabel 5. 11	Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Parameter Kekuatan pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	136

Tabel 5. 12	Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Parameter Durabilitas pada Campuran SMA Ber <i>filler</i> FA Batu Bara 50%	137
Tabel 5. 13	Perbandingan Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan SMA Ber <i>filler</i> FA Batu Bara 50%	138

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1	Struktur Lapisan perkerasan Lentur	22
Gambar 3. 2	Ilustrasi Tahapan Metode Pencampuran Konvensional	29
Gambar 3. 3	Ilustrasi Tahapan Metode Pencampuran Dua Tahap	30
Gambar 3. 4	Ilustrasi Tahapan Metode Pencampuran Tiga Tahap	31
Gambar 3. 5	Tampilan Awal <i>Software KENPAVE</i>	57
Gambar 3. 6	Tampilan Awal <i>LAYERINP</i>	58
Gambar 3. 7	Tampilan Menu <i>File</i>	59
Gambar 3. 8	Tampilan Menu <i>General</i>	60
Gambar 3. 9	Tampilan Menu <i>Zcoord</i>	62
Gambar 3. 10	Tampilan Menu <i>Layer</i>	62
Gambar 3. 11	Tampilan Menu <i>Interface</i>	64
Gambar 3. 12	Tampilan Menu <i>Moduli</i>	64
Gambar 3. 13	Tampilan Menu <i>Period</i>	65
Gambar 3. 14	Tampilan Menu <i>Load</i>	66
Gambar 3. 15	Konfigurasi Sumbu Standar	67
Gambar 3. 16	<i>Plan View of Multiple Wheels</i>	68
Gambar 3. 17	Tampilan Awal Menu <i>Viscoelastic</i>	69
Gambar 3. 18	Tampilan Menu <i>General Viscoelastic</i>	69
Gambar 3. 19	Tampilan Menu <i>Time Viscoelastic</i>	71
Gambar 3. 20	Tampilan Menu <i>Layer Viscoelastic</i>	72
Gambar 3. 21	Tampilan Menu <i>Creep</i>	73
Gambar 3. 22	Tampilan Menu <i>Temperature</i>	74
Gambar 4. 1	Grafik Gradasi Rencana Campuran SMA 25 mm	84
Gambar 4. 2	Grafik Penentuan Nilai KAO	85
Gambar 4. 3	Peta Lokasi Studi KasSus	88
Gambar 4. 4	Bagan Alir Penelitian	102
Gambar 5. 1	Ilustrasi Kedalaman Titik Tinjauan Kerusakan	105

Gambar 5. 2	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VITM pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	108
Gambar 5. 3	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VFWA pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	110
Gambar 5. 4	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VMA pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	112
Gambar 5. 5	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai <i>Density</i> pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	113
Gambar 5. 6	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai Stabilitas pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	115
Gambar 5. 7	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai <i>Flow</i> pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	117
Gambar 5. 8	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai MQ pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	119
Gambar 5. 9	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai ITS pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	120
Gambar 5. 10	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai CL pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	122
Gambar 5. 11	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai IRS pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	124
Gambar 5. 12	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai TSR pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	127
Gambar 5. 13	Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai DD pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	128
Gambar 5. 14	Grafik Perbandingan Nilai Smix Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	131
Gambar 5. 15	Perbandingan Nilai Repetisi Beban Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%	133

Gambar 5. 16 Perbandingan Umur Pelayanan Perkerasan Berdasarkan
Berbagai Metode Pencampuran pada Campuran SMA
Berfiller FA Batu Bara 50%

134

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Hasil Pengujian <i>Marshall Standard</i> Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	152
Lampiran 2	Grafik Hasil Pengujian <i>Marshall Standard</i> Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	153
Lampiran 3	Hasil Pengujian <i>Index of Retained Strength</i> (IRS) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	154
Lampiran 4	Grafik Hasil Pengujian <i>Index of Retained Strength</i> (IRS) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	155
Lampiran 5	Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS) 0,5 Jam Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	156
Lampiran 6	Hasil Pengujian <i>Indirect Tensile Strength</i> (ITS) 24 Jam Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	157
Lampiran 7	Grafik Hasil <i>Tensile Strength Ratio</i> (TSR) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	158
Lampiran 8	Hasil Pengujian <i>Cantabro Loss</i> (CL) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	159
Lampiran 9	Grafik Hasil Pengujian <i>Cantabro Loss</i> (CL) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	160
Lampiran 10	Hasil Pengujian <i>Draindown</i> (DD) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	161
Lampiran 11	Grafik Hasil Pengujian <i>Draindown</i> (DD) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	162
Lampiran 12	Hasil Analisis Nilai <i>Stiffness Modulus</i> Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran	163
Lampiran 13	Data Lalu Lintas Harian Rata-rata Ruas Jalan Batas Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh Provinsi Jambi Tahun 2024	164

Lampiran 14	Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas Berdasarkan Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Wilayah Kab. Sarolangun Provinsi Jambi Tahun 2022 - 2025	165
Lampiran 15	Hasil Analisis Perhitungan Nilai CESA 4 dan CESA 5 Berdasarkan Data LHR Ruas Jalan Batas Kab. Batanghari/ Kab. Sarolangun – Pauh Provinsi Jambi Tahun 2024	166
Lampiran 16	Hasil Desain Tebal Perkerasan Beserta Data Properties Material Lapis Perkerasan	168
Lampiran 17	<i>Output</i> KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional	169
Lampiran 18	<i>Output</i> KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap	178
Lampiran 19	<i>Output</i> KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap	187
Lampiran 20	Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Konvensional	196
Lampiran 21	Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Dua Tahap	198
Lampiran 22	Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Tiga Tahap	200
Lampiran 23	Hasil Analisis Statistik <i>One-Way</i> MANOVA	202

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	= Berat akhir piring penampung (gr)
a	= Persentase aspal terhadap batuan (%)
Ao	= Konstanta
AC-Base	= <i>Asphalt Concrete-Base Course</i>
AC-BC	= <i>Asphalt Concrete-Binder Course</i>
AC-WC	= <i>Asphalt Concrete-Wearing Course</i>
AFD	= <i>Asphalt Flow Down</i>
Al ₂ O ₃	= Alumina
B	= Berat awal piring penampung (gr)
b	= Persentase aspal terhadap campuran (%)
BPJN	= Balai Pelaksanaan Jalan Nasional
BPS	= Badan Pusat Statistik
C	= Berat awal jumlah campuran yang diuji (gr)
c	= Berat benda uji sebelum direndam (gr)
CP	= <i>Contact Pressure</i>
CR	= <i>Contact Radius</i>
CESAL	= <i>Cumulative Equivalent Standard Axle Load</i>
CL	= <i>Cantabro Loss</i>
CTB	= <i>Cement Treated Base</i>
d	= Berat benda uji dalam keadaan jenuh atau SSD (gr)
DD	= <i>Draindown</i>
DL	= Faktor distribusi lajur (%)
DUR	= <i>Load Duration</i>
D (t)	= <i>Creep compliances</i> (kPa)
E	= Modulus Elastisitas (kPa)
e	= Berat dalam air (gr) / konstanta e
ESA	= <i>Equivalent Standard Axle</i>

ESA5	= <i>Equivalent Standard Axle</i> – Pangkat 5
ESAL	= <i>Equivalent Single Axle Load</i>
f	= Volume / isi (cm ³)
FA	= <i>Fly Ash</i>
Fe ₂ O ₃	= Feri Oksida
g	= Berat isi sampel (gr/cc)
h	= Tinggi sampel (cm)
HRS-WC	= <i>Hot Rollet Sheet-Wearing Course</i>
i	= Laju pertumbuhan lalu lintas tahunan (%)
IRS	= <i>Index of Retained Strength</i>
ITS	= <i>Indirect Tensile Strength</i>
KAO	= Kadar Aspal Optimum
l	= Nilai VMA (%)
LFA	= Lapis Fondasi Agregat
LHR	= Lalu Lintas Harian Rata-rata (kend/hari)
LHR _{JK}	= Lalu Lintas harian rata – rata tiap jenis kendaraan niaga (kend/hari)
LHRT	= Lalu Lintas Harian Rata-rata Tahunan
m	= Nilai VFWA (%)
MANOVA	= <i>Multivariate Analysis of Variance</i>
MDPJ	= Manual Desain Perkerasan Jalan
MI	= <i>Marshall Immersion</i>
Mi	= Berat setelah diabrasi (gr)
Mo	= Berat sebelum diabrasi (gr)
MQ	= <i>Marshall Quotient</i>
n	= Nilai VITM (%)
Nd	= Jumlah siklus beban yang diizinkan hingga terjadi deformasi permanen (ESAL)
Nf	= Jumlah siklus beban yang diizinkan hingga terjadi retak lelah (ESAL)

Nr	= Jumlah siklus beban yang diizinkan hingga terjadi retak alur (ESAL)
NPT	= <i>Number of Points</i>
NR	= <i>Number or Repetitions</i>
NVL	= <i>Number of Viscoelastic</i>
NYTME	= <i>Number of Time Duration for Creep Compliances</i>
p	= Pembacaan arloji stabilitas x kalibrasi alat
Pi	= Penetrasi Aspal (mm)
Pir	= <i>Recovered penetration index asphalt</i>
Pr	= <i>Recovered Penetration</i> pada saat suhu 25°C
PR	= <i>Poisson's Ratio</i>
P runtuh	= Beban Puncak (kg)
PLTU	= Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PKJI	= Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia
q	= Stabilitas (kg)
R	= Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif
r	= Nilai <i>flow</i> (mm)
s	= Angka koreksi tebal benda uji
Sbit	= <i>Stiffness Modulus of Bitumen</i>
SiO ₂	= Silika
Smix	= <i>Stiffness Modulus of Mixture</i>
SMA	= <i>Stone Matrix Asphalt</i>
SMAC	= <i>Stone Matrix Asphalt Concrete</i>
SO ₃	= Sulfur Trioksida
Spr	= <i>Recovered Softening Point</i>
S ₁	= Stabilitas <i>Marshall</i> setelah perendaman selama 30 menit (kg)
S ₂	= Stabilitas <i>Marshall</i> setelah perendaman selama 24 jam (kg)
T	= Suhu aspal (°C)
t	= Lama pembebanan (detik)

TH	= <i>Thickness</i> (cm)
TSR	= <i>Tensile Strength Ratio</i>
T ₁	= Nilai ITS setelah perendaman selama 30 menit (kPa)
T ₂	= Nilai ITS setelah perendaman selama 24 jam (kPa)
UR	= Umur rencana (tahun)
V	= Kecepatan pembebanan (km/jam)
VCA	= <i>Voids in Coarse Aggregate</i>
VDF	= <i>Vehicle Damage Faktor</i>
VDF _{JK}	= Faktor ekuivalen beban tiap jenis kendaraan niaga
VFA	= <i>Voids Fillet with Asphalt</i>
VFB	= <i>Voids Filled with Bitumen</i>
VFWA	= <i>Voids in Filled With Asphalt</i>
VIM	= <i>Voids in Mix</i>
VMA	= <i>Voids in Mineral Agregate</i>
VITM	= <i>Voids in Total Mix</i>
WJF	= <i>Waste Jute Fibre</i>
ε _c	= Regangan tekan vertikal di atas lapisan tanah dasar (cm)
ε _t	= Regangan tarik pada bagian bawah lapisan permukaan (cm)

ABSTRAK

Campuran *Stone Matrix Asphalt* (SMA) terus dikembangkan melalui pemanfaatan material alternatif, salah satunya *filler* limbah *Fly Ash* (FA) batu bara, untuk meningkatkan kinerja campuran sekaligus mendukung keberlanjutan. Namun, penelitian Prasetya (2024) menunjukkan bahwa penggunaan metode pencampuran konvensional menyebabkan penurunan kinerja campuran pada setiap variasi kadar FA. Kondisi tersebut diduga akibat distribusi aspal terhadap agregat dan *filler* yang kurang merata sehingga ikatan antar material menjadi kurang optimal. Oleh karena itu, diperlukan inovasi metode pencampuran, seperti metode dua tahap dan tiga tahap, untuk meningkatkan homogenitas campuran dan menghasilkan kinerja perkerasan yang lebih baik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap karakteristik dan umur layan perkerasan SMA ber*filler* FA batu bara.

Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Pembuatan benda uji hanya dilakukan menggunakan metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap, sedangkan metode konvensional mengacu pada penelitian Prasetya (2024). Kadar *filler* FA yang digunakan sebesar 50%. Pengujian yang dilakukan untuk mengevaluasi kinerja campuran terdiri dari MS, IRS, ITS, TSR, DD, dan CL, serta analisis *stiffness modulus* dan perkiraan umur layan perkerasan menggunakan *software* KENPAVE berbasis pemodelan viskoelastik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran SMA dengan metode pencampuran tiga tahap mampu memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan metode dua tahap maupun konvensional. Hal ini terbukti dari kemampuan metode tiga tahap yang menghasilkan distribusi aspal dan agregat yang lebih merata, sehingga ikatan adhesi, stabilitas, serta ketahanan campuran terhadap air dan suhu menjadi lebih baik. Kondisi tersebut juga membuat umur layan perkerasan dengan metode tiga tahap lebih tinggi dibandingkan metode lainnya, dengan jenis kerusakan awal berupa *permanent deformation*.

Kata Kunci: *Fly Ash*, Metode Pencampuran Tiga Tahap, *Stone Matrix Asphalt*, Umur layan

ABSTRACT

The Stone Matrix Asphalt (SMA) mixture continues to be developed through the use of alternative materials, one of which is coal Fly Ash (FA) waste filler, to improve the performance of the mixture while supporting sustainability. However, Prasetya's (2024) research shows that the use of conventional mixing methods causes a decrease in mixture performance at each variation in FA levels. Therefore, it is necessary to innovate mixing methods, such as two-stage and three-stage methods, to improve the homogeneity of the mixture and produce better pavement performance. This study aims to analyze the influence of various mixing methods on the characteristics and service life of high school pavement with coal FA filling.

The research was conducted experimentally in the laboratory with reference to the 2025 General Specification of Bina Marga. The manufacture of test specimens is only carried out using two-stage and three-stage mixing methods, while conventional methods refer to Prasetya's (2024) research. The FA filler content used is 50%. Tests were conducted to evaluate the performance of the mixture consisting of MS, IRS, ITS, TSR, DD, and CL, as well as modulus stiffness analysis and estimated service life of the pavement using KENPAVE software based on viscoelastic modeling.

The results showed that the mixture of high school with the three-stage mixing method was able to provide better performance than the two-stage or conventional methods. This is evident from the ability of the three-stage method which results in a more even distribution of asphalt and aggregate, resulting in better adhesion bonds, stability, and resistance to water and temperature. This condition also makes the service life of pavement with the three-stage method higher than other methods, with the type of initial damage in the form of permanent deformation.

Keywords: *Fly Ash, Three-Stage Mixing Method, Stone Matrix Asphalt, Service life*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Infrastruktur jalan memegang peranan penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan konektivitas antar wilayah. Peningkatan kualitas infrastruktur ini menjadi suatu kebutuhan yang perlu terus ditingkatkan seiring dengan volume lalu lintas yang terus meningkat dan beban kendaraan yang terus bertambah. Kondisi tersebut menuntut adanya perkerasan jalan dengan kinerja yang lebih baik, baik dari segi kekuatan struktural, ketahanan terhadap deformasi, maupun terhadap pengaruh lingkungan sekitar. Oleh karena itu, diperlukan upaya inovasi atau modifikasi terhadap campuran perkerasan untuk meningkatkan kekuatan strukturalnya, ketahanan terhadap kondisi cuaca ekstrem, serta dapat memperpanjang umur layan perkerasan jalan.

Salah satu jenis campuran perkerasan yang terus dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah *Stone Matrix Asphalt* (SMA). Campuran SMA merupakan jenis campuran beraspal yang dianggap memiliki kelebihan dibandingkan dengan jenis campuran beraspal lainnya, diantaranya yaitu ketahanan geser permukaan (*skid resistance*) yang cukup tinggi karena kadar agregat kasarnya yang besar, lebih tahan lama karena kadar aspalnya yang tinggi, serta distabilisasi dengan penambahan serat selulosa (Putri dkk., 2023). Menurut Qubro dkk. (2025), SMA adalah jenis campuran beraspal dengan tingkat stabilitas tinggi yang dirancang khusus untuk menahan dan mendistribusikan beban lalu lintas berat secara efektif. Sementara itu, Arrang dkk. (2025) menjelaskan bahwa agregat kasar yang ada pada kerangka struktural dalam campuran SMA berperan sebagai penahan beban mekanis, sedangkan mortar yang tersusun dari campuran aspal, *filler*, agregat halus, dan *stabilizer* berperan sebagai pengisi rongga antar butiran agregat. Berbagai penelitian mengenai campuran SMA telah banyak dikaji dan dipublikasikan dalam sejumlah jurnal ilmiah, antara lain oleh Syafiqah dkk. (2021), Roni dan Hadi (2025), serta Intari dkk. (2024).

Seiring dengan perkembangan teknologi material, campuran SMA kemudian mulai dimodifikasi dengan memanfaatkan bahan pengisi (*filler*) alternatif. Gunara (2017) dalam Pahlevi dkk. (2024) menyebutkan bahwa batu bara adalah sumber energi terpenting yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar PLTU akan menghasilkan salah satu jenis residu pembakaran berupa limbah *Fly Ash* (FA) dalam jumlah yang cukup banyak, sehingga menyebabkan kebutuhan lokasi sebagai tempat pembuangan limbah tersebut akan terus meningkat. Salah satu upaya berkelanjutan yang dapat dilakukan untuk menangani peningkatan limbah FA ini yaitu dengan cara memanfaatkannya sebagai material *filler* pengganti dalam campuran perkerasan. Limbah FA ini tersusun dari partikel-partikel halus yang dapat memenuhi persyaratan ukuran butiran sebagai *filler* pengganti, yang tidak hanya dapat digunakan untuk menggantikan *filler* konvensional, tetapi juga diharapkan dapat memperbaiki karakteristik campuran perkerasan. Pemanfaatan limbah FA sebagai *filler* pengganti sudah banyak digunakan di dalam beberapa penelitian, seperti Jaya dkk. (2021) pada campuran aspal beton porus, Wenur dkk. (2023) pada campuran laston HRS-WC, Archenita dkk. (2023) pada campuran AC-Base, Basri dkk. (2024) pada campuran laston AC-WC, dan Prasetya (2024) pada campuran SMA.

Namun, temuan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Prasetya (2024), mengungkapkan bahwa pengaplikasian FA sebagai substitusi *filler* pada campuran SMA menghasilkan karakteristik campuran yang semakin menurun disetiap variasi kadarnya, namun masih memenuhi standar spesifikasi teknis yang berlaku. Akan tetapi, penurunan karakteristik campuran ini menjadi perhatian karena dapat mempengaruhi kinerja perkerasan. Selain dipengaruhi oleh sifat fisik *filler*, penurunan ini juga diduga disebabkan oleh distribusi *filler* yang kurang merata, karena penggunaan metode pencampuran konvensional yang dilakukan dengan menggabungkan seluruh bahan penyusun campuran seperti agregat, aspal, dan *filler* secara sekaligus dalam satu tahap pencampuran. Oleh karena itu, dibutuhkan perbandingan karakteristik campuran SMA ber*filler* FA batu bara dengan metode pencampuran yang berbeda.

Salah satu metode pencampuran yang diperkenalkan sebagai solusi inovatif yaitu metode pencampuran bertahap, meliputi metode pencampuran dua tahap dan metode pencampuran tiga tahap. Metode ini dapat meningkatkan homogenitas campuran, karena proses pencampuran dilakukan secara bertahap, sehingga distribusi bahan lebih merata dan daya tahan campuran semakin meningkat. Menurut Yaro dkk. (2021), metode pencampuran bertahap menunjukkan karakteristik optimal, meliputi *draindown* yang lebih baik, rongga udara yang ideal, serta stabilitas *Marshall* yang lebih tinggi. Selain itu, ditinjau dari sifat mekanik, metode pencampuran bertahap terbukti memberikan ketahanan kelembaban dan modulus kekakuan yang lebih baik, serta nilai *cantabro loss* yang lebih rendah. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian Prasetya (2024) yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap karakteristik campuran SMA berfiller FA batu bara.

Selain itu, penelitian ini juga akan dilanjutkan dengan analisis perkiraan umur pelayanan perkerasan berdasarkan variasi metode pencampuran yang digunakan. Salah satu cara untuk melakukan analisis ini yaitu dengan menggunakan bantuan *software* KENPAVE berbasis pemodelan viskoelastik yang dikembangkan oleh Huang (2004), melalui program KENLAYER dengan keluarannya berupa nilai tegangan dan regangan dari suatu perkerasan lentur (*flexible pavement*) akibat beban lalu lintas berulang. Nilai tegangan dan regangan tersebut selanjutnya akan digunakan sebagai dasar untuk memperkirakan kemampuan perkerasan dalam menahan berbagai kerusakan, seperti *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent deformation*, sehingga umur pelayanan perkerasan dapat diperkirakan (Hadi dan Fauziah, 2022). Adapun penggunaan *software* KENPAVE ini telah banyak digunakan dalam beberapa penelitian yaitu Rahmawati dan Adiyasa (2021), Hadi dan Fauziah (2022), Tolab dan Fauziah (2024), serta Arianto dan Fauziah (2024). Dengan demikian, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi metode pencampuran yang paling optimal untuk meningkatkan kinerja campuran perkerasan SMA maupun campuran beraspal lainnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan dari latar belakang di atas, adapun rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap parameter volumetrik pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti?
2. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap parameter kekuatan pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti?
3. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap parameter durabilitas pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti?
4. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap karakteristik *Stiffness Modulus* pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti?
5. Bagaimana pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap perkiraan umur pelayanan pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, adapun tujuan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap parameter volumetrik pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti.
2. Mengetahui pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap parameter kekuatan⁺ pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti.
3. Mengetahui pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap parameter durabilitas pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti.

4. Mengetahui pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap karakteristik *Stiffness Modulus* pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti.
5. Mengetahui pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap perkiraan umur pelayanan pada campuran SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan pengetahuan dan pemahaman mengenai hasil analisis pengaruh dari metode pencampuran konvensional dan bertahap (dua tahap, tiga tahap) terhadap karakteristik campuran serta perkiraan umur pelayanan perkerasan SMA dengan pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* pengganti. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi praktisi konstruksi jalan dalam menentukan metode pencampuran yang paling optimal untuk produksi campuran SMA atau campuran perkerasan aspal lainnya, sehingga dapat mendukung efisiensi biaya, keberlanjutan material, serta peningkatan kinerja perkerasan jalan.

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Campuran yang diteliti adalah SMA 25 mm.
2. Bahan pengikat yang digunakan yaitu aspal penetrasi 60/70 dan tidak meninjau reaksi kimianya.
3. Agregat kasar dan agregat halus yang digunakan berasal dari Clereng, Kulon Progo, Yogyakarta dan telah disediakan oleh Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
4. Bahan pengisi (*filler*) pengganti menggunakan limbah FA batu bara yang diperoleh dari salah satu PLTU di Indonesia, yang sama dengan sumber material *filler* pada penelitian Prasetya (2024).
5. Tidak melakukan pengujian untuk mengetahui unsur mineral dari FA batu bara.

6. Kadar FA batu bara yang digunakan dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 50%. Pemilihan kadar tersebut didasarkan pada posisinya sebagai titik tengah dari variasi kadar yang telah diteliti sebelumnya oleh Prasetya (2024), sehingga dianggap paling representatif dalam menggambarkan perubahan karakteristik campuran tanpa dipengaruhi oleh kondisi yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi (ekstrem).
7. Penelitian ini tidak melakukan pengujian untuk mencari nilai Kadar Aspal Optimum (KAO), karena nilai KAO yang akan digunakan mengacu pada nilai KAO dari hasil penelitian Prasetya (2024), yaitu sebesar 6,4%.
8. Penelitian ini menggunakan serat selulosa Viatop⁶⁶ dan tidak melakukan pengujian untuk mengetahui kandungan kimianya.
9. Metode pencampuran yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode pencampuran konvensional, dua tahap dan tiga tahap. Khusus metode pencampuran konvensional mengacu pada hasil penelitian Prasetya (2024).
10. Tinjauan karakteristik volumetrik campuran SMA didasarkan pada nilai *Voids in Mineral Aggregate* (VMA), *Voids in Filled With Asphalt* (VFWA), *Voids in Total Mix* (VITM), dan *density*.
11. Tinjauan kekuatan campuran SMA didasarkan pada nilai stabilitas, *flow*, *Marshall Quotient* (MQ), *Cantabro Loss* (CL) dan *Indirect Tensile Strength* (ITS).
12. Tinjauan durabilitas campuran SMA didasarkan pada nilai *Index of Retained Strength* (IRS), *Tensile Strength Ratio* (TSR), dan *draindown* (DD).
13. Prosedur dan pengujian dalam penelitian ini mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025.
14. Desain tebal perkerasan jalan dalam penelitian ini mengacu pada Manual Desain Perkerasan Jalan 2024.
15. Analisis perkiraan umur pelayanan perkerasan dilakukan menggunakan bantuan *software* KENPAVE berbasis pemodelan viskoelastik.
16. Data Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data LHR tahun 2024 pada ruas jalan Bts. Kab.

Batanghari/Kab. Sarolangun-Pauh, yang diperoleh dari Balai Pelaksanaan Jalan Nasional (BPJN) Jambi.

17. Penentuan faktor pertumbuhan lalu lintas (i) dilakukan berdasarkan data jumlah kendaraan yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) wilayah Kab. Sarolangun, Provinsi Jambi Tahun 2022 – 2025.
18. Pengujian dalam penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Kinerja Perkerasan *Stone Matrix Asphalt (SMA)*

Penggunaan campuran SMA dimulai di Jerman pada Tahun 1970-an dengan tujuan untuk memberikan perlindungan terbaik dari jejak roda (*rutting*) yang ditimbulkan oleh ban berpaku (*studded tires*) di jalan-jalan eropa. Meskipun ban berpaku ini telah dilarang, ternyata campuran SMA masih tetap unggul karena memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap deformasi yang disebabkan oleh lalu lintas truk berat yang melintas, serta sangat efektif dalam melawan keausan. Hal ini menjadikan campuran tersebut sebagai standar baru untuk permukaan jalan yang tahan lama dan berkinerja tinggi (Syafiqah dkk., 2021).

Menurut Roni dan Hadi (2025), campuran SMA merupakan jenis campuran aspal yang bergradasi senjang (*gap-graded*) yang tersusun dari agregat kasar, agregat halus, bahan pengisi (*filler*), serta bahan tambahan (*additivites*). Bahan penyusun campuran ini dirancang sedemikian rupa agar agregat kasar dapat membentuk kerangka utama yang saling mengunci, sedangkan rongga diantara agregat akan di isi oleh aspal, *filler*, dan bahan tambahan seperti serat selulosa atau polimer. Hal tersebut bertujuan untuk menciptakan kestabilan serta daya tahan tinggi pada campuran SMA. Selain itu juga terdapat beberapa keuntungan dari campuran SMA yaitu umur layan yang tinggi, stabilitas tinggi terhadap pengaruh suhu ekstrem, ketahanan yang unggul terhadap deformasi permanen akibat beban lalu lintas berulang, serta kemampuan memberikan nilai ketahanan geser permukaan (*skid resistance*) yang baik.

Hariyadi dan Hadiastari (2022) dalam Intari dkk. (2024) juga menjelaskan bahwa rongga antar agregat pada campuran SMA yang diisi dengan kombinasi aspal dan *filler*, memiliki kadar aspal yang relatif tinggi dibandingkan dengan campuran aspal konvensional. Kandungan aspal yang tinggi tersebut tidak hanya berfungsi sebagai pengikat yang memperkuat ikatan antar agregat saja, melainkan juga untuk meningkatkan fleksibilitas campuran. Fleksibilitas ini memungkinkan

campuran perkerasan SMA untuk menyerap regangan akibat beban kendaraan berulang, sehingga mengurangi potensi terjadinya retak lelah (*fatigue cracking*). Akan tetapi, perlu diperhatikan bahwa kandungan aspal yang cukup tinggi pada campuran SMA juga dapat menyebabkan campuran menjadi lebih rentan untuk mengalami *binder drainage* atau keluarnya aspal saat proses pemadatan pada suhu tinggi. Oleh karena itu, Ahmed dan Ismael (2025) menegaskan bahwa campuran SMA juga perlu ditambahkan bahan penstabil yang mampu menahan aspal agar tetap berada di dalam campuran. Selain itu, penggunaan bahan penstabil yang berasal dari serat alami, seperti *Waste Jute Fibre* (WJF) atau limbah serat goni yang mereka teliti juga dinilai bermanfaat karena dapat meningkatkan sifat mekanis campuran sekaligus mendukung kinerja perkerasan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2.2 Kinerja Perkerasan Aspal Berfiller FA Batu Bara

Prasetya (2024) melakukan penelitian tentang pemanfaatan limbah FA batu bara sebagai *filler* pengganti pada campuran SMA. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh limbah tersebut terhadap karakteristik kekuatan struktur, volumetrik, dan durabilitas dari campuran SMA. Penelitian ini diawali dengan penentuan nilai KAO berdasarkan parameter stabilitas, *flow*, VITM, VMA, VCA, MQ, DD, dan IRS. Setelah itu dilanjutkan dengan melakukan pengujian benda uji dengan variasi substitusi *filler* FA sebesar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Pengujian tersebut meliputi *Marshall Standard*, IRS, ITS, TSR, VCA, CL, dan DD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada parameter kekuatan struktur yang berdasarkan nilai stabilitas, MQ, dan ITS mengalami penurunan nilai dari kadar 0% hingga 100%. Walaupun mengalami penurunan, hasil pengujian tersebut masih memenuhi standar Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Sementara itu, untuk nilai *flow* justru mengalami peningkatan. Selain itu, pada parameter durabilitas melalui nilai IRS, CL, DD, dan TSR menunjukkan stabilitas yang baik dan efektif untuk mencegah terjadinya permasalahan yang dapat disebabkan oleh pengaliran aspal saat campuran belum dipadatkan.

Archenita dkk. (2023) melakukan penelitian tentang analisis kinerja daya tahan lapisan AC-Base yang menggunakan FA batu bara sebagai pengganti bahan pengisi (*filler*). Penelitian ini menggunakan substitusi *filler* dengan variasi kadar FA yaitu 0%, 5%, 7,5%, 10%, 12,5%, dan 15%. FA batu bara dipilih karena termasuk dalam kategori limbah industri yang memiliki potensi sangat tinggi untuk digunakan dalam konstruksi jalan, terutama didukung oleh ukuran partikelnya yang sangat halus dan sifat yang mirip dengan abu batu yang biasanya digunakan sebagai *filler* dalam campuran aspal. Pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan sampel terlebih dahulu untuk menentukan nilai KAO dari setiap variasi kadar FA melalui pengujian dengan metode *Marshall*. Sementara itu, untuk mengetahui kinerja campuran AC-Base akan menggunakan metode *Marshall Immersion (MI)*, dengan perendaman selama 24 jam dan 48 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai KAO pada variasi FA 0% adalah 6,82%, pada variasi FA 5% adalah 6,87%, pada variasi FA 7,5% adalah 6,85%, pada variasi FA 10% adalah 6,84%, pada variasi FA 12,5% adalah 6,82%, dan pada variasi FA 15% adalah 6,79%. Sedangkan kinerja campuran AC-Base yang ditinjau dari nilai MI, semuanya memenuhi spesifikasi teknis revisi 2 tahun 2018 bagian 6, dimana nilai MI yang diperoleh cenderung meningkat seiring dengan peningkatan persentase FA. Campuran yang menunjukkan kinerja daya tahan yang sangat baik dibandingkan variasi lainnya yaitu berada pada variasi FA 15% yaitu sebesar 99,75% pada perendaman 24 jam dan 97,12% pada perendaman 48 jam.

Jaya dkk. (2021) juga melakukan penelitian tentang pemanfaatan FA batu bara dengan kelas C sebagai *filler* guna meningkatkan kekuatan dari aspal beton porus. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai stabilitas, *flow*, MQ, VIM, serta mendapatkan nilai resapan berupa permeabilitas dan waktu pengaliran air. Pada KAO, hasil pengujian campuran aspal beton porus dengan *filler* debu batu 3,3% sebagai pembanding memperlihatkan nilai stabilitas sebesar 702 kg, *flow* sebesar 3,08 mm, MQ sebesar 223,01 kg/mm, VIM sebesar 20,88%, permeabilitas 0,222 cm/det, dan waktu pengaliran air 5,61 det. Sedangkan hasil pengujian aspal beton porus dengan KAO dan penggantian *filler* FA menggunakan 5 variasi kadar yaitu 2%, 2,5%, 3%, 3,5%, dan 4%, diperoleh hasil terbaik pada

penggunaan kadar FA sebesar 2%, dengan nilai stabilitas sebesar 729%, *flow* sebesar 3,10 mm, MQ sebesar 235,26 kg/mm, VIM sebesar 20,64%, permeabilitas sebesar 0,213 cm/det, dan waktu pengaliran air sebesar 6,02 det. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* dapat meningkatkan nilai stabilitas, *flow*, dan MQ dari campuran aspal beton porus. Akan tetapi sebaliknya, pemanfaatan FA batu bara sebagai *filler* juga ikut menurunkan nilai VIM, permeabilitas, dan waktu pengaliran aspal beton porus.

Selanjutnya, Wenur dkk. (2023) juga melakukan penelitian tentang pengaruh variasi kadar FA batu bara pada campuran laston HRS-WC. Penelitian ini menggunakan pengujian *Marshall* dengan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018. Variasi kadar FA batu bara yang digunakan yaitu 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100%. Hasil dari pengujian *Marshall* yaitu didapatkan nilai stabilitas berdasarkan variasi kadar FA secara berturut-turut sebesar 1281,18 kg; 1065,59 kg; 812,33 kg; 784,48 kg; 716,14 kg. Nilai *flow* sebesar 4,56 mm; 4,48 mm; 4,33 mm; 4,16 mm; 3,95 mm. Nilai VMA sebesar 19,045%; 20,105%; 22,430%; 21,687%; 23,650%. Nilai VIM sebesar 5,106%; 6,348%; 9,077%; 8,203%; 10,503%. Nilai *Voids Filled with Bitumen* (VFB) sebesar 73,192%; 68,44%; 59,682%; 62,197%; 55,590%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa campuran laston HRS-WC yang menggunakan substitusi *filler* FA batu bara menyebabkan terjadinya perubahan nilai-nilai karakteristik *Marshall* yang semakin menurun jika dibandingkan dengan tanpa adanya substitusi *filler* FA batu bara.

Selain itu, Basri dkk. (2024) juga ikut melakukan penelitian tentang pengaruh penggunaan FA batu bara pada campuran laston AC-WC. Penelitian ini menggunakan variasi kadar FA batu bara yaitu 0%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100%. Hasil penelitian melalui pengujian *Marshall* yang berpedoman pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2018 Revisi 2 ini, menunjukkan bahwa variasi kadar FA batu bara terbaik yaitu pada variasi campuran 50% FA dengan penggunaan KAO sebesar 5,9%. Hal ini ditunjukkan berdasarkan tinjauan terhadap nilai stabilitas sebesar 1.976,10 kg, *flow* sebesar 3,08 mm, MQ sebesar 640,89 kg/mm, VMA sebesar 15,35%, VFWA sebesar 76,42%, dan VIM sebesar 3,62%.

2.3 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Kinerja Perkerasan Aspal

Metode pencampuran menjadi salah satu faktor penting untuk memastikan kinerja campuran perkerasan. Proses ini bertujuan untuk menghasilkan campuran yang homogen melalui pengaturan suhu dan urutan pencampuran yang tepat, sehingga setiap butir agregat dapat terlapisi aspal secara merata. Kesalahan dalam waktu, suhu, atau urutan pencampuran dapat menurunkan kualitas ikatan antarpartikel, serta dapat mengurangi stabilitas dan durabilitas campuran. Oleh karena itu, pengendalian metode pencampuran yang sesuai dengan karakteristik material sangat penting untuk memperoleh campuran yang memiliki stabilitas tinggi. Berdasarkan hal tersebut, Iqbal dan Fauziah (2023) melakukan penelitian tentang pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap terhadap kinerja campuran HRS-WC dengan penambahan limbah ban karet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan metode pencampuran bertahap mampu meningkatkan mutu dan kinerja campuran secara signifikan. Berdasarkan hasil uji *Marshall Standard*, campuran dengan metode pencampuran bertahap menghasilkan nilai stabilitas, *flow*, dan MQ yang lebih tinggi dibandingkan metode pencampuran konvensional. Selain itu, parameter lain seperti ITS, TSR, CL, dan *Asphalt Flow Down* (AFD) juga menunjukkan hasil yang lebih baik pada metode pencampuran bertahap. Peningkatan nilai-nilai tersebut mengindikasikan bahwa metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan campuran yang lebih homogen, sehingga mengurangi risiko segregasi dan pemisahan aspal, serta dapat meningkatkan daya tahan dari perkerasan secara keseluruhan.

Selain itu, Yaro dkk. (2021) juga melakukan penelitian terhadap pengaruh metode pencampuran konvensional dan bertahap terhadap campuran *Stone Matrix Asphalt Concrete* (SMAC) dengan pemanfaatan limbah serat sawit sebagai stabilisasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap memiliki karakteristik campuran yang lebih optimal dibandingkan dengan metode konvensional. Berdasarkan sifat fisik, campuran yang dihasilkan memiliki nilai DD yang lebih rendah, rongga udara yang berada dalam batas ideal, serta stabilitas *Marshall* yang lebih tinggi. Kondisi ini mencerminkan pencampuran material yang

dilakukan sudah homogen dan ikatan antarpartikel menjadi lebih kuat. Sedangkan berdasarkan sifat mekanik, metode pencampuran bertahap memberikan ketahanan terhadap kelembapan dan modulus kekakuan yang lebih baik, serta menghasilkan nilai CL yang lebih rendah. Secara keseluruhan, hal ini menegaskan bahwa metode pencampuran bertahap mampu meningkatkan stabilitas dan performa dari campuran SMAC dengan pemanfaatan limbah serat sawit sebagai stabilisasi.

Hadi dkk. (2025) juga melakukan penelitian untuk mengetahui dampak metode pencampuran terhadap pengoptimalan performa perkerasan bergradasi *superpave*. Metode pencampuran yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari metode pencampuran konvensional, dua tahap, dan tiga tahap. Sedangkan untuk evaluasi karakteristik campuran perkerasan ditinjau dari parameter *Marshall*, ITS, IRS, dan CL. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode tiga tahap menghasilkan nilai ITS sebesar 21,49 (unggul 16,25%), IRS sebesar 93,94 (unggul 3,89%), dan CL sebesar 4,92% (lebih baik dari pada metode konvensional). Temuan ini mengindikasikan bahwa metode pencampuran yang dilakukan secara terstruktur dan bertahap akan meningkatkan homogenitas dan kualitas ikatan agregat dan aspal. Oleh karena itu, metode tiga tahap disarankan sebagai metode yang efektif untuk meningkatkan durabilitas dan kinerja mekanis campuran *Superpave*.

2.4 Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan dengan *Software KENPAVE*

Umur pelayanan perkerasan merupakan jumlah waktu dalam satuan tahun yang dihitung sejak perkerasan atau jalan tersebut dibuka untuk lalu lintas sampai saat dibutuhkan perbaikan berat ataupun dianggap memerlukan pemberian lapisan permukaan jalan yang baru (Hasanuddin dkk. 2023). Perkiraan umur pelayanan ini menjadi tahapan penting dalam proses perancangan jalan dan juga evaluasi kinerja dari struktur perkerasan. Salah satu pendekatan yang sering digunakan dalam perkiraan umur pelayanan ini yaitu analisis dengan menggunakan *software KENPAVE*. Menurut Huang (2004) menjelaskan bahwa *software KENPAVE* adalah program perencanaan perkerasan yang dikembangkan oleh Dr. Yang Huang, P.E. Program ini merupakan kombinasi dari empat program grafis terpisah, yaitu LAYERNIP, KENLAYER, SLABNIP, dan KENSLAB. Selain itu, program ini

ditulis dengan menggunakan bahasa pemrograman *Visual Basic* dan dapat dijalankan di Windows 95 ataupun versi yang lebih tinggi.

Penggunaan *software* KENPAVE untuk memperkirakan umur pelayanan perkerasan sebelumnya sudah pernah dilakukan oleh Hadi dan Fauziah (2022) pada ruas Jalan Padjajaran, Yogyakarta. Para peneliti tersebut melakukan penelitian dengan membandingkan prediksi umur pelayanan antara campuran perkerasan *Superpave* dan AC-WC menggunakan pemodelan viskoelastik dan elastik pada *software* KENPAVE. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran perkerasan *Superpave* memiliki prediksi umur pelayanan yang lebih panjang jika dibandingkan dengan campuran AC-WC. Selain itu, persepsi mengenai pengaruh suhu pembebanan pada pemodelan menggunakan *software* KENPAVE ini juga akan berdampak terhadap hasil prediksi nilai beban gandar minimum dan juga prediksi umur pelayanan perkerasan. Apabila campuran perkerasan tidak dipengaruhi oleh suhu pembebanan (pemodelan elastik), maka akan menghasilkan campuran perkerasan yang memiliki prediksi nilai beban gandar minimum yang relatif tinggi dan prediksi umur pelayanan yang lebih panjang, jika dibandingkan dengan campuran perkerasan dipengaruhi oleh suhu pembebanan (pemodelan viskoelastik).

Tolab dan Fauziah (2024) juga melakukan penelitian tentang prediksi kerusakan dan sisa umur layan pada Jalan Tol Yogyakarta – Bawen. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pendekatan elastik dan viskoelastik berdasarkan MDPJ Bina Marga 2017 menggunakan *software* KENPAVE. Penelitian ini dimulai dengan menentukan 3 jenis alternatif desain perkerasan, berupa perkerasan lentur dengan umur pelayanan minimal yaitu 20 tahun. Berdasarkan hasil analisis, adapun alternatif desain perkerasan yang direkomendasikan adalah perkerasan alternatif 1 dengan lapisan yang terdiri dari AC-WC 40 mm, AC-BC 60 mm, AC-Base 180 mm, dan LFA 300 mm. Alternatif ini diprediksi dapat melayani pengulangan beban dalam pemodelan elastis sebanyak 432.857.828 ESAL hingga *fatigue cracking* terjadi, 215.176.089 ESAL hingga terjadinya *rutting*, dan 136.575.580 ESAL hingga terjadinya *permanent deformation*. Sedangkan analisis menggunakan pemodelan viskoelastis dapat memberikan pengulangan beban sebanyak

153.304.378 ESAL hingga *fatigue cracking* terjadi, 47.014.109 ESAL hingga terjadinya *rutting*, dan 71.859.938 ESAL hingga terjadinya *permanent deformation*. Berdasarkan pemodelan elastik, umur layanan perkerasan adalah 33 tahun, dengan kerusakan awal berupa *permanent deformation*. Sedangkan pemodelan viskoelastik memiliki umur layanan 22,7 tahun, dengan kerusakan awal berupa *rutting*.

Tidak hanya itu, Rahmawati dan Adiyasa (2021) juga pernah menggunakan pendekatan mekanistik-empiris menggunakan *software* KENPAVE untuk menganalisis regangan dan memprediksi sisa umur layan perkerasan lentur di Jalan Denggung - Wonorejo. Penelitian ini berpedoman pada AASHTO 1993 dalam memprediksi sisa umur layan, dan MDPJ 2017 dalam merekomendasikan alternatif lapisan perkerasan baru. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prediksi sisa umur layan akibat beban lalu lintas menghasilkan nilai sisa sebesar 1,03% dari *fatigue cracking* pada tahun kedua, dan 24,7% dari *rutting* pada akhir tahun ketiga. Hal ini menunjukkan bahwa perkerasan tidak mampu menahan beban lalu lintas sesuai dengan umur yang direncanakan. Oleh karena itu, MDPJ 2017 digunakan untuk memberikan alternatif lapisan perkerasan baru pada jalan tersebut.

Arianto dan Fauziah (2024) juga melakukan kajian terhadap kinerja perkerasan lentur dengan pendekatan elastik dan viskoelastik menggunakan program KENPAVE. Hasil kajian menunjukkan bahwa pada desain alternatif yang menggunakan AC-Base mengalami kerusakan awal berupa *permanent deformation*, sedangkan pada desain alternatif yang menggunakan CTB mengalami kerusakan awal berupa *rutting*. Secara umum, desain perkerasan dengan pendekatan elastik memiliki umur pelayanan yang lebih panjang jika dibandingkan dengan pendekatan viskoelastik.

2.5 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini

Adapun perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian saat ini dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini Bagian 1

Penelitian Terdahulu							Penelitian Saat Ini
No	Aspek	Syafiqah dkk. (2021)	Rahmawati dan Adiyasa (2021)	Yaro dkk. (2021)	Hadi dan Fauziah (2022)	Iqbal dan Fauziah (2023)	Aulia (2026)
1	Judul	<i>Performance of Stone Mastic Asphalt Incorporating Kenaf Fiber</i>	<i>Analysis of Remaining Service Life for Flexible Pavement Using Mechanistic-Empirical Methods</i>	<i>Performance Evaluation of Waste Palm Oil Fiber Reinforced Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Traditional and Sequential Mixing Processes</i>	Studi Komparasi Prediksi Umur Pelayanan Antara Campuran <i>Superpave</i> dan AC-WC Menggunakan Permodelan Viskoelastik dan Elastik	Studi Eksperimental Penggunaan Bahan Tambah Limbah Ban Karet dengan Metode Pencampuran Bertahap Terhadap Kinerja Campuran <i>Hot Rolled Sheet-Wearing Course</i>	Analisis Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i> Berfiller <i>Fly Ash</i> Batu Bara
2	Jenis Campuran	<i>Stone Mastic Asphalt (SMA)</i>	-	<i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>	<i>Superpave</i> dan AC-WC	HRS-WC	<i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>
3	Jenis Aspal	<i>Asphalt 60/70 Penetration</i>	-	<i>Asphalt 60/70 Penetration</i>	-	Aspal pen 60/70	Aspal pen 60/70
4	Bahan Pengisi (<i>Filler</i>)	-	-	Debu granit	-	-	FA Batu Bara
5	Bahan Tambahan	<i>Kenaf Fiber</i>	-	Limbah Serat Sawit	-	Limbah Ban Karet	Viatop ⁶⁶
6	Metode Pencampuran	Konvensional	-	Konvensional dan Bertahap	-	Konvensional dan Bertahap	Dua Tahap dan Tiga Tahap
7	Pengujian	<i>LA Abrasion Value Test, Marshall Stability, Resilient Modulus Test, Dynamic Creep Test</i>	Prediksi sisa umur layan perkerasan eksisting	<i>Marshall, DD, CL, Stiffness Modulus</i> , uji ketahanan akibat kelembaban	Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan dengan menggunakan <i>software</i> KENPAVE	<i>Marshall Test, IRS, ITS, TSR, CL, AFD</i>	<i>Marshall Standart, IRS, ITS, TSR, DD, CL, Stiffness Modulus</i> , Analisis perkiraan umur layan dengan menggunakan <i>software</i> KENPAVE.

Sumber: Syafiqah dkk. (2021), Rahmawati dan Adiyasa (2021), Yaro dkk. (2021), Hadi dan Fauziah (2022), Iqbal dan Fauziah (2023), Aulia (2026)

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini Bagian 1

Penelitian Terdahulu							Penelitian Saat Ini
No	Aspek	Syafiqah dkk. (2021)	Rahmawati dan Adiyasa (2021)	Yaro dkk. (2021)	Hadi dan Fauziah (2022)	Iqbal dan Fauziah (2023)	Aulia (2026)
8	Hasil	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan <i>kenaf fiber</i> dalam variasi kadar yang diuji terbukti memberikan pengaruh positif terhadap karakteristik mekanis campuran SMA. Pada uji abrasi, kadar 0,2% memberikan kehilangan abrasi paling rendah, sedangkan uji <i>Marshall</i> menunjukkan stabilitas dan kekakuan optimal pada kadar 0,4% dengan rongga udara yang lebih kecil dan kepadatan tinggi pada kadar 0,2%. Nilai modulus resilien juga meningkat seiring penambahan serat dan mencapai maksimum pada kadar 0,6% untuk pengujian pada suhu 25°C maupun 40°C, sehingga sesuai untuk kondisi lalu lintas ringan. Pada uji <i>dynamic creep</i> , deformasi permanen terendah dicapai oleh campuran tanpa serat pada suhu 40°C, tetapi kadar 0,6% memberikan kinerja terbaik pada suhu 25°C. berdasarkan keseluruhan parameter performa tersebut, kadar <i>kenaf fiber</i> optimum ditetapkan sebesar 0,3%.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa perkerasan lentur pada Ruas Denggung – Wonorejo memberikan respons struktural berupa regangan tarik dengan kapasitas pengulangan beban 1.047.484,63 ESAL, serta regangan tekan dengan kapasitas 2.172.928,92 ESAL. Prediksi umur layan menggunakan persamaan AASHTO 1993 menghasilkan nilai sisa umur layanan sebesar 1,03% retak kelelahan pada tahun kedua dan sisa umur layanan rutting sebesar 24,79% pada tahun ketiga. Kondisi ini mengindikasikan bahwa perkerasan tidak mampu menahan pengulangan beban sesuai umur desain. Sebagai solusi, dua alternatif penanganan diajukan, dengan opsi 1 lebih direkomendasikan karena memberikan peningkatan kapasitas pengulangan beban yang lebih sesuai untuk kondisi perkerasan di lokasi penelitian.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap merupakan alternatif yang lebih efektif untuk campuran SMA, dikarenakan metode ini menghasilkan nilai DD yang lebih rendah, rongga udara dan kadar aspal optimum yang lebih baik, serta stabilitas <i>Marshall</i> yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Dari sisi sifat mekanis, campuran SMA dengan metode pencampuran berurutan ini juga memiliki ketahanan terhadap kelembapan yang lebih baik, modulus kekakuan yang lebih tinggi dan nilai CL yang lebih kecil pada semua variasi campuran. Secara keseluruhan, penggunaan limbah serat sawit sebagai stabilisator mampu meningkatkan sifat campuran SMA, sedangkan metode pencampuran berurutan mampu memberikan hasil yang lebih unggul dibandingkan metode konvensional.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran <i>superpave</i> memiliki nilai prediksi umur layanan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan campuran AC-WC, hal ini berlaku untuk permodelan viskoelastik dan elastik. Selanjutnya, analisis mekanistik-empiris dari alternatif desain yang dihitung dengan metode Bina Marga 2017 (alternatif 2) menunjukkan bahwa prediksi umur layan berada di atas umur desain 20 tahun, dimana 30,7 tahun pada permodelan viskoelastik, dan 40,9 tahun pada permodelan elastik sebelum prediksi kerusakan pertama.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk ban karet pada campuran HRS-WC terbukti dapat meningkatkan karakteristik <i>Marshall</i> , khususnya pada aspek volumetrik. Sedangkan dari sisi mekanis, penambahan serbuk ban karet sebesar 2% mampu meningkatkan nilai stabilitas campuran. selanjutnya, untuk karakteristik ITS, penambahan sebesar 2% dan 4% menunjukkan adanya peningkatan kinerja campuran, sedangkan pada karakteristik TSR peningkatan hanya terjadi pada kadar 2%. Selain itu, pada parameter IRS, CL, dan AFD, penambahan serbuk ban karet juga memberikan dampak positif terhadap kinerja campuran. Penggunaan metode pencampuran bertahap pada penelitian ini juga menghasilkan kinerja lebih baik dibandingkan dengan metode pencampuran konvensional.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran SMA dengan metode pencampuran tiga tahap mampu memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan metode dua tahap maupun konvensional. Hal ini terbukti dari kemampuan metode tiga tahap yang menghasilkan distribusi aspal dan agregat yang lebih merata, sehingga ikatan adhesi, stabilitas, serta ketahanan campuran terhadap air dan suhu menjadi lebih baik. Kondisi tersebut juga membuat umur layan perkerasan dengan metode tiga tahap lebih tinggi dibandingkan metode lainnya, dengan jenis kerusakan awal berupa <i>permanent deformation</i> .

Sumber: Syafiqah dkk. (2021), Rahmawati dan Adiyasa (2021), Yaro dkk. (2021), Hadi dan Fauziah (2022), Iqbal dan Fauziah (2023), Aulia (2026)

Tabel 2. 2 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini Bagian 2

Penelitian Terdahulu							Penelitian Saat Ini
No	Aspek	Archenita dkk. (2023)	Prasetya (2024)	Basri dkk. (2024)	Hadi dkk. (2025)	Roni dan Hadi (2025)	Aulia (2026)
1	Judul	<i>Durability Performance Analysis of Mixture Asphalt Concrete Base Course (AC-Base) Using Coal Fly Ash a Filler Substitute</i>	Pemanfaatan <i>Fly Ash</i> Sebagai <i>Filler</i> Pengganti Terhadap Karakteristik <i>Stone Matrix Asphalt</i>	Analisis Pengaruh Penggunaan <i>Fly Ash</i> Batu Bara dan Abu Batu Sebagai <i>Filler</i> Pada Campuran Laston Lapis Aus (AC-WC)	Studi Eksperimental Terhadap Dampak Metode Pencampuran Dalam Mengoptimalkan Performa Perkerasan Bergradasi <i>Superpave</i>	Transformasi Limbah Abu Arang Kayu Jati Menjadi Material Fungsional Pada Aspal <i>Stone Matrix Asphalt</i> (SMA)	Analisis Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan <i>Stone Matrix Asphalt</i> (SMA) Berfiller <i>Fly Ash</i> Batu Bara
2	Jenis Campuran	<i>Asphalt Concrete Base Course</i> (AC-Base)	<i>Stone Matrix Asphalt</i> (SMA)	Laston Lapis Aus (AC-WC)	<i>Superpave</i>	<i>Stone Matrix Asphalt</i> (SMA)	<i>Stone Matrix Asphalt</i> (SMA)
3	Jenis Aspal	<i>Asphalt 60/70 Penetration</i>	Aspal pen 60/70	Aspal pen 60/70	Aspal pen 60/70	Aspal pen 60/70	Aspal pen 60/70
4	Bahan Pengisi (<i>Filler</i>)	FA Batu Bara	FA Batu Bara	FA Batu Bara	-	Limbah Abu Arang Kayu Jati	FA Batu Bara
5	Bahan Tambahan	-	Viatop ⁶⁶	-	-	Viatop ⁶⁶	Viatop ⁶⁶
6	Metode Pencampuran	Konvensional	Konvensional	Konvensional	Konvensional, Dua Tahap, Tiga Tahap	Konvensional	Dua Tahap dan Tiga Tahap
7	Pengujian	<i>Marshall Test, Immertion Test</i>	<i>Marshall Standart</i> , IRS, ITS, TSR, VCA, DD, CL	<i>Marshal Standard</i>	<i>Marshall</i> , ITS, IRS, CL	<i>Marshal Standard</i> , VCA, CL, IRS, ITS, TSR	<i>Marshall Standart</i> , IRS, ITS, TSR, DD, CL, <i>Stiffness Modulus</i> , Analisis perkiraan umur layan dengan menggunakan <i>software</i> KENPAVE

Sumber: Archenita dkk. (2023), Prasetya (2024), Basri dkk. (2024), Hadi dkk. (2025), Roni dan Hadi (2025), dan Aulia (2026)

Lanjutan Tabel 2. 2 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian Saat Ini Bagian 2

Penelitian Terdahulu							Penelitian Saat Ini
No	Aspek	Archenita dkk. (2023)	Prasetya (2024)	Basri dkk. (2024)	Hadi dkk. (2025)	Roni dan Hadi (2025)	Aulia (2026)
8	Hasil	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengujian volumetrik dan karakteristik marshall campuran AC-Base dengan menggunakan FA batu bara sebagai substitusi filler telah sesuai spesifikasi teknis tahun 2018 revisi 2 devisi 6. Nilai KAO campuran AC-Base dengan menggunakan FA batu bara sebagai substitusi filler mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya persentase kadar FA. Selain itu, nilai perendaman <i>marshall</i> cenderung meningkat seiring dengan peningkatan persentase kadar FA dalam campuran AC-Base, dimana campuran dengan kadar FA 15% memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan kadar FA lainnya. Hal ini ditunjukkan melalui hasil indeks kekuatan sisa yang lebih tinggi pada perendaman 24 jam (99,75%) maupun perendaman 48 jam (97,12%).	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada parameter kekuatan struktur yang berdasarkan nilai stabilitas, <i>MQ</i> , dan <i>ITS</i> mengalami penurunan nilai dari kadar 0% hingga 100%. Sementara itu, untuk nilai <i>flow</i> justru mengalami peningkatan. Walaupun mengalami penurunan, hasil pengujian tersebut masih memenuhi standar Spesifikasi Bina Marga 2018 Revisi 2. Selain itu, pada parameter durabilitas melalui nilai <i>IRS</i> , <i>CL</i> , <i>DD</i> , dan <i>TSR</i> menunjukkan stabilitas yang baik dan efektif untuk mencegah terjadinya permasalahan yang dapat disebabkan oleh pengaliran aspal saat campuran belum dipadatkan.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari berbagai variasi kadar <i>filler</i> yang dikombinasikan dengan FA batu bara dan abu batu, kadar terbaik pada penelitian ini adalah variasi campuran 50% FA batu bara dan 50% abu batu. Hal itu ditentukan berdasarkan nilai sifat-sifat <i>Marshall</i> , yaitu nilai stabilitas yang diperoleh sebesar 1.976,10 kg, nilai <i>flow</i> sebesar 3,08 mm, nilai <i>MQ</i> sebesar 640,89 kg/mm, nilai <i>VMA</i> sebesar 15,35%, nilai <i>VFA</i> sebesar 76,42%, dan <i>VIM</i> sebesar 3,62%	Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode tiga tahap menghasilkan nilai <i>ITS</i> sebesar 21,49 (unggul 16,25%), <i>IRS</i> sebesar 93,94 (unggul 3,89%), dan <i>CL</i> sebesar 4,92% (lebih baik dari pada metode konvensional). Hal ini menunjukkan bahwa metode pencampuran yang lebih terstruktur dan berurutan mampu meningkatkan homogenitas dan ikatan antara agregat dan aspal. Dengan demikian, metode pencampuran tiga tahap direkomendasikan sebagai strategi optimal dalam meningkatkan durabilitas dan kinerja mekanis campuran <i>superpave</i> .	Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limbah abu arang kayu jati (AAKJ) dengan variasi kadar 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% menyebabkan penurunan nilai stabilitas dan peningkatan nilai <i>flow</i> , serta penurunan pada beberapa parameter pengujian lainnya. Hal ini disebabkan oleh karakteristik AAKJ yang berbentuk bulat dengan permukaan lebih halus, sehingga ikatannya dengan aspal menjadi lemah. Akan tetapi, <i>filler</i> ini masih bisa dimanfaatkan sebagai <i>filler</i> alternatif dengan batas maksimal penggunaan pada kadar 25%.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran SMA dengan metode pencampuran tiga tahap mampu memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan metode dua tahap maupun konvensional. Hal ini terbukti dari kemampuan metode tiga tahap yang menghasilkan distribusi aspal dan agregat yang lebih merata, sehingga ikatan adhesi, stabilitas, serta ketahanan campuran terhadap air dan suhu menjadi lebih baik. Kondisi tersebut juga membuat umur layan perkerasan dengan metode tiga tahap lebih tinggi dibandingkan metode lainnya, dengan jenis kerusakan awal berupa <i>permanent deformation</i> .

Sumber: Archenita dkk. (2023), Prasetya (2024), Basri dkk. (2024), Hadi dkk. (2025), Roni dan Hadi (2025), dan Aulia (2026)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur (*flexibel pavement*) merupakan jenis perkerasan jalan yang terdiri dari material berbutir yang diikat dengan menggunakan bahan pengikat berupa aspal (bitumen). Sukirman (1999) di dalam Prasajo dan Narendra (2023) menjelaskan bahwa prinsip kerja dari perkerasan ini yaitu mampu mendistribusikan beban kendaraan lalu lintas secara berangsur-angsur dari permukaan atas perkerasan ke struktur lapisan yang ada di bawahnya hingga mencapai lapisan tanah dasar (*subgrade*). Karakteristik utama dari jenis perkerasan ini adalah memiliki sifat fleksibel yang memungkinkan lapisan perkerasan tersebut dapat menyesuaikan diri terhadap deformasi yang terjadi tanpa harus mengalami kerusakan yang signifikan. Selain itu, jenis perkerasan ini juga memiliki sifat kekakuan (*stiffness*) yang lebih rendah dibandingkan perkerasan lainnya, seperti perkerasan kaku (*rigid pavement*). Hal ini memungkinkan lapisan perkerasan tersebut tidak langsung menyalurkan beban kendaraan lalu lintas secara merata ke seluruh permukaan, akan tetapi akan disalurkan secara bertahap melalui lapisan yang ada dibawahnya.

3.2 Struktur Lapisan Perkerasan Lentur

Novriani dkk. (2024) menjelaskan bahwa struktur perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan yang memiliki fungsi dan peran penting dalam menahan beban kendaraan lalu lintas, serta dapat mendukung kelancaran arus kendaraan. Adapun penjelasan singkat terkait beberapa lapisan pada perkerasan lentur yaitu sebagai berikut.

1. Lapisan Permukaan (*Surface Course*)

Lapisan permukaan merupakan lapisan yang terbuat dari campuran beraspal panas atau dikenal sebagai beton aspal (*asphalt concrete*), dengan bahan penyusun berupa agregat, *filler*, dan juga aspal. Pada umumnya, lapisan ini memiliki tiga jenis lapisan beton aspal yaitu sebagai berikut.

a. *Asphalt Concrete-Wearing Course (AC-WC)*

AC-WC merupakan lapis aus yang posisinya berada paling atas pada struktur lapisan perkerasan lentur. Lapisan ini berfungsi sebagai lapisan yang bersentuhan langsung dengan permukaan roda kendaraan. Oleh karena itu, lapisan ini harus didesain sebaik mungkin agar dapat memberikan kenyamanan bagi pengendara, serta mencegah terjadinya slip antara permukaan jalan dan roda kendaraan.

b. *Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC)*

AC-BC merupakan lapis permukaan antara yang posisinya berada di bawah lapisan AC-WC. Lapisan ini memiliki kandungan aspal yang lebih tinggi serta tekstur agregat yang lebih kasar dibandingkan dengan lapisan AC-WC. Fungsi dari lapisan ini adalah sebagai lapisan yang menerima pembebanan lalu lintas yang telah diredam sebagian oleh lapisan di atasnya, serta menyalurkan beban tersebut ke lapisan bawah.

c. *Asphalt Concrete-Base (AC-Base)*

AC-Base merupakan lapis beton aspal yang posisinya berada di bawah lapisan AC-BC. Fungsi lapisan ini adalah sebagai lapis pondasi yang memberikan dukungan utama pada lapisan permukaan.

2. Lapisan Fondasi Atas

Lapis fondasi atas merupakan lapisan yang berfungsi sebagai lapisan pendukung dari struktur perkerasan, dengan prinsip kerja menyalurkan beban yang diterima dari lapisan permukaan ke lapisan fondasi bawah. Selain itu, lapisan ini juga berfungsi untuk menambah kekuatan struktural dari perkerasan lentur. Lapis fondasi atas ini bisa berupa campuran beton aspal seperti AC-Base atau bisa juga berupa agregat tanpa aspal.

3. Lapisan Fondasi Bawah

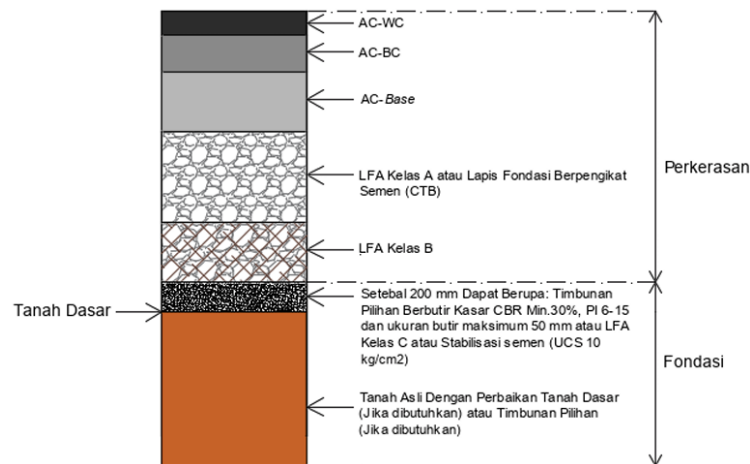
Lapis fondasi bawah merupakan lapisan yang posisinya berada di bawah lapisan fondasi atas dan berada di atas lapisan tanah dasar. Lapisan ini berfungsi untuk menerima pembebanan dari struktur lapisan yang ada di atasnya, dan menyalurkannya ke lapisan tanah dasar, serta juga berfungsi

untuk mencegah partikel halus dari tanah dasar agar tidak naik ke lapisan pondasi yang berada di atasnya.

4. Lapisan Tanah Dasar (*Subgrade*)

Lapis tanah dasar dapat berupa tanah asli atau tanah hasil galian maupun timbunan yang telah melalui proses pemadatan. Lapis ini berfungsi sebagai pondasi bagi semua struktur lapisan perkerasan jalan. Oleh karena itu, daya dukung dan kualitas dari tanah dasar ini tentunya sangat menentukan ketahanan perkerasan yang ada di atasnya.

Tipikal struktur perkerasan lentur pada permukaan tanah asli dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Struktur Lapisan perkerasan Lentur

(Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024)

3.3 Bahan Penyusun Perkerasan Lentur

Bahan penyusun campuran perkerasan memiliki peran yang sangat penting terhadap kekuatan, daya tahan, dan juga umur layan perkerasan. Oleh karena itu, bahan yang digunakan harus memenuhi standar kualitas tertentu agar dapat bekerja secara optimal. Berikut merupakan penjelasan terkait bahan penyusun yang diperlukan dalam perkerasan lentur.

3.3.1 Aspal

Aspal adalah salah satu material bahan pengikat yang memiliki karakteristik berwarna hitam kecoklatan, dan biasanya berasal dari bahan alam ataupun dari pengolahan minyak bumi. Lopes dkk. (2023) menyebutkan bahwa aspal memiliki

sifat termoplastis yang dapat meleleh saat melalui proses pemanasan dengan suhu tinggi dan akan membeku saat suhu tersebut menurun, sehingga sifat perekat tersebut dapat mengikat bahan penyusun lainnya seperti agregat dengan efektif. Prinsip kerja material aspal ini yaitu untuk memberikan ikatan antar butiran agregat serta mengisi celah-celah kosong yang terdapat di dalam campuran agregat.

Pratama dan Haratama (2024), menjelaskan bahwa aspal yang digunakan pada perkerasan jalan bertujuan untuk memberikan lapisan yang tahan terhadap beban kendaraan lalu lintas dan kondisi lingkungan. Aspal ini memiliki beragam jenis yang dibedakan berdasarkan beberapa faktor seperti viskositas, komposisi, sifat reologi, dan sumbernya. Salah satu jenis aspal yang sering digunakan yaitu aspal penetrasi 60/70. Aspal penetrasi diperoleh melalui proses pemurnian dan pengolahan minyak bumi dengan karakteristik tertentu berdasarkan nilai penetrasi pada suhu 25°C. Persyaratan untuk aspal pen 60/70 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Persyaratan Aspal Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Nilai Persyaratan	Standar
1	Berat Jenis	$\leq 1,0$	SNI 2441:2011
2	Penetrasi Pada 25°C (0,1 mm)	60 - 70	SNI 2456:2011
3	Daktilitas Pada 25°C (cm)	≥ 100	SNI 2432:2011
4	Titik Nyala (°C)	≥ 232	SNI 2433:2011
5	Titik Lembek (°C)	≥ 48	SNI 2434:2011
6	Kelarutan dalam <i>Trichloroethylene</i> (%)	≥ 99	SNI 2438:2015

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3.3.2 Agregat

Agregat merupakan material granular yang menjadi komponen utama dalam campuran aspal dan memegang peranan penting dalam menentukan kekuatan, stabilitas, serta ketahanan perkerasan jalan terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan. Menurut Sukirman (2003) di dalam Sriharyani dan Septiadi (2024) menyebutkan bahwa hal tersebut dibuktikan oleh proporsi agregat yang berjumlah sekitar 75 – 85% dari volume campuran atau sekitar 90 – 95% dari persentase berat

campuran. Agregat yang ideal untuk campuran beraspal harus memiliki gradasi yang baik, bentuk partikel bersudut, kualitas yang keras atau tidak mudah hancur, serta memiliki permukaan yang bersih dan kasar. Berdasarkan persyaratan ukuran butiran dan penggunaannya, agregat dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu sebagai berikut.

1. Agregat Kasar

Agregat kasar adalah material granular berupa kerikil atau batu pecah dengan ukuran butiran yang tertahan saringan No. 4 (4,75 mm). Persyaratan untuk agregat kasar yang akan digunakan pada campuran perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Persyaratan Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian			Standar	Nilai Persyaratan
1	Kekekalan bentuk agregat terhadap larutan	Natrium Sulfat		SNI 3407:2008	Maks. 12%
		Magnesium Sulfat			Maks. 18%
2	Abrasi dengan mesin Los Angeles	Campuran AC modifikasi dan SMA	100 putaran	SNI 2417:2008	Maks. 6%
			500 Putaran		Maks. 30%
		Semua jenis campuran bergradasi lainnya	100 putaran		Maks. 8%
			500 putaran		Maks. 40%
3	Kelekatan agregat terhadap aspal			SNI 2439:2011	Min. 95%
4	Butir pecah pada agregat kasar	SMA		SNI 7619:2012	100/90 *)
		Lainnya			95/90 **)
5	Partikel Pipih dan Lonjong	SMA		SNI 8287:2016 (1:5)	Maks. 5%
		Lainnya			Maks. 10%
6	Material lolos ayakan No. 200			SNI ASTM C117:2012	Maks. 1%
7	Berat Jenis			SNI 1969:2016	> 2,5
8	Penyerapan Air Agregat Kasar			SNI 1969:2016	< 3%

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 adalah material agregat dengan ukuran butiran yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) dan tertahan saringan No. 200 (0,0075 mm). Persyaratan untuk agregat halus yang akan digunakan pada campuran perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3. 3 Persyaratan Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Standar	Nilai Persyaratan
1	Nilai Setara Pasir	SNI 03-4428-1997	Min. 60%
2	Uji Kadar Rongga Tanpa Pemadatan	SNI 03-6877-2002	Min. 45
3	Gumpalan Lempung dan Butir-butir Mudah Pecah dalam Agregat	SNI 03-4141-1996	Maks. 1%
4	Agregat Lolos Ayakan No. 200	SNI ASTM C117:2012	Maks. 10%
5	Berat Jenis	SNI 1970:2016	> 2,5
6	Penyerapan Air Agregat Halus	SNI 1970:2016	< 3

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3. Bahan Pengisi (*Filler*)

Filler adalah material berbutir halus dengan ukuran butiran yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm). *filler* ini berfungsi sebagai bahan pengisi rongga yang ada diantara partikel agregat yang lebih kasar, sehingga rongga yang ada dalam campuran akan berkurang, serta kepadatan dan kestabilan campuran juga meningkat. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 6 Tahun 2025 menyebutkan bahwa *filler* yang ditambahkan di dalam campuran harus dalam kondisi kering dan bebas dari gumpalan-gumpalan.

3.3.3 Gradasi Agregat

Gradasi agregat merupakan distribusi ukuran butiran agregat dalam suatu campuran perkerasan yang dirancang berdasarkan ketentuan teknis tertentu. Tujuan pengaturan gradasi ini adalah untuk memperoleh campuran yang memiliki tingkat kepadatan optimal serta stabilitas yang baik saat diberikan beban kendaraan lalu lintas. Gradasi yang ideal biasanya terbentuk dari kombinasi agregat kasar, agregat halus dan *filler* dengan proporsi seimbang, dimana partikel yang lebih halus akan berfungsi untuk mengisi rongga diantara butiran yang lebih besar, sehingga menghasilkan struktur campuran perkerasan yang saling mengunci (*interlocking*) serta memiliki kepadatan tinggi. Penentuan gradasi agregat ini dilakukan melalui pengujian analisa saringan dengan cara melakukan penyaringan sampel agregat dengan menggunakan satu set saringan berukuran berbeda. Hasil pengujian tersebut akan dinyatakan ke dalam bentuk persentase berat agregat yang tertahan maupun yang lolos pada setiap ukuran saringan terhadap berat total sampel agregat.

Adapun gradasi agregat gabungan untuk campuran SMA dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3. 4 Gradasi Agregat Gabungan untuk Campuran SMA

Ukuran Ayakan		% Berat yang Lolos Terhadap Total Agregat <i>Stone Matrix Asphalt (SMA)</i>		
		Tipis	Halus	Kasar
ASTM	(mm)			
1 ½"	37,5			
1"	25			100
¾"	19		100	90 – 100
½"	12,5	100	90 – 100	50 – 88
⅜"	9,5	70 – 95	50 – 80	25 – 60
No. 4	4,75	30 – 50	20 – 35	20 – 28
No. 8	2,36	20 – 30	16 – 24	16 – 24
No. 16	1,18	14 – 21		
No. 30	0,600	12 – 81		
No. 50	0,300	10 – 15		
No. 100	0,150			
No. 200	0,075	8 – 12	8 – 11	8 – 11

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3.3.4 Bahan Aditif

Bahan aditif pada campuran aspal berfungsi sebagai bahan tambah atau *stabilizer* yang berperan penting dalam meningkatkan mutu dan performa campuran, terutama dalam memperkuat struktur perkerasan serta meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan akibat beban lalu lintas berulang. Umumnya, bahan ini dapat berupa serat selulosa, bahan kimia *anti-striping*, maupun polimer yang membantu memperkuat ikatan antara agregat dan aspal, menjaga homogenitas campuran, serta mencegah terjadinya *bleeding* akibat tingginya kadar aspal.

Campuran SMA merupakan campuran beraspal panas yang memiliki kandungan agregat kasar dengan proporsi yang tinggi dan adanya rongga yang diisi *mastic* dengan persentase kadar aspal yang tinggi juga (Alirusi dkk., 2023). Oleh karena itu, penggunaan *stabilizer* akan diterapkan dalam campuran ini, dengan menggunakan salah satu bahan tambah yaitu serat selulosa jenis Viatop⁶⁶. Viatop⁶⁶ merupakan serat selulosa berlapis bitumen yang melalui proses produksi yang

khusus (Febrianto dkk., 2024). Bahan ini berfungsi untuk menyerap dan menahan kelebihan aspal di dalam campuran, sehingga kadar aspal tinggi tetap dapat dipertahankan tanpa menimbulkan keluarnya aspal ke permukaan. Berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga Divisi 6 Tahun 2025, bahan tambah ini akan ditambahkan sebesar 0,3% dari total campuran. Adapun persyaratan *stabilizer* untuk campuran SMA dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 5 Persyaratan *Stabilizer* untuk Campuran 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)

3.4 Campuran SMA

Campuran SMA merupakan jenis campuran beraspal panas dengan gradasi senjang yang umumnya digunakan sebagai lapisan permukaan jalan (Waluyo dan Nofiq, 2023). Campuran ini didominasi oleh agregat kasar dalam proporsi tinggi, sehingga mampu membentuk kerangka agregat yang kuat. Rongga antar butiran agregat tersebut kemudian diisi oleh agregat halus, *filler*, serta aspal yang dicampur dengan serat selulosa untuk meningkatkan kestabilan campuran. Hal itu menjadikan campuran SMA memiliki kekuatan dan ketahanan tinggi terhadap deformasi karena kerangka agregatnya mampu mendistribusikan beban lalu lintas dengan baik (Pagau dkk., 2024). Selain itu, kadar aspal yang relatif tinggi bersama dengan penambahan serat selulosa juga meningkatkan kohesi campuran, mengurangi segregasi, serta

memperpanjang umur layan perkerasan. Ketentuan sifat-sifat campuran SMA dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3. 6 Ketentuan Sifat-sifat Campuran SMA

Sifat-sifat Campuran		SMA	SMA Mod
		Tipis, Halus, dan Kasar	Tipis, Halus, dan Kasar
Jumlah tumbukan per bidang		50	
Rongga dalam campuran (%)	Min	3,0	
	Maks	5,0	
Rongga dalam Agregat (VMA) (%)	Min	17	
Rasio VCA_{mix} / VCA_{drc}		< 1	
<i>Draindown</i> pada temperatur produksi, % berat dalam campuran (waktu 1 jam)	Maks	0,3	
Stabilitas <i>Marshall</i> (kg)	Min	600	700
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)	Min	2500	3000

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2025)

3.5 Fly Ash

Fly Ash merupakan salah satu jenis limbah yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara di PLTU atau pusat industri lainnya. Limbah FA ini berbentuk abu dengan partikel butiran yang halus menyerupai partikel butiran semen, sehingga dapat dimanfaatkan menjadi bahan pengisi (*filler*) dalam campuran perkerasan jalan untuk menggantikan *filler* tradisional (Anggara dkk., 2021). Berdasarkan SNI 2460:2014, FA dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu kelas F dan kelas C. FA kelas F dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis *bituminous* dan bersifat pozzolanik murni. Jenis ini memiliki kandungan senyawa oksida seperti silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan feri oksida (Fe_2O_3) minimal 70%, serta mengandung sulfur trioksida (SO_3) maksimal 5%. Sementara itu, FA kelas C berasal dari pembakaran batu bara jenis *lignite* atau *sub-bituminous*. Meskipun masih memiliki sifat pozzolanik, FA kelas ini juga menunjukkan karakteristik

semestisius karena mampu bertindak sebagai bahan pengikat, dengan kandungan senyawa utama minimal 50%.

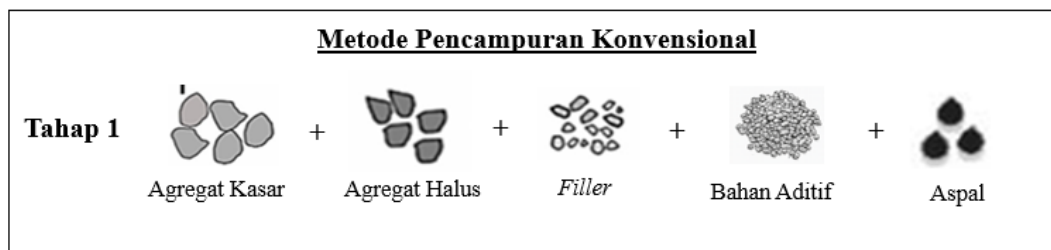
Secara kimia, sifat pozzolanik mengacu pada kemampuan suatu material untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida dan air, sehingga membentuk senyawa yang memiliki daya ikat menyerupai semen (Bahar dan Wiranto, 2024). Namun, dalam campuran aspal, FA tidak berperan melalui reaksi kimia tersebut, melainkan melalui fungsi fisiknya. FA berperan sebagai *filler* halus yang mampu mengisi rongga mikro antar partikel agregat, sehingga dapat meningkatkan kepadatan dan menurunkan porositas campuran. Hal itu juga disebabkan oleh aspal yang tidak memiliki kadar air yang memadai untuk mendukung reaksi pozzolanik, sehingga peran utama FA hanya lebih dominan sebagai bahan pengisi (*filler*).

3.6 Metode Pencampuran Perkerasan

Berikut penjelasan terkait metode pencampuran konvensional, metode pencampuran dua tahap, dan metode pencampuran tiga tahap.

3.6.1 Metode Pencampuran Konvensional

Metode pencampuran konvensional dilakukan dengan memanaskan terlebih dahulu seluruh bahan penyusun campuran, yaitu agregat kasar, agregat halus, *filler*, dan bahan aditif hingga mencapai suhu yang telah ditetapkan. Setelah bahan-bahan tersebut mencapai suhu yang diinginkan, proses selanjutnya adalah penambahan aspal cair yang juga telah melalui proses pemanasan. Adapun ilustrasi tahapan metode pencampuran konvensional dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.

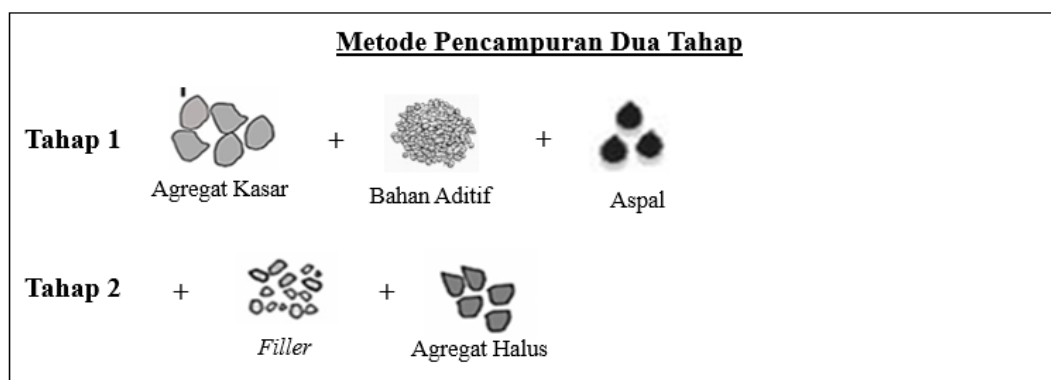


Gambar 3. 2 Ilustrasi Tahapan Metode Pencampuran Konvensional

(Sumber: Modifikasi dari Hesami dkk. (2015))

3.6.2 Metode Pencampuran Dua Tahap

Metode pencampuran dua tahap adalah cara untuk meningkatkan mutu campuran aspal dengan mengubah urutan proses pencampurannya. Pada tahap pertama, agregat kasar dan bahan aditif dicampur terlebih dahulu dengan aspal dalam jumlah yang telah ditentukan. Setelah itu, campuran awal tersebut digabungkan dengan agregat halus dan *filler*. Tujuan dari metode ini adalah agar aspal dapat menempel lebih kuat pada permukaan agregat, sehingga mengurangi kemungkinan butiran agregat terlepas saat terkena air atau kelembapan, serta menghindari terbentuknya debu dan kotoran yang dapat menurunkan kualitas campuran. Adapun ilustrasi tahapan metode pencampuran dua tahap dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.

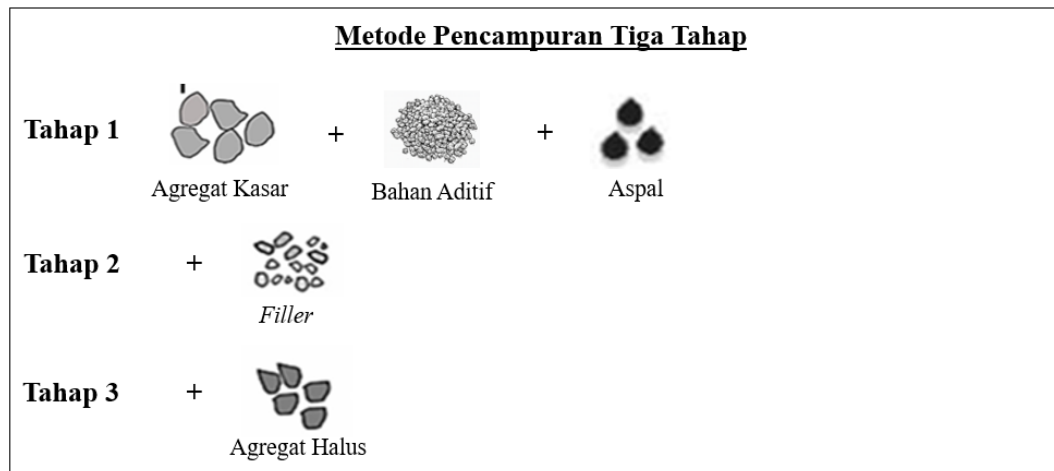


Gambar 3. 3 Ilustrasi Tahapan Metode Pencampuran Dua Tahap

(Sumber: Modifikasi dari Hesami dkk. (2015))

3.6.3 Metode Pencampuran Tiga Tahap

Metode pencampuran tiga tahap diawali dengan pemanasan agregat kasar, bahan aditif dan aspal hingga mencapai suhu tertentu, lalu keduanya dicampur untuk membentuk ikatan awal yang kuat. Selanjutnya ditambahkan *filler* dan diaduk hingga merata, kemudian agregat halus dimasukkan dan dicampur hingga homogen. Metode ini bertujuan untuk meningkatkan kestabilan dan daya lekat campuran, sehingga campuran perkerasan lebih tahan terhadap beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan. Adapun ilustrasi tahapan metode pencampuran tiga tahap dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3. 4 Ilustrasi Tahapan Metode Pencampuran Tiga Tahap

(Sumber: Modifikasi dari Hesami dkk. (2015))

3.7 Tinjauan Karakteristik Volumetrik Campuran SMA

Tinjauan karakteristik volumetrik pada campuran SMA terdiri dari beberapa parameter berikut.

3.7.1 *Voids In Total Mix* (VITM)

VITM merupakan persentase rongga udara yang terdapat dalam total campuran agregat dan aspal setelah proses pemadatan. Besarnya nilai VITM dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti bentuk agregat, gradasi agregat, suhu pemadatan, serta jenis aspal. Apabila nilai VITM berada dalam batas standar yang dipersyaratkan, maka campuran perkerasan memiliki tingkat kestabilan dan daya tahan yang baik terhadap deformasi permanen. Namun, apabila nilai VITM terlalu tinggi, maka rongga udara dalam campuran menjadi berlebihan sehingga sifat campuran menjadi *porous*. Kondisi ini memudahkan air dan udara masuk ke dalam struktur campuran, yang pada akhirnya dapat menurunkan daya lekat antara agregat dan aspal. Sebaliknya, apabila nilai VITM terlalu rendah, maka rongga udara dalam campuran menjadi sangat sedikit sehingga campuran terlalu padat dan kehilangan fleksibilitasnya, yang dapat meningkatkan risiko terjadinya *bleeding*.

Perhitungan dalam menentukan nilai VITM dapat dilakukan dengan Persamaan 3.1 dan 3.2 berikut.

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

$$h = 100 - \left(\frac{100}{\frac{\% \text{ agregat}}{BJ \text{ agregat}} + \frac{\% \text{ aspal}}{BJ \text{ aspal}}} \right) \quad (3.2)$$

dengan:

n = Nilai VITM (%),

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

h = Berat jenis maksimum teoritis campuran.

3.7.2 Voids Filled With Asphalt (VFWA)

VFWA merupakan persentase dari rongga udara dalam campuran yang telah terisi oleh aspal setelah proses pemadatan berlangsung. Nilai VFWA yang tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar rongga terisi aspal, sehingga campuran menjadi lebih kedap terhadap udara dan air. Akan tetapi, apabila nilai VFWA terlalu tinggi akan menimbulkan risiko terjadinya *bleeding*. Sebaliknya, nilai VFWA yang terlalu rendah menunjukkan rongga yang tidak cukup terisi aspal, akibatnya nilai VITM akan menjadi besar, serta menurunkan kedekatan terhadap air dan udara (*porous*) karena lapis *film* aspalnya menjadi tipis.

Perhitungan dalam menentukan nilai VFWA dapat dilakukan dengan Persamaan 3.3 hingga 3.7 berikut.

1. Persentase aspal terhadap 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

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

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

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

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

dengan:

m = Nilai VFWA (%),

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

b = Persentase aspal terhadap campuran (%).

3.7.3 Voids in Mineral Agregate (VMA)

VMA merupakan persentase rongga udara yang terdapat di antara butiran agregat dalam campuran agregat dan aspal setelah dipadatkan, termasuk rongga yang terisi aspal. Nilai VMA biasanya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti gradasi agregat, kadar aspal, tekstur agregat, dan serapan air oleh agregat. Semakin kecil nilai VMA, maka tidak ada rongga udara yang cukup untuk diisi oleh aspal, sehingga nantinya aspal tidak mampu menyelimuti butiran agregat secara maksimal.

Perhitungan dalam menentukan nilai VMA dapat dilakukan dengan Persamaan 3.8 dan 3.9 berikut.

$$l = 100 - j \quad (3.8)$$

$$j = \frac{(100-b) \times g}{BJ \text{ Agregat}} \quad (3.9)$$

dimana:

l = Nilai VMA (%),

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

b = Persemtase aspal terhadap campuran (%).

3.7.4 Kepadatan (*Density*)

Kepadatan (*Density*) merupakan nilai yang menggambarkan seberapa rapat partikel agregat dan aspal yang tersusun setelah proses pemadatan dilakukan. Semakin tinggi nilai *density*, maka semakin padat campuran tersebut, dengan rongga udara yang semakin sedikit di antara partikel penyusunnya. Kepadatan yang optimal sangat penting karena berpengaruh langsung terhadap kekuatan struktur dan ketahanan lapisan perkerasan terhadap beban lalu lintas.

Perhitungan dalam menentukan nilai *density* dapat dilakukan dengan Persamaan 3.10 dan 3.11 berikut.

$$g = \frac{c}{f} \quad (3.10)$$

$$f = d - e \quad (3.11)$$

dengan:

g = *Density* (gr/cc),

c = Berat benda uji sebelum direndam (gr),

d = Berat benda uji dalam keadaan jenuh atau SSD (gr),

e = Berat dalam air (gr), dan

f = Volume / isi (cm³).

3.8 Tinjauan Kekuatan Pada Campuran SMA

Tinjauan kekuatan pada campuran SMA terdiri dari beberapa parameter berikut.

3.8.1 Stabilitas (*Stability*)

Stabilitas (*Stability*) merupakan kemampuan yang dimiliki oleh lapisan perkerasan untuk menahan beban kendaraan lalu lintas tanpa harus mengalami deformasi permanen, seperti pembentukan alur dalam (*rutting*) atau gelombang permukaan. Nilai stabilitas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti tingkat kepadatan campuran aspal yang bergantung pada kualitas agregat, kadar aspal, serta distribusi ukuran agregat. Nilai stabilitas yang tinggi menunjukkan bahwa perkerasan memiliki kekuatan dan kekakuan yang optimal untuk menahan beban yang ada, tanpa risiko kerusakan yang cukup serius.

Perhitungan dalam menentukan nilai stabilitas dapat dilakukan dengan Persamaan 3.12 berikut.

$$q = p \times s \times 0,4536 \quad (3.12)$$

dengan:

q = Stabilitas (kg),

p = Pembacaan arlogi stabilitas x kalibrasi alat,

s = Angka koreksi tebal benda uji, dan

0,4536 = Konversi satuan dari *lb* ke kg.

3.8.2 Kelelehan (*Flow*)

Kelelehan (*Flow*) merupakan proses perubahan bentuk pada suatu campuran aspal yang disebabkan oleh pembebanan yang diberikan hingga mencapai batas keruntuhan. Nilai kelelehan ini diperoleh dengan pembacaan langsung pada *dial flowmeter* yang dinyatakan dalam satuan panjang (mm). Nilai tersebut menunjukkan seberapa besar perubahan vertikal akibat pembebanan, yang terjadi pada saat kondisi stabilitas maksimum. Nilai *flow* yang terlalu tinggi akan cenderung membuat perkerasan mudah mengalami perubahan bentuk permanen, sebaliknya jika nilai *flow* terlalu rendah akan cenderung membuat perkerasan mudah mengalami keretakan, karena campuran memiliki sifat yang lebih kaku.

3.8.3 *Marshall Quotient* (MQ)

Marshall Quotient (MQ) adalah nilai yang diperoleh melalui hasil pembagian antara nilai stabilitas dan nilai *flow*. Nilai MQ ini menunjukkan seberapa besar keseimbangan antara kekuatan dan kelenturan (fleksibilitas) dari suatu campuran aspal. Apabila nilai MQ tinggi (stabilitas tinggi dan *flow* rendah), maka campuran perkerasan akan bersifat lebih kaku, yang berarti campuran memiliki ketahanan terhadap deformasi permanen. Sebaliknya, apabila nilai MQ rendah (stabilitas rendah dan *flow* tinggi), maka campuran perkerasan akan bersifat lebih lentur, yang berarti campuran lebih rentan terhadap deformasi permanen. Oleh karena itu, nilai *flow* menjadi salah satu parameter penting dalam memastikan kekuatan campuran untuk menahan deformasi permanen dan kerusakan akibat beban lalu lintas.

Perhitungan dalam menentukan nilai MQ dapat dilakukan dengan Persamaan 3.13 berikut.

$$MQ = \frac{q}{r} \quad (3.13)$$

dengan:

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

q = Nilai Stabilitas (kg), dan

r = Nilai *Flow* (mm).

3.8.4 *Indirect Tensile Strength (ITS)*

ITS merupakan metode pengujian yang digunakan untuk melakukan pengukuran terhadap besarnya gaya tarik tidak langsung yang dapat diterima oleh campuran aspal. Hasil pengujian ini dapat digunakan untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya retak pada lapisan perkerasan akibat beban tarik berlebihan.

Perhitungan dalam menentukan nilai ITS dapat dilakukan dengan Persamaan 3.14 berikut.

$$ITS = \frac{P_{\text{runtuh}}}{h} \times A_o \times 98,0665 \quad (3.14)$$

dengan:

ITS = Kuat tarik tidak langsung (kPa),

P_{runtuh} = Beban puncak (kg),

h = Tinggi sampel (cm), dan

A_o = Konstanta

3.8.5 *Cantabro Loss (CL)*

CL merupakan metode pengujian yang bertujuan untuk menilai ketahanan benda uji campuran terhadap keausan. Dalam praktiknya, pengujian ini berfungsi untuk mengetahui seberapa baik campuran mampu menahan beban lalu lintas berulang. Proses pengujian ini dilakukan menggunakan mesin *Los Angeles*, dengan benda uji yang telah dipadatkan di kedua sisinya masing-masing sebanyak 50 tumbukan. Selanjutnya, benda uji dimasukkan ke dalam mesin tanpa bola baja dan diputar sebanyak 300 kali. Setelah pemutaran selesai, benda uji dikeluarkan dan ditimbang kembali untuk menentukan persentase kehilangan berat akibat abrasi, dan dibandingkan dengan berat awalnya.

Perhitungan dalam menentukan nilai TSR dapat dilakukan dengan Persamaan 3.15 berikut.

$$CL = \frac{M_o - M_i}{M_o} \times 100 \quad (3.15)$$

dengan:

CL = Persentase kehilangan berat (%),

Mo = Berat sebelum diabrasi (gr), dan

Mi = Berat setelah diabrasi (gr).

3.9 Tinjauan Durabilitas Pada Campuran SMA

Tinjauan durabilitas pada campuran SMA terdiri dari beberapa parameter berikut.

3.9.1 *Index of Retained Strength* (IRS)

IRS merupakan salah satu parameter penting yang menunjukkan persentase nilai stabilitas *Marshall* sisa setelah campuran aspal mengalami proses perendaman. Nilai ini digunakan untuk menilai tingkat ketahanan campuran aspal terhadap kerusakan yang disebabkan oleh pengaruh air. Nilai IRS ini diperoleh melalui uji rendaman (*Immersion Test*), yaitu metode yang bertujuan menilai perubahan karakteristik campuran aspal akibat pengaruh air, suhu, serta kondisi lingkungan. Pada pengujian ini, benda uji direndam dalam dua tahap, yaitu selama 30 menit pada suhu 60°C untuk memperoleh nilai stabilitas standar, dan selama 24 jam pada suhu yang sama untuk mengukur stabilitas setelah perendaman.

Perhitungan dalam menentukan nilai IRS dapat dilakukan dengan Persamaan 3.16 berikut.

$$IRS = \frac{S_2}{S_1} \times 100 \quad (3.16)$$

dengan:

S₁ = Stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 30 menit (kg), dan

S₂ = Stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 24 jam (kg).

3.9.2 *Tensile Strength Ratio* (TSR)

Nilai TSR dihitung dengan membandingkan kekuatan tarik campuran yang telah direndam selama 24 pada *waterbath* bersuhu 60° dengan kekuatan tarik campuran yang telah direndam selama 30 menit pada *waterbath* dengan suhu yang sama, lalu hasil tersebut dikalikan dengan 100.

Perhitungan dalam menentukan nilai TSR dapat dilakukan dengan Persamaan 3.17 berikut.

$$TSR = \frac{T_2}{T_1} \times 100 \quad (3.17)$$

dengan:

T_1 = Nilai ITS setelah perendaman selama 30 menit (kPa), dan

T_2 = Nilai ITS setelah perendaman selama 24 jam (kPa).

3.9.3 *Draindown* (DD)

DD adalah kondisi dimana aspal terlepas dari agregat dan bergerak ke bagian bawah campuran, menyebabkan pemisahan antara keduanya. Pengujian DD dilakukan pada campuran dengan kadar aspal optimum untuk mengetahui seberapa besar aspal yang mengalir ke bawah dalam campuran Berdasarkan SNI 8129:2015, persyaratan nilai DD pada campuran SMA tidak boleh melebihi 0,3% dari total berat campuran.

Perhitungan dalam menentukan nilai DD dapat dilakukan dengan Persamaan 3.18 berikut.

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

dengan:

DD = Nilai *draindown* (%),

A = Berat akhir piring penampung (gr),

B = Berat awal piring penampung (gr), dan

C = Berat awal jumlah campuran yang diuji (gr).

3.10 **Modulus Kekakuan (*Stiffness Modulus*)**

Kekakuan (*Stiffness*) pada campuran perkerasan merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan dari suatu material untuk menahan terjadinya deformasi atau perubahan bentuk akibat beban lalu lintas. Material dengan nilai modulus yang tinggi akan mampu menjaga struktur perkerasan dengan cara meminimalkan terjadinya regangan (lenturan) saat menerima tegangan dari beban

kendaraan. Berikut adalah penjelasan terkait dua jenis kekakuan dalam campuran perkerasan.

3.10.1 *Stiffness Modulus of Bitumen (Sbit)*

Sbit merupakan salah satu karakteristik yang menunjukkan tingkat kekakuan yang dimiliki oleh bahan pengikat dalam campuran. Nilai Sbit ini dipengaruhi oleh sejumlah faktor, seperti durasi pembebanan akibat lintasan roda kendaraan, suhu pada permukaan perkerasan, titik lembek (*softening point*) dari bitumen, serta nilai *Penetration Index* yang mencerminkan sensitivitas bitumen terhadap perubahan suhu.

Menurut *Ullidtz*, perhitungan dalam menentukan nilai Sbit dapat dilakukan dengan Persamaan 3.19 hingga 3.23 berikut.

$$S_{bit} = 1,157 \times 10^{-7} \times t^{-0,368} \times 2,718^{-P_{ir}} \times (S_{pr} - T)^5 \quad (3.19)$$

$$P_r = 0,65 \times P_i \quad (3.20)$$

$$S_{pr} = 98,4 - 26,35 \times \log P_r \quad (3.21)$$

$$P_{ir} = \frac{1951,4 - (500 \times \log(P_r)) - (20 \times S_{pr})}{(50 \log(P_r)) - S_{pr} - 120,4} \quad (3.22)$$

$$t = \frac{1}{V} \quad (3.23)$$

Rumus ini digunakan, apabila terdapat kondisi sebagai berikut.

$$S_{pr} - t = 20^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}$$

$$t = 0,01 \text{ detik s/d } 0,1 \text{ detik}$$

$$P_{ir} = -1 \text{ s/d } +1$$

dengan:

$$P_r = \text{Recovered penetration pada saat suhu } 25^{\circ}\text{C (mm),}$$

$$S_{pr} = \text{Recovered softening point (}^{\circ}\text{C),}$$

$$P_{ir} = \text{Recovered penetration index asphalt,}$$

$$T = \text{Suhu aspal (}^{\circ}\text{C),}$$

$$P_i = \text{Penetrasi aspal (mm),}$$

$$t = \text{Lama pembebanan (detik), dan}$$

$$V = \text{Kecepatan pembebanan (km/jam).}$$

3.10.2 *Stiffness Modulus of Mixture* (S_{mix})

S_{mix} merupakan karakteristik yang menunjukkan seberapa kuat campuran perkerasan jalan dalam menahan beban dari kendaraan. Nilai ini menggambarkan kemampuan dari campuran untuk mendistribusikan beban roda tanpa mengalami deformasi berlebih. Besarnya S_{mix} dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti tingkat kekakuan aspal, kadar aspal, komposisi agregat, serta rongga-rongga dalam campuran.

Menurut *Nottingham*, perhitungan dalam menentukan nilai S_{mix} dapat dilakukan dengan Persamaan 3.24 dan 3.25 berikut

$$S_{mix} = S_{bit} \times \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 \times VMA}{n \times (VMA - 3)} \right)^5 \quad (3.24)$$

dengan:

VMA = *Voids in Mineral Agregate* (%), dan

$$n = 0,83 \times \text{Log} \left(\frac{4 \times 10^4}{S_{bit}} \right) \quad (3.25)$$

3.11 Analisis Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan

Analisis perkiraan umur pelayanan perkerasan merupakan tahapan penting dalam proses perencanaan jalan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan struktur perkerasan dalam menahan beban lalu lintas selama rentang waktu tertentu. Proses analisis ini akan melalui beberapa tahapan utama, yaitu perencanaan desain tebal perkerasan, analisis respons struktur perkerasan menggunakan *software* KENPAVE, serta evaluasi terhadap potensi kerusakan-kerusakan yang akan terjadi.

3.11.1 Perencanaan Desain Tebal Perkerasan

Berdasarkan Surat Edaran No. 15/SE/Db/2024, Direktorat Jenderal Bina Marga menetapkan Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 (No. 03/M/BM/2024) sebagai acuan resmi dalam perencanaan perkerasan jalan di Indonesia. Dokumen ini merupakan dokumen yang menggantikan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017. Hal tersebut dilakukan seiring kebutuhan penyesuaian terhadap perkembangan

regulasi teknis, spesifikasi terbaru, kemajuan teknologi, serta kondisi aktual ketersediaan material konstruksi.

Adapun hal-hal yang perlu ditentukan dan diperhitungkan dalam perencanaan desain tebal perkerasan yang mengacu pada dokumen MDPJ 2024 yaitu sebagai berikut.

1. Data Lalu Lintas

Data lalu lintas merupakan komponen utama dalam desain tebal perkerasan jalan karena menjadi dasar perhitungan beban lalu lintas rencana yang akan diterima perkerasan selama umur layannya. Berdasarkan MDPJ 2024, data ini dikumpulkan melalui survei lalu lintas dengan durasi minimum 7 x 24 jam, baik secara manual sesuai dengan Pedoman Survei Pencacahan Lalu Lintas (Pd T-19-2004-B) maupun menggunakan peralatan lain dengan pendekatan yang sama. Pada tahap analisis, volume lalu lintas pada jam puncak dan nilai Lalu Lintas Harian Rata-rata Tahunan (LHRT) ditentukan dengan mengacu pada Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI) terbaru, yaitu PKJI Tahun 2023. Nilai LHRT sendiri ditentukan dari hasil survei volume lalu lintas yang kemudian dihitung dengan mempertimbangkan faktor K.

2. Umur Rencana Perkerasan

Umur rencana merupakan periode waktu yang dijadikan sebagai acuan dalam proses perancangan struktur perkerasan jalan, agar nantinya perkerasan tersebut tetap mampu mempertahankan kinerjanya secara optimal sebelum memerlukan tindakan rehabilitasi atau rekonstruksi yang bersifat besar. Adapun penentuan umur rencana perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3. 7 Umur Rencana Perkerasan

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (Tahun)
Perkerasan Lentur	Lapisan aspal dan lapisan berbutir	20
	Lapis fondasi jalan	40

Lanjutan Tabel 3. 7 Umur Rencana Perkerasan

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (Tahun)
Perkerasan Lentur	Semua perkerasan untuk lokasi yang tidak dimungkinkan pelapisan ulang (<i>overlay</i>), seperti: jalan perkotaan, <i>underpass</i> , jembatan, dan terowongan	40
	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

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

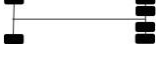
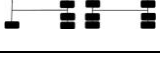
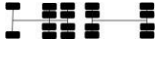
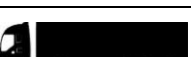
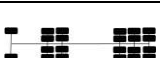
3. Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Variasi beban yang ditimbulkan oleh setiap jenis kendaraan berpengaruh langsung terhadap kondisi perkerasan jalan, dimana kendaraan dengan beban sumbu lebih besar cenderung menimbulkan tingkat kerusakan yang lebih tinggi. Dengan memperhitungkan klasifikasi kendaraan secara tepat, analisis kinerja perkerasan dapat dilakukan dengan lebih akurat dan efektif, sehingga mendukung peningkatan keselamatan serta kenyamanan pengguna jalan. Adapun klasifikasi dan konfigurasi sumbu kendaraan dapat dilihat pada Tabel 3.8 berikut.

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, <i>jeep</i> , dan <i>station wagon</i>	1.1	2		

Lanjutan Tabel 3. 8 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok Sumbu	Skema Konfigurasi	
3	Kendaraan ringan – angkutan umum sedang	1.1	2		
4	Kendaraan ringan – <i>pick up, micro truck</i>	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	11.11	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		
7C2B	Truk 5 sumbu – berat	1.2 – 222	3		
7C3	Truk 6 sumbu – berat	1.22 – 222	3		

Lanjutan Tabel 3. 8 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok Sumbu	Skema Konfigurasi	
7C4	Truk 7 sumbu – berat	1.22 – 2222	3		
8	Kendaraan tak bermotor				

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

4. Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Berdasarkan MDPJ 2024, penentuan faktor pertumbuhan lalu lintas sebaiknya didasarkan pada data pertumbuhan historis (*historical growth data*) atau melalui korelasi dengan variabel pertumbuhan lain yang relevan. Namun, apabila data tersebut tidak tersedia, maka penentuan faktor pertumbuhan lalu lintas dapat ditentukan dengan acuan seperti pada Tabel 3.9 berikut.

Tabel 3. 9 Faktor Laju Petumbuhan Lalu Lintas, i (%)

Klasifikasi	Jawa	Sumatera	Kalimantan	Rata-rata Indonesia
Arteri dan perkotaan	4,80	4,83	5,14	4,75
Kolektor <i>rural</i>	3,50	3,50	3,50	3,50
Jalan desa	1,00	1,00	1,00	1,00

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Pertumbuhan lalu lintas selama umur rencana dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3.26 berikut.

$$R = \frac{(1+0,01 i)^{UR}-1}{0,01 i} \quad (3.26)$$

dengan:

R = Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif,

i = Laju pertumbuhan lalu lintas tahunan (%), dan

UR = Umur rencana (tahun).

5. Faktor Distribusi Arah (DD)

Pada jalan dua arah, nilai faktor distribusi arah (DD) umumnya ditetapkan sebesar 0,50 (50%), yang menunjukkan bahwa volume lalu lintas diasumsikan terbagi merata antara kedua arah. Meskipun demikian, nilai tersebut dapat diubah apabila kondisi lapangan menunjukkan ketidakseimbangan arus, khususnya ketika salah satu arah didominasi kendaraan niaga, seperti pada jalan menuju kawasan industri atau jalur logistik satu arah. Dalam situasi tersebut, nilai DD dapat ditetapkan lebih tinggi pada arah dominan untuk menghasilkan desain yang lebih akurat dan aman.

6. Faktor Distribusi Lajur (DL)

Faktor distribusi lajur (DL) digunakan untuk menyesuaikan perhitungan beban kumulatif pada ruas jalan yang memiliki dua atau lebih lajur dalam satu arah. Faktor ini memperhitungkan kecenderungan distribusi kendaraan, terutama kendaraan niaga pada lajur tertentu, sehingga estimasi beban kumulatif per lajur dapat dihitung lebih tepat. Namun, apabila data faktor distribusi lajur tidak tersedia, maka dapat berpedoman pada Tabel 3.10 berikut.

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)

7. Faktor Ekuivalen Beban

Pada proses perancangan perkerasan, beban lalu lintas dikonversi menjadi beban standar atau *Equivalent Standard Axle* (ESA) melalui penggunaan faktor ekuivalen beban atau *Vehicle Damage Faktor* (VDF). Nilai VDF diperoleh dari akumulasi ESA pada seluruh kelompok sumbu kendaraan, sehingga berbagai jenis kendaraan dengan konfigurasi dan besaran beban

sumbu yang berbeda dapat diterjemahkan ke dalam total beban ESA yang setara. Nilai VDF penting untuk menilai kerusakan perkerasan karena dapat menunjukkan kontribusi tiap jenis kendaraan terhadap kerusakan. Untuk memperoleh desain yang akurat, diperlukan perhitungan beban lalu lintas yang tepat, sehingga idealnya dilakukan survei beban gandar. Namun jika data tersebut tidak tersedia atau survei tidak dapat dilakukan, maka nilai VDF bisa diambil dari referensi yang ada.

Pada penelitian ini, desain tebal perkerasan dilakukan pada Ruas Jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab.Sarolangun – Pauh, Provinsi Jambi, sehingga digunakan nilai VDF seperti pada Tabel 3.11 berikut.

Tabel 3. 11 Faktor Ekuivalen Beban Wilayah 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
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)

8. Beban Sumbu Standar Kumulatif

Beban sumbu standar atau *Cumulative Equivalent Standard Axle Load* (CESAL) merupakan jumlah keseluruhan beban sumbu lalu lintas rencana yang melewati lajur desain selama umur rencana perkerasan. Nilai ini digunakan untuk menunjukkan besarnya beban lalu lintas yang harus dipikul oleh struktur perkerasan, sehingga menjadi parameter utama dalam menilai kebutuhan kekuatan dan ketahanan perkerasan terhadap beban jangka panjang. Adapun perhitungan CESAL dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.27 berikut.

$$\text{CESAL} = (\sum \text{LHR}_{\text{JK}} \times \text{VDF}_{\text{JK}}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \quad (3.27)$$

dengan:

LHR_{JK} = Lintas harian rata – rata tiap jenis kendaraan niaga (kend/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.

9. Pemilihan Jenis Perkerasan

Pada tahap pemilihan jenis perkerasan, perbedaan utama terletak pada aspek struktur perkerasan, termasuk perbedaan bagan desain, serta variasi besarnya nilai ESA5 selama umur rencana. Alternatif desain tebal perkerasan yang dipilih harus mempertimbangkan nilai *discounted lifecycle cost* paling rendah agar solusi yang diperoleh efisien dan berkelanjutan. Adapun pemilihan jenis perkerasan mengacu 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	-	-	-

Lanjutan Tabel 3. 12 Pemilihan Jenis Perkerasan

Struktur Perkerasan	Bagan Desain	ESA5 (Juta) dalam 20 Tahun				
		0 – 1	1 – 4	4 – 10	> 10 – 30	> 30
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)

10. Bagan Desain Tebal Perkerasan Lentur

Desain tebal perkerasan lentur merupakan tahapan penting dalam perencanaan jalan karena berfungsi untuk menentukan ketebalan setiap lapisan agar struktur perkerasan mampu bertahan sepanjang umur rencananya. Berdasarkan MDPJ 2024, bagan desain disusun untuk membantu merumuskan kebutuhan ketebalan berdasarkan berbagai parameter teknis yang mempengaruhi kinerja perkerasan. Parameter utama meliputi LHR, jenis kendaraan, CESAL serta mutu material penyusun lapisan perkerasan. Bagan desain MDPJ 2024 ini menyediakan berbagai alternatif ketebalan perkerasan sesuai kondisi lalu lintas selama umur rencana. Melalui pendekatan regresi yang mengaitkan repetisi beban dengan tebal lapisan yang dibutuhkan, bagan tersebut memastikan bahwa struktur perkerasan mampu menahan beban secara optimal serta meminimalkan risiko kerusakan seperti retak leleh, retak alur, maupun deformasi permanen. Adapun bagan desain yang digunakan untuk perencanaan tebal perkerasan lentur dapat dilihat pada Tabel 3.13 sampai Tabel 3.22 berikut.

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 (10 ⁶ 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(3) Desain Perkerasan Lentur dengan 250 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)

	STRUKTUR PERKERASAN						
	F(3) 1	F(3) 2	F(3) 3	F(3) 4	F(3) 5	F(3) 6	F(3) 7
	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 - 9	> 9 - 15	> 15 -30	> 30 - 50	> 50 - 75	> 75 - 110	> 110 - 200
Jenis permukaan berpengikat	AC						
Jenis lapis fondasi	Cement Treated Base (CTB)						
Tebal Perkerasan (mm)							
AC WC	40	50	50	40	40	40	40
AC BC	60	70	80	60	70	65	80
	-	-	-	70	-	-	-
AC Base ⁽¹⁾	-	-	-	-	80	100	100
	-	-	-	-	-	-	-
CTB	250	250	250	250	250	250	250
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	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

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 16 Bagan Desain-3(4) Desain Perkerasan Lentur dengan 300 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)

	STRUKTUR PERKERASAN							
	F(4) 1	F(4) 2	F(4) 3	F(4) 4	F(4) 5	F(4) 6	F(4) 7	F(4) 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	50	50	50	40	40	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. 17 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	FFF(1) 9
	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	> 150 - 200
Tebal Perkerasan (mm)									
AC WC	60 ⁽²⁾	40	40	40	40	40	40	50	40
AC BC	-	65	75	75	60	60	75	80	60
	-	80	80	-	-	-	-	-	-
AC Base ⁽³⁾	-	-	-	100	80	85	100	100	80
	-	-	-	-	80	100	100	100	80
	-	-	-	-	-	-	-	-	90
Lapis Fondasi Agregat Kelas A ⁽⁴⁾	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	150	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	200

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

**Tabel 3. 18 Bagan Desain-3B Penyesuaian Tebal Lapis Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilitas Semen
(Hanya untuk Bagan Desain-3A) Beban Rencana 20 Tahun > 5 Juta ESA 5**

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

Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan (2024)

Tabel 3. 19 Bagan Desain-4 Desain Perkerasan Lentur dengan HRS

Kumulatif Beban Sumbu 20 Tahun Pada Lajur Rencana (10^6 CESA 5)	$\text{FF1} < 0,5$	$0,5 \leq \text{FF2} \leq 4,0$
Jenis Permukaan	HRS atau Penetrasi Makadam	HRS²
Struktur Perkerasan	Tebal Lapisan (mm)	
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. 20 Bagan Desain-5 Perkerasan Berbutir dengan Laburan

	STRUKTUR PERKERASAN		
	SD1	SD2	SD3
	Kumulatif Beban Rencana (ESA4 x 10 ⁶)		
	< 0,1	0,1 – 0,5	> 0,5 - 4
Burda			
Lapis Fondasi Agregat Kelas A ²	200	250	300
Lapis Fondasi Agregat Kelas B, atau kerikil alam, atau stabilisasi dengan CBR > 10%, pada subgrade dengan CBR ≥ 5% ^{2,5}	100	110	140

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 21 Bagan Desain-6 Perkerasan dengan Stabilisasi Tanah Semen (*Soil Cement*)

	STRUKTUR PERKERASAN		
	SC1	SC2	SC3
	Beban Sumbu 20 Tahun Pada Lajur Desain (ESA4 x 10 ⁶)		
	< 0,1	0,1 – 0,5	> 0,5 - 4
	Ketebalan Lapis Perkerasan (mm)		
HRS-WC, AC-WC			50
Lapis Fondasi Tanah Semen Target UCS 2,4 MPa	160	220	300

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

Tabel 3. 22 Bagan Desain-7 Perkerasan dengan *Improve Subgrade* Stabilisasi Semen

	STRUKTUR PERKERASAN		
	SC1	SC2	SC3
	Beban Sumbu 20 Tahun Pada Lajur Desain (ESA4 x 10 ⁶)		
	< 0,1	0,1 – 0,5	> 0,5 - 4
	Ketebalan Lapis Perkerasan (mm)		
HRS-WC, AC-WC	50		
Lapis Fondasi Agregat Kelas A	160	220	300
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	110	150	200
Stabilisasi tanah asli hingga mencapai CBR ekuivalen 6%	160	200	260

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

3.11.2 Analisis Respons Struktur Perkerasan Menggunakan *Software* KENPAVE

KENPAVE merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh Dr. Yang H. Huang. P. E., *Professor Emeritus of Civil Engineering University of Kentucky*. *Software* ini dirancang untuk mempermudah dalam melakukan analisis respons struktur hasil desain perkerasan jalan, baik untuk perkerasan lentur maupun perkerasan kaku. Data *input* yang dibutuhkan untuk menjalankan *software* ini yaitu terdiri dari modulus elastisitas, *poisson ratio*, tebal lapis perkerasan, serta kondisi pembebanan lalu lintasnya (Marlina dkk., 2023). Adapun tampilan awal dari *software* KENPAVE dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut.



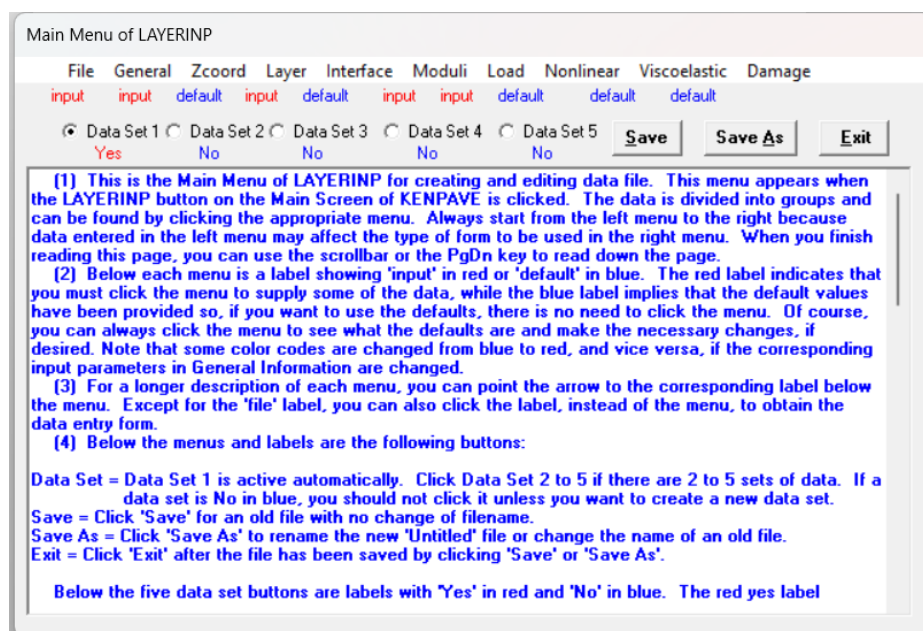
Gambar 3. 5 Tampilan Awal *Software* KENPAVE

Berdasarkan Gambar 3.5, *software* KENPAVE ini terdiri dari empat menu utama yang digunakan untuk mengetahui respons dari struktur perkerasan, yaitu LAYERINP, KENLAYER, SLABSINP, dan KENSLABS. Menu LAYERINP merupakan bagian yang berfungsi sebagai tempat penginputan data untuk analisis perkerasan lentur dan KENLAYER merupakan bagian yang berfungsi untuk menampilkan respon struktur perkerasan lentur terhadap beban lalu lintas dengan data input yang telah dilakukan pada LAYERINP. Sedangkan SLABSINP

digunakan sebagai tempat penginputan data untuk analisis perkerasan kaku dan KENSLABS untuk menampilkan respon struktur perkerasan kaku terhadap beban lalu lintas dengan data input yang telah dilakukan pada *SLABSINP*.

Menu KENLAYER memiliki prinsip dasar yang berlandaskan pada teori sistem struktur lapisan ganda (*multi-layer system theory*), yang mampu memodelkan perkerasan sebagai susunan beberapa lapisan dengan karakteristik material yang berbeda. KENLAYER mampu menganalisis perilaku masing-masing lapisan yang bersifat linear, non-linear, maupun viskoelastik, serta dapat mensimulasikan pengaruh berbagai konfigurasi sumbu roda, seperti sumbu tunggal roda tunggal, sumbu tunggal roda ganda, sumbu tandem, hingga sumbu tripel.

Sebelum mendapatkan hasil analisis dari program KENLAYER, langkah pertama yang harus dilakukan adalah memasukkan data awal pada bagian LAYERINP. Pada tahap ini, pengguna diminta untuk mengisi sejumlah parameter yang diperlukan dalam proses perhitungan. Beberapa menu pada bagian KENLAYER berisi parameter utama yang wajib diinput, sementara lainnya merupakan parameter bawaan program yang tidak memerlukan pengisian manual. Adapun tampilan awal dari LAYERINP yaitu dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut.

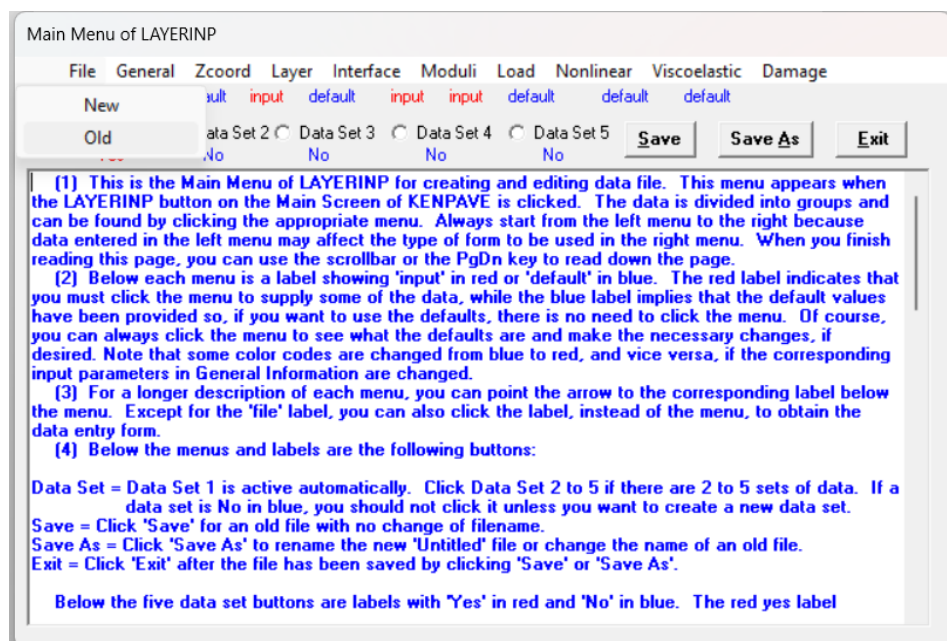


Gambar 3. 6 Tampilan Awal LAYERINP

Berikut ini adalah penjelasan dari menu-menu yang ada dalam bagian *LAYERINP*.

1. *File*

Menu ini digunakan untuk menentukan *file* yang akan diproses dalam program. Opsi *New* digunakan untuk membuat *file* analisis baru, sedangkan *Old* dipilih apabila ingin membuka *file* analisis yang sudah ada sebelumnya. Adapun tampilan menu *file* dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.



Gambar 3. 7 Tampilan Menu *File*

2. *General*

Menu ini berisi informasi umum mengenai struktur perkerasan yang akan dianalisis. Adapun tampilan menu *general* dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE

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)	5
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)	0

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. 8 Tampilan Menu *General*

Berikut adalah penjelasan dari beberapa parameter yang perlu dimasukkan dalam menu *general*.

a. *Title*

Bagian yang berfungsi untuk mencantumkan nama atau judul analisis yang sedang dilakukan.

b. MATL

Penentuan jenis material yang digunakan. Nilai (1) jika semua lapisan bersifat linier elastik, (2) jika lapisan non-linier elastik, (3) jika lapisan viskoelastik, dan (4) jika lapisan terdapat kombinasi dari ketiganya.

c. NDAMA

Menentukan opsi analisis kerusakan. Nilai (0) jika tidak dilakukan analisis kerusakan, (2) jika dilakukan analisis kerusakan dengan hasil keluaran standar, dan (3) jika dilakukan analisis kerusakan dengan hasil keluaran yang lebih detail.

d. DEL

Menunjukkan tingkat ketelitian hasil analisis, dengan standar nilai 0,001.

e. NL

Menunjukkan jumlah lapisan perkerasan yang dianalisis, dengan batas maksimum 19 lapisan.

f. NZ

Menentukan koordinat arah vertikal (Z) yang akan ditinjau. Jika nilai NDAMA = 1 atau 2, maka NZ = 0, karena program otomatis meninjau titik analisis kerusakan.

g. NSTD

Menentukan jenis keluaran hasil analisis. Nilai (1) hanya untuk lendutan vertikal, (5) untuk lendutan dan tegangan vertikal, sedangkan (9) untuk lendutan, tegangan, dan regangan vertikal sekaligus.

h. NBOND

Menentukan hubungan antar lapisan. Nilai (1) berarti semua lapisan saling merekat (terikat sempurna), sedangkan (2) berarti antar lapisan tidak terikat.

i. NUNIT

Menentukan sistem satuan yang digunakan. Nilai (0) untuk satuan Inggris dan (1) untuk satuan SI. Adapun perbedaan sistem satuan Inggris dan SI dapat dilihat pada Tabel 3.23 berikut.

Tabel 3. 23 Satuan *English* dan SI

Satuan	<i>English</i>	SI
Panjang	Inch	cm
Tekanan	Psi	kPa
Modulus	Psi	kPa

3. *Zcoord*

Jumlah titik dalam menu *Zcoord* mengikuti nilai NZ yang diatur pada menu *General*. Parameter ZC menunjukkan posisi vertikal (arah Z) dari titik-titik yang akan dianalisis oleh program. Adapun tampilan menu *Zcoord* dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut.

Unit cm

Point No.	ZC
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

(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.

OK

Gambar 3. 9 Tampilan Menu *Zcoord*

4. *Layer*

Menu *layer* merupakan menu yang berfungsi untuk memasukkan data dari setiap lapisan perkerasan yang akan dianalisis. Data yang dimasukkan meliputi tebal lapisan (*Thickness/TH*) dan rasio poisson (*Poisson's Ratio/PR*) dari masing-masing lapisan perkerasan. Adapun tampilan menu *layer* dapat dilihat pada Gambar 3.10 berikut.

Unit cm kN/m³

Layer No.	TH	PR
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	XXXXXXXXXX	0

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

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. 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. 10 Tampilan Menu *Layer*

Data tebal lapisan dimasukkan sesuai dengan data hasil desain tebal perkerasan berdasarkan MDPJ 2024 sebelumnya. Sedangkan nilai PR yang merupakan perbandingan antara regangan horizontal (*lateral strain*) dan regangan vertikal (*vertical strain*) yang timbul akibat pembebanan sumbu sejajar maupun regangan aksial diperoleh dengan mengacu pada MDPJ 2024 seperti pada Tabel 3.24 berikut.

Tabel 3. 24 Nilai *Poisson's Ratio*

Jenis Bahan	Rasio Poisson
HRS – WC	0,4
HRS – BC	0,4
AC – WC (2 x 75 tumbukan)	0,4
AC – WC (2 x 50 tumbukan)	0,4
AC – BC (2 x 75 tumbukan)	0,4
AC – Base (2 x 75 tumbukan)	0,4
AC – WC PG70 (2 x 75 tumbukan)	0,4
AC – BC PG70 (2 x 75 tumbukan)	0,4
Bahan bersemen (CTB)	0,2
Bahan bersemen (CTB)	0,20 (mulus)
	0,35 (retak)
Tanah dasar (disesuaikan musim)	0,45 (tanah kohesif)
	0,35 (tanah non-kohesif)

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

5. *Interface*

Menu *Interface* berkaitan dengan parameter NBOND pada menu *General*. Jika NBOND = 1 (lapisan saling terikat), maka pengaturan *Interface* akan otomatis mengikuti nilai *default*. Sedangkan jika NBOND = 2 (lapisan tidak terikat), maka menu *Interface* akan aktif untuk pengaturan tambahan. Adapun tampilan menu *Interface* jika nilai NBOND = 2 dapat dilihat pada Gambar 3.11 berikut ini.

Interface No.	INT
1	0
2	0
3	0
4	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. After the last cell is filled, be sure to click the Enter key.
 (4) You cannot delete or add a line on this form.
 (5) Upon completion, click the OK button at the lower right corner to return to the Main Menu of LAYERINP.

OK

Gambar 3. 11 Tampilan Menu *Interface*

6. *Moduli*

Jumlah data dalam menu *moduli* sesuai dengan nilai NPY pada menu *General*. Maksimal dapat dimasukkan hingga 12 periode. Parameter utama yang dimasukkan adalah nilai E, yaitu nilai modulus elastisitas dari setiap lapisan perkerasan. Adapun tampilan dari menu *moduli* dapat dilihat pada Gambar 3.12 dan Gambar 3.13 berikut ini.

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. 12 Tampilan Menu *Moduli*

Layer Moduli for Period No. 1 and Data Set No. 1

Unit kPa

Layer No.	E
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0

(1) This form appears when the period button on the Layer Modulus of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu.

(2) E (elastic modulus of each layer): Use as the assumed modulus for the first iteration when the layer is nonlinear. If more convenient, you can enter the modulus in exponential form such as 1.234E5. Assign 0 or any value for viscoelastic layer.

(3) After typing the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key. After the last cell is filled, be sure to click the Enter 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 NL in the 'general' menu 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 NL in the 'General' menu will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NL in the 'General' menu by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that always use the <Ctrl>-<Ins>

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

OK

Gambar 3. 13 Tampilan Menu *Period*

Modulus elastisitas atau yang sering disebut sebagai Modulus Young merupakan rasio antara tegangan dan regangan pada suatu material yang bersifat elastis, yaitu material yang mampu kembali ke bentuk semula setelah mengalami peregangan maupun penekanan (Prakaryuda dkk., 2021). Nilai modulus elastisitas yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada MDPJ 2024 seperti pada Tabel 3.25 berikut.

Tabel 3. 25 Nilai Modulus Elastisitas

Jenis Bahan	Modulus Tipikal
HRS – WC	800 MPa
HRS – BC	900 MPa
AC – WC (2 x 75 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 cranking</i>)
Bahan bersemen (CTB)	500 MPa retak (<i>post cracking</i>)
Tanah dasar (d disesuaikan musim)	10 x CBR (MPa)

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2024)

7. Load

Jumlah beban pada menu ini disesuaikan dengan nilai NLG di menu *General*.

Adapun tampilan dari menu *load* dapat dilihat pada Gambar 3.14 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	NR or NPT
1	0	0	0	0	0	

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. 14 Tampilan Menu *Load*

Berikut adalah penjelasan dari beberapa parameter yang perlu dimasukkan dalam menu *load*.

a. Load

Memasukkan nilai (0) jika sumbu tunggal dengan roda tunggal, (1) jika sumbu tunggal dengan roda ganda, (2) jika sumbu tandem, dan (3) jika sumbu tripel.

b. Contact Radius (CR)

CR adalah lebar area kontak pembebanan.

c. Contact Pressure (CP)

CP adalah besar beban yang diterapkan.

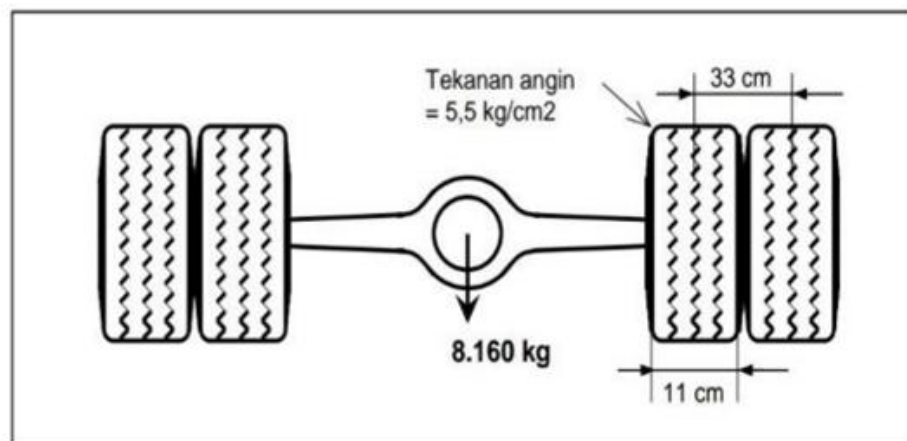
d. YW dan XW

Jarak antar roda dalam arah lateral (Y) dan memanjang (X), Jika *load* = 0, maka YW dan XW bernilai 0.

e. *Number or Repetitions (NR)* atau *Number of Points (NPT)*

NR atau NPT merupakan titik-titik koordinat yang digunakan untuk analisis tegangan dan regangan pada perkerasan.

Pada menu *load*, parameter yang perlu dimasukkan mencakup data sumbu standar, yaitu sumbu tunggal beroda ganda sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.15. Parameter tersebut meliputi beban sumbu, lebar area kontak pembebanan, serta tekanan yang diterapkan pada bidang kontak. Berdasarkan Sukirman (2010), Bina Marga menetapkan kriteria sumbu standar yang digunakan dalam analisis perkerasan, yaitu beban sumbu standar sebesar 8.160 kg, tekanan roda untuk satu ban (CP) sebesar 550 kPa, lebar bidang kontak (CR) sebesar 11 cm, dan jarak antar roda ganda (YW) sepanjang 33 cm. Adapun konfigurasi sumbu standar dapat dilihat pada Gambar 3.15 berikut.

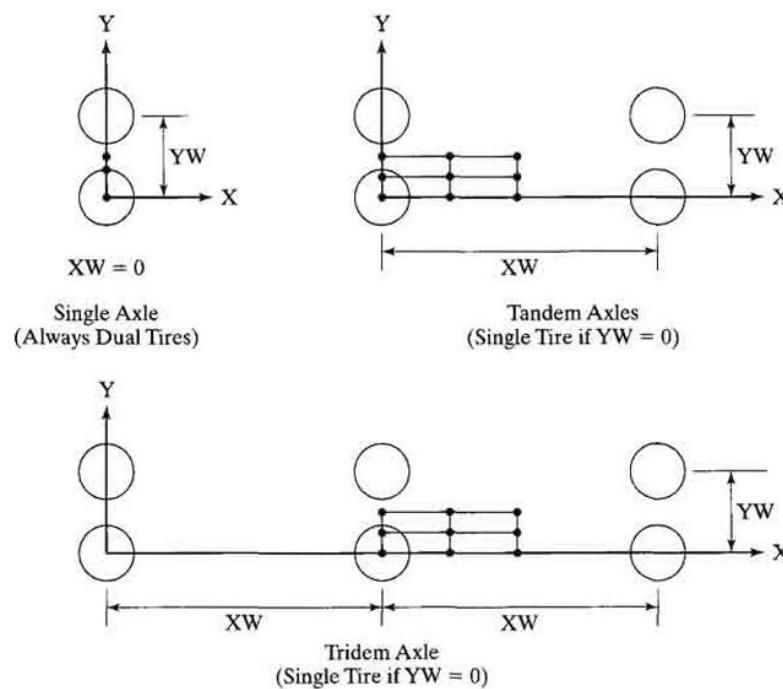


Gambar 3. 15 Konfigurasi Sumbu Standar

(Sumber: Sukirman, 2010)

Berdasarkan *plan view of multiple wheels* yang dikemukakan oleh Huang (2004), nilai YW perlu ditetapkan untuk konfigurasi sumbu tunggal beroda ganda, sedangkan nilai XW digunakan apabila analisis melibatkan sumbu tandem maupun sumbu tripel. Selain itu, analisis menggunakan *software* KENPAVE juga memerlukan titik evaluasi. Titik evaluasi merupakan posisi tertentu yang berada di permukaan perkerasan untuk digunakan sebagai acuan dalam menghitung respons berupa tegangan, regangan, serta lendutan.

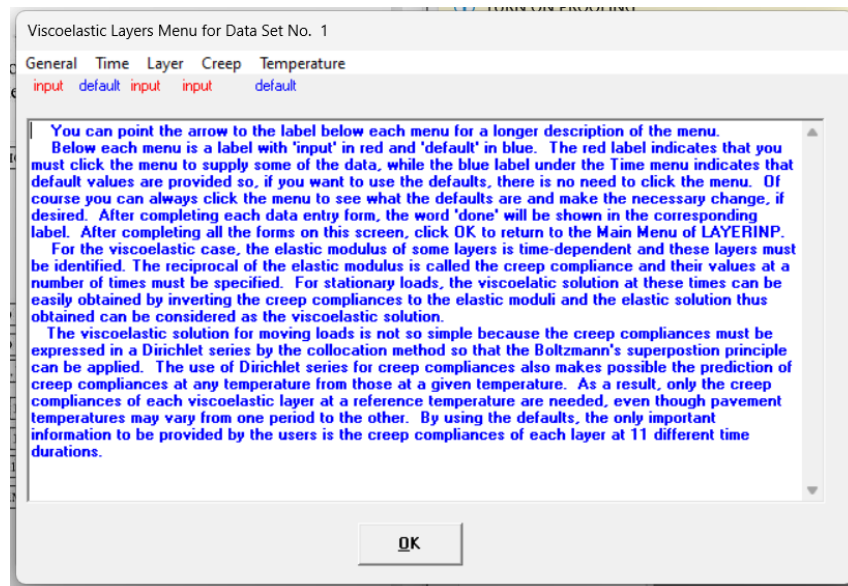
Berpedoman pada *plan view of multiple wheels* juga, titik evaluasi itu terdiri dari 0 mm (posisi tengah ban), 10 mm (posisi tepi ban), dan 16,5 mm (posisi ditengah gandar atau diantara roda ganda). Titik-titik tersebut kemudian dimasukkan sebagai data *input* pada bagian NR atau NPT untuk memastikan bahwa simulasi respons struktur perkerasan dapat menggambarkan kondisi pembebanan di lapangan secara lebih akurat. Adapun ilustrasi *plan view of multiple wheels* dapat dilihat pada Gambar 3.16 berikut.



Gambar 3. 16 Plan View of Multiple Wheels

(Sumber: Huang, 2004)

Selanjutnya, penelitian ini akan melakukan analisis berbasis pemodelan viskoelastik, dimana respons material akan dipengaruhi oleh lamanya waktu pembebanan. Pemilihan jenis pemodelan ini akan mengaktifkan menu *viscoelastic* pada program LAYERINP. Adapun tampilan awal pada menu *viscoelastic* yaitu dapat dilihat pada Gambar 3.17 berikut.



Gambar 3. 17 Tampilan Awal Menu *Viscoelastic*

Berikut ini adalah tampilan dan penjelasan mengenai parameter – parameter yang harus dimasukkan pada menu *viscoelastic*.

1. Menu *General Viscoelastic*

Pada menu ini akan dimasukkan parameter data yang berkaitan dengan lapisan *viscoelastic* yang akan dianalisis. Adapun tampilan dari menu ini dapat dilihat pada Gambar 3.18 berikut.

Load duration (0 for stationary load, 0.1 sec for moving load at 40 mph)	(DUR)	0.1
Number of viscoelastic layers	(NVL)	1
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.

Gambar 3. 18 Tampilan Menu *General Viscoelastic*

Berikut adalah penjelasan dari beberapa parameter yang perlu dimasukkan dalam menu *general viscoelastic*.

a. *Load Duration* (DUR)

Memasukkan nilai (0) jika beban merupakan beban diam, dan nilai (0,1) jika beban bergerak pada kecepatan 40 mph.

b. *Number of Viscoelastic* (NVL)

Memasukkan jumlah lapisan perkerasan yang bermaterial *viscoelastic*.

c. *Number of Time Duration for Creep Compliances* (NYTME)

Memasukkan nilai banyaknya waktu perhitungan *creep compliances*.

2. Menu *Time Viscoelastic*

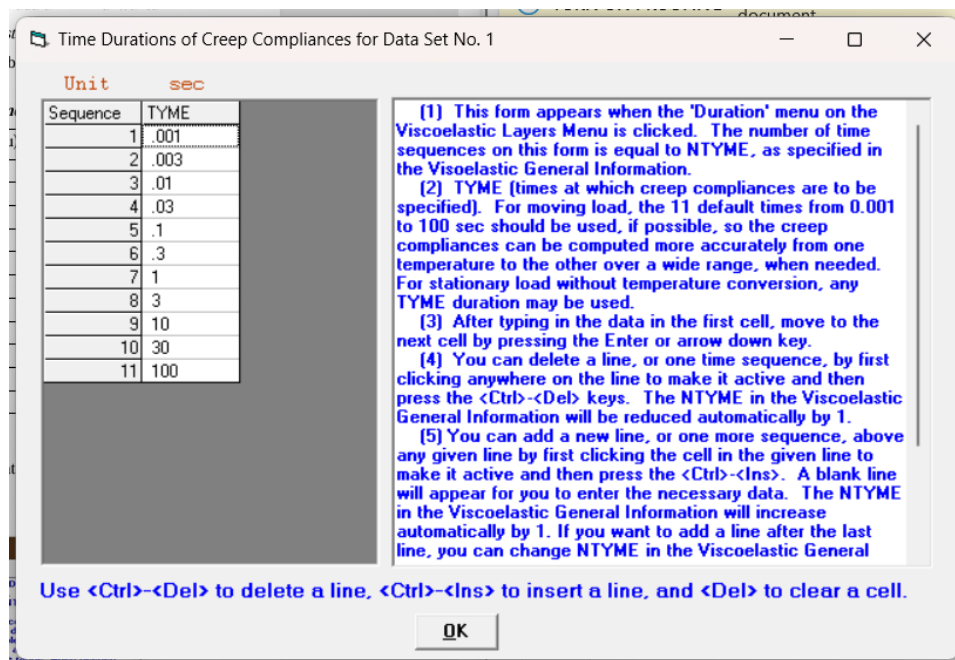
Pada beban bergerak (*moving load*), disarankan untuk menggunakan 11 waktu bawaan (*default*) yang sudah tersedia dalam program, yaitu dari 0,001 hingga 100 detik agar *creep compliances* dapat dihitung dengan lebih akurat, terutama jika diperlukan analisis perubahan kinerja material pada rentang temperatur yang luas. Sedangkan pada beban diam (*stationary load*), selama tidak ada konversi temperatur, maka bebas memilih waktu berapa pun, karena tidak diperlukan akurasi tambahan untuk perubahan temperatur. Adapun data 11 waktu bawaan (*default*) dapat dilihat pada Tabel 3.26 Berikut.

Tabel 3. 26 Waktu Bawaan (*Default*)

<i>Sequence</i>	<i>Time (Waktu)</i>
1	0,001
2	0,003
3	0,01
4	0,03
5	0,1
6	0,3
7	1
8	3
9	10
10	30
11	100

Sumber: Huang (2004)

Berikut merupakan tampilan menu *time viscoelastic* untuk kondisi beban bergerak dengan menggunakan waktu bawaan dapat dilihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3. 19 Tampilan Menu *Time Viscoelastic*

3. Menu *Layer Viscoelastic*

Parameter yang perlu dimasukkan pada menu *layer viscoelastic* terdiri dari nilai LAYNO, BETA (β) dan TEMPREF ($^{\circ}\text{C}$). LAYNO menunjukkan nomor lapisan dalam sistem lapisan yang menerapkan sifat viskoelastis. BETA merupakan *time – temperatur shift factor* yang berfungsi untuk menyesuaikan nilai *creep compliances* pada kondisi temperatur tertentu. Sementara itu, TEMPREF merupakan temperatur referensi yang digunakan dalam perhitungan *creep compliances*. Adapun tampilan dari menu *layer viscoelastic* ini dapat dilihat pada Gambar 3.20 berikut.

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	.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. 20 Tampilan Menu *Layer Viscoelastic*

4. Menu *Creep*

Pemodelan viskoelastik direpresentasikan melalui nilai *creep compliances*. *creep compliances* merupakan rasio antara regangan dan tegangan yang menggambarkan besarnya deformasi yang terjadi secara berkelanjutan pada suatu material ketika menerima pembebanan selama jangka waktu tertentu. Nilai *creep compliances* ini menjadi pembeda antara pemodelan viskoelastik dengan pemodelan lainnya, seperti pemodelan elastik. Jumlah lapisan perkerasan yang membutuhkan nilai *creep compliances* akan menyesuaikan nilai NVL yang telah dimasukkan pada menu *general viscoelastic*. Waktu yang digunakan sesuai dengan waktu yang telah dimasukkan pada *time viscoelastic*. Berikut tampilan dari menu *creep* yang dapat dilihat pada Gambar 3.21.

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

Unit per kPa

TYME	CREEP
0.001	0
0.003	0
0.01	0
0.03	0
0.1	0
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. 21 Tampilan Menu *Creep*

Nilai *creep compliances* diperoleh melalui proses perhitungan. Penentuan nilai tersebut untuk setiap durasi waktu dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.28 berikut ini.

$$D(t) = \frac{1}{E} (1 - e^{-0,833 t}) \quad (3.28)$$

dengan:

$D(t)$ = *Creep compliances* (kPa),

t = Durasi waktu (detik),

E = Modulus elastisitas setiap lapisan (kPa), dan

e = Konstanta e

5. Menu *Temperature*

Parameter data yang perlu dimasukkan pada menu *temperature* adalah temperatur referensi yang digunakan sebagai acuan dalam analisis, dan nilainya harus konsisten dengan temperatur referesi yang telah ditetapkan pada menu *layer viscoelastic*. Adapun tampilan dari menu *temperature* dapat dilihat pada Gambar 3.22 berikut.

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

Unit C

Layer No.	TEMP
1	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. 22 Tampilan Menu *Temperature*

3.11.3 Analisis Tingkat Kerusakan dan Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan

Setelah dilakukan analisis respons struktur perkerasan menggunakan *software* KENPAVE berbasis pemodelan viskoelastik dan mendapatkan nilai tegangan dan regangan maksimum sesuai dengan titik yang ditinjau, maka selanjutnya akan dilakukan analisis perhitungan untuk memperkirakan tingkat kerusakan dan umur layan perkerasan. Analisis ini berfokus pada tiga jenis kerusakan utama, yaitu retak lelah (*fatigue cracking*), retak alur (*rutting*), dan deformasi permanen (*permanent deformation*). Ketiga jenis ini umumnya terjadi akibat beban berulang dari lalu lintas kendaraan yang bekerja pada struktur perkerasan. Adapun penjelasan dari tiga jenis kerusakan utama pada struktur perkerasan jalan yaitu sebagai berikut.

1. *Fatigue Cracking*

Fatigue cracking (retak lelah) merupakan jenis kerusakan yang timbul akibat pembebanan berulang yang menyebabkan material perkerasan kehilangan kemampuan menahan tegangan tarik, meskipun besarnya tegangan masih berada di bawah batas kekuatan ultimatnya. Kerusakan ini biasanya berkembang dari dasar lapisan beraspal, kemudian merambat ke permukaan

hingga membentuk pola retak menyerupai kulit buaya (*alligator cracking*). Menurut *The Asphalt Institute* (1982), hubungan antara jumlah repetisi beban yang diizinkan (N_f) dan regangan tarik pada dasar lapisan permukaan (ϵ_t) dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.29 berikut.

$$N_f = 0,0796 \times \epsilon_t^{-3,921} \times E^{-0,854} \quad (3.29)$$

dengan:

N_f = Jumlah siklus beban yang diizinkan hingga terjadi retak lelah (ESAL),

ϵ_t = Regangan tarik pada bagian bawah lapisan permukaan (cm), dan

E = Modulus elastisitas pada lapis permukaan (kPa).

2. *Rutting*

Rutting (retak alur) merupakan bentuk kerusakan perkerasan yang berupa cekungan atau alur memanjang di jalur lintasan roda kendaraan. Kerusakan ini terjadi akibat akumulasi pembebanan berulang yang menyebabkan lapisan perkerasan tidak mampu kembali ke kondisi semula atau dapat dikatakan mengalami perubahan bentuk secara permanen. Kondisi ini biasanya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti campuran perkerasan tidak cukup stabil menahan beban lalu lintas, suhu lingkungan yang ekstrem, kualitas pemadatan, serta kekuatan struktur perkerasan. Fenomena ini dapat mempengaruhi kenyamanan dan keselamatan pengendara, terutama pada kecepatan tinggi. Menurut *The Asphalt Institute* (1982), hubungan antara jumlah siklus beban yang menyebabkan *rutting* (N_r) dan regangan tekan vertikal di atas lapisan tanah dasar (ϵ_c) dapat dinyatakan dengan perhitungan menggunakan Persamaan 3.30 berikut.

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon_c^{-4,47} \quad (3.30)$$

dengan:

N_r = Jumlah siklus beban yang diizinkan hingga terjadi retak alur (ESAL), dan

ϵ_c = Regangan tekan vertikal di bawah lapisan permukaan (cm).

3. *Permanent Deformation*

Permanent deformation (deformasi permanen) merupakan bentuk kerusakan yang terjadi akibat penumpukan regangan plastis pada lapisan perkerasan, baik pada lapisan aspal, pondasi, maupun tanah dasar. Kerusakan ini dapat menyebabkan penurunan permukaan jalan secara bertahap. Menurut *The Asphalt Institute* (1982), jumlah siklus beban yang diizinkan untuk menahan deformasi permanen dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.31 berikut.

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon_c^{-4,47} \quad (3.31)$$

dengan:

N_d = Jumlah siklus beban yang diizinkan hingga terjadi deformasi permanen (ESAL), dan

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

Tahap terakhir dilakukan analisis untuk memperkirakan umur pelayanan perkerasan terhadap masing-masing jenis kerusakan dengan menggunakan perhitungan CESAL Berdasarkan MDPJ 2024, perhitungan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.32 berikut.

$$CESAL = \Sigma(LHR \times VDF) \times 365 \times DD \times DL \times \frac{(1+0,01 i)^{UR}-1}{0,01 i} \quad (3.32)$$

dengan:

CESAL = *Cumulative Equivalent Standard Axle Load* (ESAL),

LHR = Lalu lintas harian rerata,

VDF = *Vehicle Damage Factor*,

DD = Faktor distribusi arah,

DL = Faktor distribusi lajur (%),

i = faktor pertumbuhan lalu lintas (%), dan

UR = Umur layan perkerasan (tahun)

3.12 Analisis Statistik

Statistik merupakan cabang ilmu matematika yang mempelajari proses pengumpulan, pengolahan, analisis, penyajian, serta interpretasi data. Statistik bertujuan untuk menyusun data secara sistematis sehingga pola yang terdapat dalam data dapat dipahami dan digunakan sebagai dasar dalam penarikan kesimpulan terhadap suatu populasi berdasarkan data sampel yang diperoleh. Analisis statistik dalam penelitian ini menggunakan metode *One-Way Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA). MANOVA merupakan metode analisis statistik yang digunakan untuk mengetahui apakah suatu variabel bebas berpengaruh terhadap beberapa variabel terikat secara bersamaan (Gultom dkk., 2026). Pengolahan dan analisis data dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) guna mempermudah proses pengujian statistik secara sistematis dan akurat.

Menurut Jainuri (2023), terdapat beberapa macam variabel yang digunakan dalam analisis MANOVA yaitu sebagai berikut.

1. Variabel dependen (variabel terikat) merupakan variabel yang nilainya dipengaruhi atau menjadi akibat dari adanya variabel lain. Variabel ini digunakan untuk melihat hasil atau respon dari perlakuan yang diberikan dalam penelitian. Dengan kata lain, perubahan pada variabel dependen terjadi karena adanya pengaruh dari variabel independen.
2. Variabel independen (variabel bebas) merupakan variabel yang mempengaruhi atau menjadi penyebab perubahan terhadap variabel dependen. Variabel ini biasanya berupa perlakuan atau faktor yang sengaja ditentukan peneliti untuk mengetahui pengaruhnya terhadap hasil penelitian.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis MANOVA untuk mengetahui pengaruh metode pencampuran terhadap karakteristik campuran. Adapun variabel bebas yang digunakan hanya satu yaitu metode pencampuran (metode konvensional, dua tahap, dan tiga tahap). Sedangkan untuk variabel terikatnya berupa karakteristik campuran yang terdiri dari beberapa parameter yaitu VITM, VFWA, VMA, *density*, stabilitas, *flow*, MQ, ITS, CL, IRS, TSR, DD.

Adapun beberapa asumsi dasar yang harus dipenuhi dalam analisis *One-Way* MANOVA yaitu sebagai berikut.

1. Merumuskan Hipotesis

Merumuskan hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1) dengan menggunakan Persamaan 3.33 dan Persamaan 3.34 berikut.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots \mu_k \quad (3.33)$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \dots \mu_k \quad (3.34)$$

dengan:

H_0 = Tidak ada perbedaan yang signifikan, dan

H_1 = Ada perbedaan yang signifikan.

2. Menentukan nilai α atau taraf signifikansi

Tingkat kepercayaan pada penelitian ini ditetapkan sebesar 95%, sehingga taraf signifikansinya (α) sebesar 5%. Tingkat kepercayaan tersebut dipilih karena mampu memberikan hasil yang cukup akurat dengan tingkat keyakinan yang tinggi serta umum digunakan sebagai standar dalam penelitian sebelumnya.

Dasar pengambilan keputusannya yaitu sebagai berikut:

- a. Jika nilai signifikan atau $sig > 0,05$; maka H_1 ditolak dan H_0 diterima.
- b. Jika nilai signifikan atau $sig < 0,05$; maka H_1 diterima dan H_0 ditolak.

3. *Lavene's Test of Equality of Error Variances*

Levene's Test digunakan untuk menguji homogenitas varians pada masing-masing variabel dependen antar kelompok perlakuan. Uji ini bertujuan untuk mengetahui apakah varians data pada setiap kelompok memiliki kesamaan atau homogen. Homogenitas varians merupakan salah satu asumsi penting dalam analisis MANOVA agar hasil pengujian dapat dinyatakan valid.

Dasar pengambilan keputusan pada *Levene's Test* adalah sebagai berikut:

- a. Jika nilai signifikansi ($Sig.$) $> 0,05$; maka varians data antar kelompok bersifat homogen sehingga asumsi terpenuhi.

- b. Jika nilai signifikansi (Sig.) $< 0,05$; maka varians data antar kelompok tidak homogen sehingga asumsi tidak terpenuhi.

4. *Multivariate Tests*

Multivariate Tests digunakan untuk mengetahui pengaruh variabel bebas terhadap seluruh variabel dependen secara simultan. Pada analisis MANOVA, pengujian multivariat dilakukan menggunakan beberapa statistik uji, yaitu Pillai's Trace, Wilks' Lambda, Hotelling's Trace, dan Roy's Largest Root. Namun, statistik yang paling umum digunakan adalah Wilks' Lambda karena mampu menunjukkan pengaruh perlakuan terhadap kombinasi seluruh variabel dependen secara keseluruhan.

Dasar pengambilan keputusan pada Multivariate Tests adalah sebagai berikut:

- a. Jika nilai signifikansi (Sig.) $> 0,05$; maka variabel bebas tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap variabel dependen secara simultan.
- b. Jika nilai signifikansi (Sig.) $< 0,05$; maka variabel bebas memberikan pengaruh signifikan terhadap variabel dependen secara simultan.

5. *Test of Between-Subjects Effects*

Test of Between-Subjects Effects digunakan untuk mengetahui pengaruh variabel bebas terhadap masing-masing variabel dependen secara parsial atau terpisah setelah dilakukan pengujian multivariat. Uji ini menunjukkan parameter mana yang mengalami pengaruh signifikan akibat perlakuan yang diberikan.

Dasar pengambilan keputusan pada Test of Between-Subjects Effects adalah sebagai berikut:

- a. Jika nilai signifikansi (Sig.) $> 0,05$; maka variabel bebas tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen yang diuji.
- b. Jika nilai signifikansi (Sig.) $< 0,05$; maka variabel bebas berpengaruh signifikan terhadap variabel dependen yang diuji.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Metode penelitian adalah metode yang dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh sekumpulan informasi atau data, serta dilanjutkan dengan melakukan identifikasi terhadap data yang telah diperoleh. Pada penelitian ini, metode yang digunakan yaitu berupa metode eksperimental. Metode ini dilakukan dengan melaksanakan serangkaian tahapan pengujian untuk memperoleh informasi data. Data yang diperoleh nantinya akan diolah terlebih dahulu untuk mengetahui hasil akhir pengujian, kemudian dilanjutkan dengan membandingkan hasil pengujian tersebut dengan ketentuan atau standar spesifikasi yang berlaku seperti Spesifikasi Umum Bina Marga Tahun 2025. Selanjutnya, dalam penelitian ini juga dilakukan analisis lanjutan berupa analisis statistik serta perkiraan umur pelayanan perkerasan dengan menggunakan bantuan *software* KENPAVE melalui pemodelan viskoelastis, dimana perencanaan desain tebal perkerasannya akan mengacu pada dokumen Manual Desain Perkerasan Jalan Tahun 2024.

4.2 Metode Pengambilan Sampel

Metode pengambilan sampel pada penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode *non-probability sampling* melalui pendekatan *purposive sampling*. Metode ini merupakan teknik pengambilan sampel yang tidak ditentukan secara acak, melainkan ditentukan sesuai dengan kriteria dan tujuan dari penelitian yang telah ditetapkan sebelumnya.

4.3 Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data merupakan prosedur yang digunakan untuk memperoleh data yang diperlukan dalam penelitian. Metode pengumpulan data ini disusun sedemikian rupa agar dapat memberikan informasi yang mampu mencerminkan kondisi sebenarnya, serta memberikan dukungan yang memadai

dalam proses analisis. Data yang digunakan pada penelitian ini berasal dari berbagai sumber, baik primer maupun sekunder, yang dipilih secara sistematis sesuai dengan keterkaitannya terhadap tujuan penelitian. Berikut adalah penjelasan terkait sumber data dan teknik pengumpulan data yang dilakukan, agar proses penelitian ini dapat dipahami dengan jelas, tersusun secara sistematis, serta dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

4.3.1 Pengumpulan Data Sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari sumber yang telah tersedia sebelumnya dan bukan hasil dari pengumpulan langsung oleh peneliti. Data ini dapat diperoleh dari instansi-instansi tertentu ataupun kajian penelitian terdahulu yang digunakan untuk melengkapi, mendukung data primer, serta memperkuat penelitian yang dilakukan. Pada penelitian ini, digunakan data sekunder dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Prasetya (2024), yang terdiri dari hasil pemeriksaan bahan penyusun campuran, nilai KAO, hasil pengujian (MS IRS, ITS, TSR, CL, dan DD) dari benda uji dengan kadar *filler* FA batu bara 50% menggunakan metode pencampuran konvensional, serta data LHR Ruas Jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh Tahun 2024 yang diperoleh dari Balai Pelaksana Jalan Nasional (BPJN) Jambi. Selain itu, ada juga beberapa data sekunder lainnya seperti acuan prosedur pengujian dan standar spesifikasi yang relevan.

4.3.2 Pengumpulan Data Primer

Data primer adalah data asli yang dikumpulkan oleh peneliti secara langsung dari sumber pertama (subjek atau objek penelitian) yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan penelitian atau analisis yang dilakukan. Pada penelitian ini, data primer diperoleh melalui serangkaian pengujian laboratorium yang diawali dengan persiapan bahan penyusun campuran, kemudian dilanjutkan dengan proses pembuatan benda uji yang sesuai dengan rencana proporsi campuran menggunakan nilai KAO dan kadar *filler* yang ditentukan, dengan menerapkan dua metode pencampuran yaitu metode pencampuran dua tahap, dan tiga tahap. Selanjutnya, akan dilakukan beberapa pengujian untuk mengetahui karakteristik campuran, terdiri dari pengujian MS, IRS, ITS, TSR, CL, dan DD. Setelah itu, akan dilakukan

analisis nilai *Stiffness Modulus*, analisis statistik, perencanaan desain lapis perkerasan, serta analisis perkiraan umur layan perkerasan.

4.4 Tahapan Penelitian

Proses pelaksanaan tahapan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Jalan Raya, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Adapun beberapa tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

4.4.1 Pengumpulan Data Sekunder

Tahapan awal dalam penelitian ini adalah mengumpulkan data sekunder sebagai dasar dalam pembuatan campuran serta analisis selanjutnya. Adapun data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Karakteristik Bahan Penyusun Campuran

Bahan penyusun yang digunakan dalam campuran SMA terdiri dari agregat, aspal, dan *filler*. Agregat dan aspal yang digunakan telah disediakan oleh Laboratorium Jalan Raya Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Sedangkan *filler* yang digunakan diperoleh dari salah satu PLTU di Indonesia yang sama seperti *filler* yang digunakan oleh Prasetya (2024). Bahan-bahan ini harus melewati serangkaian pemeriksaan untuk memastikan kelayakan penggunaannya dalam suatu campuran. Proses pemeriksaan tersebut telah dilakukan oleh Prasetya (2024), mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025. Berikut adalah hasil pemeriksaan bahan penyusun campuran yang digunakan.

a. Karakteristik Aspal Pen 60/70

Berikut adalah karakteristik aspal pen 60/70 yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Karakteristik Aspal Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Nilai	Keterangan
1	Berat Jenis	≥ 1	1,040	Memenuhi
2	Penetrasi (mm)	60 - 70	66,30	Memenuhi
3	Daktilitas (cm)	≥ 100	164	Memenuhi

Lanjutan Tabel 4. 1 Karakteristik Aspal Pen 60/70

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Nilai	Keterangan
4	Titik Lembek (°C)	≥ 48	48,5	Memenuhi
5	Titik Nyala (°C)	≥ 232	315	Memenuhi
6	Titik Bakar (°C)	≥ 232	320	Memenuhi
7	Kelarutan dalam TCE (%)	≥ 99	99,32	Memenuhi

Sumber: Prasetya (2024)

b. Karakteristik Agregat

Berikut adalah karakteristik agregat yang dapat dilihat pada Tabel 4.2 hingga Tabel 4.4.

Tabel 4. 2 Karakteristik Agregat Kasar

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Nilai	Keterangan
1	Berat Jenis	$\geq 2,5$	2,59	Memenuhi
2	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)	≤ 2	1,96	Memenuhi
3	Kelekatan Agregat Terhadap Aspal (%)	≥ 95	98	Memenuhi
4	Kerusakan Agregat dengan Mesin <i>Los Angeles</i> (%)	≤ 40	14,34	Memenuhi

Sumber: Prasetya (2024)

Tabel 4. 3 Karakteristik Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Spesifikasi	Nilai	Keterangan
1	Berat Jenis	$\geq 2,5$	2,70	Memenuhi
2	Penyerapan Agregat Terhadap Air (%)	≤ 2	1,42	Memenuhi
3	<i>Sand Equivalent</i> (%)	≥ 95	92,84	Memenuhi

Sumber: Prasetya (2024)

Tabel 4. 4 Karakteristik *Filler*

No	Jenis Pengujian	Nilai
1	Berat Jenis FA Batu Bara	1,776
2	Berat Jenis Debu Batu	2,556

Sumber: Prasetya (2024)

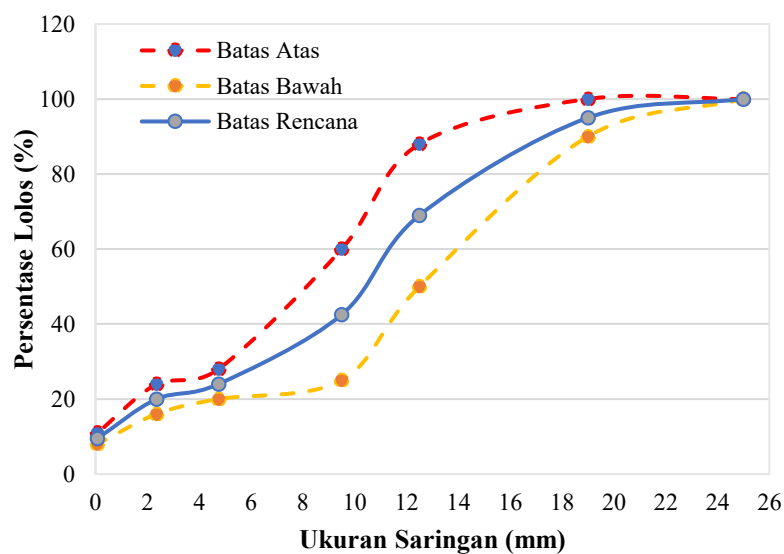
2. Rencana Gradasi Campuran

Berdasarkan penelitian Prasetya (2024), jenis campuran beraspal yang digunakan adalah campuran SMA 25 mm, dengan ukuran maksimum butiran agregat sebesar 25 mm. perencanaan gradasi agregat untuk campuran SMA 25 mm ini disusun dengan mengacu pada Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, yang menjadi standar nasional dalam proses perancangan dan pelaksanaan pekerjaan perkerasan jalan. Adapun rancangan gradasi agregat untuk campuran SMA 25 mm dapat dilihat pada Tabel 4.5 berikut.

Tabel 4. 5 Rencana Gradasi Agregat Campuran SMA 25 mm

Ukuran Ayakan		Spesifikasi (%)		Jumlah Persen (%)	
Inchi	mm	Min	Max	Lolos	Tertahan
1"	25	100	100	100	0
3/4"	19	90	100	95	5
1/2"	12,5	50	88	69	31
3/8"	9,5	25	60	42,5	57,5
No. 4	4,75	20	28	24	76
No. 8	2,36	16	24	20	80
No. 200	0,075	8	11	9,5	90,5
Pan		0	0	0	100

Sumber: Prasetya (2024)

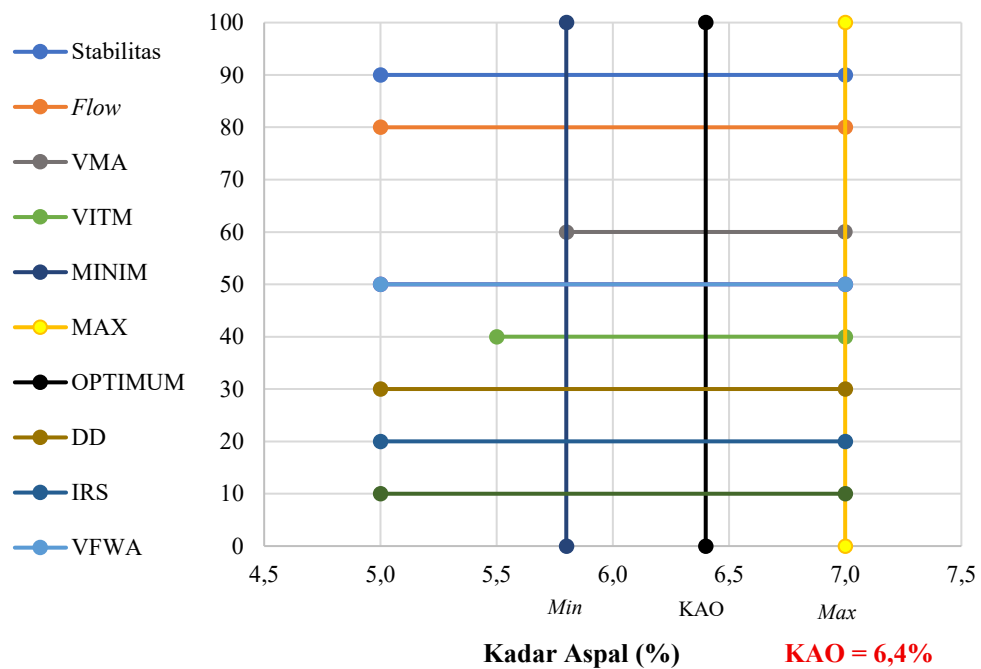


Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Rencana Campuran SMA 25 mm

Sumber: Prasetya (2024)

3. Kadar Aspal Optimum (KAO)

KAO merupakan kadar aspal yang menghasilkan campuran beraspal dengan karakteristik paling baik dan memenuhi seluruh parameter yang dipersyaratkan dalam desain campuran. Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Prasetya (2024), proses penentuan nilai KAO telah dilaksanakan sepenuhnya. Oleh karena itu, pada penelitian ini tidak lagi mengulangi proses untuk menentukan nilai KAO, melainkan menggunakan nilai KAO yang telah ditetapkan pada penelitian sebelumnya. Adapun grafik hasil pengujian untuk menentukan nilai KAO dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4. 2 Grafik Penentuan Nilai KAO

Sumber: Prasetya (2024)

Berdasarkan Gambar 4.2, Prasetya (2024) memperoleh nilai KAO untuk campuran SMA 25 mm sebesar 6,4% dari total campuran 1200 gram yaitu sebesar 76,8 gram.

4. Karakteristik Campuran dengan Metode Pencampuran Konvensional

Pada penelitian Prasetya (2024), pembuatan benda uji dilakukan untuk berbagai variasi kadar *filler* FA batu bara, yaitu 0%, 25%, 50%, 75%, dan

100%. Sedangkan pada penelitian ini, secara khusus memfokuskan pada pembuatan dan pengujian benda uji dengan kadar *filler* FA batu bara sebesar 50%. Pemilihan kadar 50% didasarkan karena kadar tersebut berada pada titik tengah variasi yang diteliti sebelumnya dan dianggap paling representatif untuk menggambarkan perubahan karakteristik campuran tanpa harus berhadapan dengan kondisi ekstrem, seperti kadar *filler* yang terlalu rendah atau terlalu tinggi. Walaupun hasil penelitian Prasetya (2024) menunjukkan karakteristik campuran yang cenderung menurun seiring bertambahnya kadar *filler* FA, tapi nilainya masih memenuhi batas spesifikasi yang diizinkan. Dengan demikian, pemilihan kadar FA 50% ini diharapkan dapat mengoptimalkan penggunaan FA sebagai *filler* pengganti dalam campuran perkerasan melalui penerapan metode pencampuran yang berbeda.

Pada penelitian Prasetya (2024), pembuatan benda uji dilakukan dengan metode pencampuran konvensional, maka pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan benda uji dengan metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap. Berdasarkan tujuan penelitian yang ingin menganalisis pengaruh berbagai metode pencampuran (konvensional, dua tahap, dan tiga tahap) terhadap karakteristik dan umur layan perkerasan, maka hasil pengujian untuk benda uji dengan campuran SMA ber*filler* FA batu bara 50% melalui metode pencampuran konvensional akan mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Prasetya (2024). Adapun karakteristik campuran SMA ber*filler* FA batu bara 50% melalui metode pencampuran konvensional dapat dilihat pada Tabel 4.6 hingga Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4. 6 Karakteristik Volumetrik Campuran SMA Ber*filler* FA batu bara 50% melalui Metode Pencampuran Konvensional

Parameter	Nilai	Spesifikasi
VITM (%)	4,209	3 - 5
VFWA (%)	76,604	-
VMA (%)	17,969	> 17
<i>Density</i> (gr/cc)	2,236	-

Sumber: Prasetya (2024)

Tabel 4. 7 Karakteristik Kekuatan Campuran SMA Berfiller FA batu bara 50% melalui Metode Pencampuran Konvensional

Parameter	Nilai	Spesifikasi
Stabilitas (kg)	965,519	> 600
Flow (mm)	3,200	2 – 4,5
MQ (kg/mm)	301,887	-
ITS (kPa)	754,051	-
CL (%)	9,342	< 20

Sumber: Prasetya (2024)

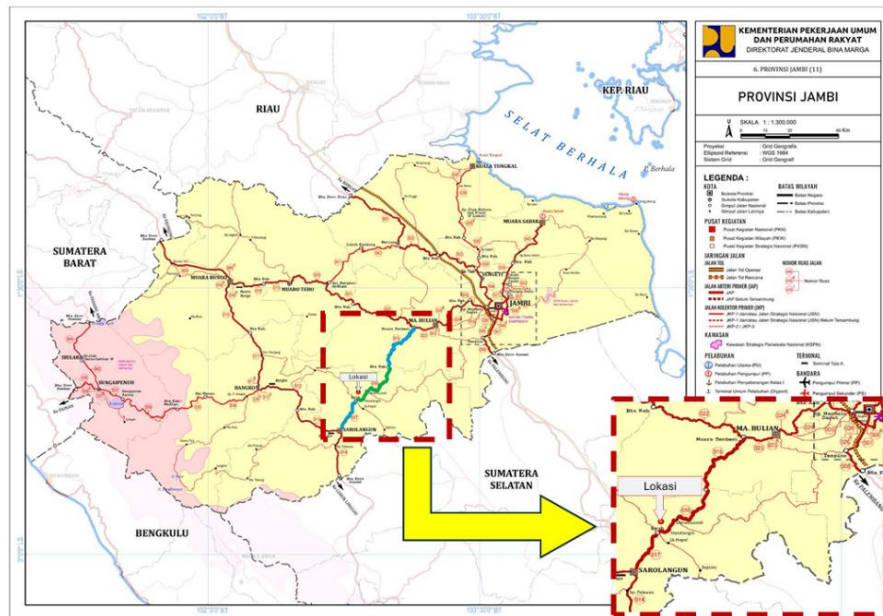
Tabel 4. 8 Karakteristik Durabilitas Campuran SMA Berfiller FA batu bara 50% melalui Metode Pencampuran Konvensional

Parameter	Nilai	Spesifikasi
IRS (%)	96,291	> 90
TSR (%)	88,595	> 80
DD (%)	0,131	< 0,3

Sumber: Prasetya (2024)

5. Pengumpulan Data Ruas Jalan

Pengumpulan data ruas jalan bertujuan untuk memenuhi kebutuhan pada proses analisis perkiraan umur pelayanan dari suatu perkerasan yang nantinya akan disimulasikan menggunakan jenis perkerasan SMA 25 mm berfiller FA batu bara. Pada penelitian ini, lokasi yang menjadi titik tinjauan dalam perencanaan dan analisis desain perkerasan jalan yaitu berada di Ruas Jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh, Provinsi Jambi. Adapun peta lokasi dan data LHR Ruas Jalan tersebut diperoleh dari Balai Pelaksanaan Jalan Nasional (BPJN) Provinsi Jambi yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Tabel 4.9 berikut.



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

**Tabel 4. 9 Data LHR Ruas Jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun
– Pauh**

No	Golongan Kendaraan	Jenis Kendaraan	LHR 2024 (Kend/Hari)
1	1	Sepeda motor dan kendaraan roda-3	4.226
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> dan <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	1.688
9	7A1	Truk 3 sumbu - berat	274
10	7C1	Truck 4 sumbu - berat	12
11	8	Kendaraan tak bermotor	4
TOTAL			8.641

Sumber: Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Jambi (2025)

4.4.2 Penentuan Jumlah Benda Uji

Pada penelitian ini, akan dilakukan pembuatan benda uji substitusi *filler* FA batu bara 50% dengan metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap, di mana untuk masing-masing benda uji di setiap metode pencampuran akan dilakukan beberapa pengujian yang terdiri dari MS, IRS, ITS, TSR, CL, dan DD. Adapun rincian jumlah benda uji yang dibutuhkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4. 10 Jumlah Benda Uji untuk Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga tahap

Kadar <i>Filler</i> FA Batu Bara (%)	Pengujian	Variasi Metode Pencampuran	
		Dua Tahap	Tiga Tahap
50	MS	3	3
	IRS	3	3
	ITS	3	3
	TSR	3	3
	CL	3	3
	DD	3	3
	Total	36	

Berdasarkan Tabel 4.20, maka pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan benda uji sebanyak 36 buah.

4.4.3 Penentuan Proporsi Campuran SMA Ber*filler* FA Batu Bara

Campuran SMA 25 mm tersusun dari agregat kasar, agregat halus, aspal, *filler*, dan bahan aditif berupa serat selulosa. Penentuan proporsi dari masing-masing bahan penyusun ini harus dilakukan sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Agregat kasar dan agregat halus ditentukan berdasarkan rencana gradasi dari campuran SMA seperti pada Tabel 4.5. Sedangkan penentuan kadar aspal dalam campuran harus mengacu pada nilai KAO terhadap berat total campuran sebesar 1200 gram. Sementara itu, berdasarkan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, bahan aditif ditambahkan sebesar 0,3% dari berat total campuran untuk setiap benda uji.

Setelah proporsi agregat kasar, agregat halus, aspal, dan bahan aditif ditetapkan, selanjutnya dilakukan perhitungan kebutuhan *filler* yang diperoleh dari fraksi agregat yang lolos saringan No. 200. Namun, karena penelitian ini

menggunakan dua jenis *filler* yang berbeda, yaitu *filler* debu batu sebagai *filler* konvensional dan FA batu bara sebagai *filler* pengganti, maka perlu dilakukan penyetaraan volume berdasarkan berat jenis dari masing-masing *filler* tersebut. Hal itu penting agar perbandingan antara *filler* debu batu dan *filler* FA batu bara tetap berada dalam kondisi volume yang sama yaitu 50% *filler* debu batu dan 50% *filler* FA batu bara.

Adapun analisis perhitungannya dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 4.2 dan Persamaan 4.3 berikut.

Persamaan Menentukan Berat *filler* Debu Batu:

$$\text{Berat Total } \textit{filler} - (\text{Berat Total } \textit{filler} \times \text{Substitusi } \textit{Filler} \text{ Debu Batu } \%) \quad (4.2)$$

Persamaan Menentukan Berat *filler* FA Batu Bara:

$$\frac{\text{BJ } \textit{Filler} \text{ FA} \times \text{Berat Total } \textit{Filler} \times \text{Proporsi Substitusi } \textit{Filler} \text{ FA } \%}{\text{BJ Debu Batu}} \quad (4.3)$$

Apabila proporsi campuran telah ditetapkan, dilakukan proses penyaringan agregat untuk memisahkan butiran sesuai dengan ukuran yang ditentukan oleh nomor saringan. Setiap fraksi agregat hasil penyaringan kemudian ditimbang kembali menyesuaikan berat tertahan pada masing-masing nomor saringan sesuai rencana gradasi campuran. Selanjutnya, agregat kasar, agregat halus, dan *filler* yang telah ditimbang tersebut akan dikemas ke dalam plastik sesuai kebutuhan proses pencampuran dua tahap dan tiga tahap.

4.4.4 Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan benda uji untuk seluruh jenis pengujian dapat dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut.

1. Mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
2. Memanaskan aspal sampai mencapai suhu tertentu. Pada penelitian ini digunakan jenis aspal pen 60/70 yang dilakukan proses pemanasan mencapai suhu $160 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

3. Memanaskan agregat kasar, halus, dan *filler* hingga mencapai suhu $165 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Selanjutnya mencampurkan bahan penyusun tersebut dengan menyesuaikan tahapan metode pencampuran seperti berikut.
 - a. Metode Pencampuran Dua Tahap

Metode ini dimulai dengan memasukkan agregat kasar dan bahan aditif (serat selulosa) dengan penambahan aspal sesuai nilai KAO, yang kemudian diaduk sampai merata. Setelah itu, dilanjutkan dengan penambahan agregat halus dan *filler*, yang kemudian diaduk sampai merata lagi sehingga tercipta campuran yang homogen.
 - b. Metode Pencampuran Tiga Tahap

Metode ini dimulai dengan memasukkan agregat kasar dan bahan aditif (serat selulosa) dengan penambahan aspal sesuai nilai KAO, yang kemudian diaduk sampai merata. Setelah itu, dilanjutkan dengan penambahan *filler*, yang kemudian diaduk sampai merata lagi. Terakhir, dilanjutkan dengan penambahan agregat halus, yang kemudian diaduk sampai merata lagi sehingga tercipta campuran yang homogen.
4. Membersihkan cetakan (*mold*) benda uji, dan kemudian dilanjutkan dengan mengolesi cetakan dengan oli.
5. Meletakkan selembar kertas dengan bentuk dan ukuran yang telah sesuai dengan ukuran cetakan pada bagian bawah. Kemudian campuran yang telah melewati proses pencampuran, dimasukkan ke dalam cetakan sebanyak $1/3$ dari volume cetakan dan diratakan dengan ditusuk-tusuk menggunakan spatula sebanyak 25 kali (15 kali pada bagian pinggir dalam cetakan, dan 10 kali pada bagian tengah cetakan). Setelah itu, masukkan lagi campuran hingga mencapai $2/3$ dari volume cetakan, dan dilakukan proses perataan juga dengan ditusuk-tusuk menggunakan spatula sebanyak 25 kali. Terakhir, campuran dimasukkan hingga penuh, dan ditutup dengan selembar kertas lagi di permukaan atasnya.
6. Meletakkan cetakan berisi campuran tersebut pada dudukan alat pemadat untuk dilakukan pemadatan dengan jumlah pukulan 50 kali pada sisi pertama dan 50 kali juga pada sisi kedua.

7. Setelah pemadatan selesai, selembar kertas yang menempel pada bagian bawah dan atas cetakan dilepaskan.
8. Mendinginkan benda uji hingga mencapai kondisi ruang, dan nantinya benda uji dikeluarkan dari cetakan dengan menggunakan alat *ejector hydraulic pump*.
9. Memberikan kodefikasi pada setiap benda uji untuk memudahkan proses pengujian.

4.4.5 Pengujian *Marshall Standard* (MS)

Adapun tahapan pengujian MS yaitu sebagai berikut.

1. Mempersiapkan seluruh peralatan serta benda uji yang akan dilakukan pengujian.
2. Membersihkan benda uji dari sisa material yang masih menempel setelah proses pembuatan benda uji.
3. Melakukan pengukuran terhadap tinggi benda uji pada tiga titik menggunakan jangka sorong, kemudian dilanjutkan dengan menimbang benda uji dalam kondisi kering udara.
4. Melakukan perendaman benda uji dalam air pada suhu ruang selama 20 – 24 jam hingga mencapai kondisi jenuh, kemudian menimbang benda uji di dalam air dan mencatat hasilnya.
5. Mengeringkan permukaan benda uji dengan kain semi basah, agar benda uji mencapai kondisi SSD, lalu menimbang kembali untuk memperoleh berat SSD.
6. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* bersuhu 60°C selama 30 menit.
7. Memeriksa kesiapan alat uji *Marshall* beserta *dial gauge* yang digunakan, kemudian menyiapkan *breaking head* yang telah dilumasi oli.
8. Mengeluarkan benda uji dari *waterbath* dan menempatkannya ke dalam *breaking head*, memasang *dial flow*, lalu menaikkan *breaking head* hingga benda uji menyentuh cincin penguji.
9. Mengatur jarum pada *dial* stabilitas dan *dial flow* ke posisi nol.
10. Mengoperasikan alat uji *Marshall* dan mengamati proses pembebanan hingga nilai stabilitas mencapai titik maksimum.

11. Mencatat hasil pembacaan dari *dial* stabilitas dan *dial flow* sebagai data hasil pengujian.

4.4.6 Pengujian *Index of Retained Strength* (IRS)

Adapun tahapan pengujian IRS yaitu sebagai berikut.

1. Mempersiapkan peralatan dan benda uji yang akan digunakan.
2. Membersihkan benda uji dari sisa material yang masih menempel setelah proses pembuatan benda uji.
3. Mengukur tinggi benda uji pada tiga titik menggunakan jangka sorong, kemudian menimbang benda uji dalam kondisi kering udara.
4. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* bersuhu 60°C selama 24 jam.
5. Memeriksa kesiapan alat uji *Marshall* beserta *dial gauge* yang digunakan, kemudian menyiapkan *breaking head* yang telah dilumasi oli.
6. Mengeluarkan benda uji dari *waterbath* dan menempatkannya ke dalam *breaking head*, memasang *dial flow*, lalu menaikkan *breaking head* hingga benda uji menyentuh cincin penguji.
7. Mengatur jarum pada *dial* stabilitas dan *dial flow* ke posisi nol.
8. Mengoperasikan alat uji *Marshall* dan mengamati proses pembebanan hingga nilai stabilitas mencapai titik maksimum.
9. Mencatat hasil pembacaan dari *dial* stabilitas dan *dial flow* sebagai data hasil pengujian.

4.4.7 Pengujian *Indirect Tensile Strength* (ITS)

Adapun tahapan pengujian ITS yaitu sebagai berikut.

1. Mempersiapkan peralatan dan benda uji yang akan digunakan.
2. Membersihkan benda uji dari sisa material yang masih menempel setelah proses pembuatan benda uji.
3. Mengukur tinggi dan diameter benda uji pada tiga titik menggunakan jangka sorong, kemudian menimbang benda uji dalam kondisi kering udara.
4. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* bersuhu 60°C selama 30 menit.
5. Mengeluarkan benda uji dari *waterbath* dan menempatkan benda uji tersebut pada alat uji ITS dengan posisi yang sesuai standar.

6. Mengoperasikan alat uji, mengamati pergerakan *dial*, dan mencatat nilai yang diperoleh sebagai hasil pengujian.

4.4.8 Pengujian *Tensile Strenght Ratio* (TSR)

Adapun tahapan pengujian TSR yaitu sebagai berikut.

1. Mempersiapkan peralatan dan benda uji yang akan digunakan.
2. Membersihkan benda uji dari sisa material yang masih menempel setelah proses pembuatan benda uji.
3. Mengukur tinggi dan diameter benda uji pada tiga titik menggunakan jangka sorong, kemudian menimbang benda uji dalam kondisi kering udara.
4. Memasukkan benda uji ke dalam *waterbath* bersuhu 60°C selama 24 jam.
5. Mengeluarkan benda uji dari *waterbath* dan menempatkan benda uji tersebut pada alat uji TSR dengan posisi yang sesuai standar.
6. Mengoperasikan alat uji, mengamati pergerakan *dial*, dan mencatat nilai yang diperoleh sebagai hasil pengujian.

4.4.9 Pengujian *Cantabro Loss* (CL)

Adapun tahapan pengujian CL yaitu sebagai berikut.

1. Menyiapkan seluruh bahan dan peralatan yang diperlukan.
2. Menimbang benda uji untuk memperoleh berat awal sebelum abrasi (Mo).
3. Memasukkan benda uji ke dalam mesin *Los Angeles* tanpa menggunakan bola baja.
4. Mengoperasikan mesin pada kecepatan 30 – 33 rpm hingga mencapai 300 putaran.
5. Mengeluarkan dan membersihkan benda uji setelah pemutaran, kemudian menimbang kembali untuk mendapatkan berat akhir setelah abrasi (Mi).

4.4.10 Pengujian *Draindown* (DD)

Adapun tahapan pengujian DD yaitu sebagai berikut.

1. Mempersiapkan peralatan dan bahan yang akan digunakan.
2. Melakukan pelapisan pada nampan dengan menggunakan *aluminium foil* dan menimbang beratnya sebagai berat bersih.
3. Memasak benda uji seperti melakukan pembuatan benda uji *Marshall*.

4. Benda uji yang telah dimasak, dituang dan diratakan ke dalam nampan yang telah dilapisi sebelumnya.
5. Menimbang berat nampan ditambah dengan berat campuran.
6. Memasukkan benda uji yang telah diratakan di nampan ke dalam *oven* dengan suhu 160°C selama 1 jam.
7. Mengeluarkan benda uji dari *oven* dan menuang campuran ke wadah lain, sehingga diperoleh sisa aspal yang masih menempel pada nampan.
8. Menimbang berat nampan ditambah dengan berat sisa aspal yang menempel di atasnya.

4.5 Analisis Data Pengujian

Setelah seluruh rangkaian pengujian selesai dilaksanakan, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data untuk memperoleh parameter hasil pengujian secara menyeluruh. Adapun analisis yang diperlukan mencakup beberapa aspek berikut.

4.5.1 Analisis Parameter Volumetrik Campuran SMA

Parameter volumetrik campuran SMA dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut ini.

1. Nilai VITM dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.1 dan Persamaan 3.2.
2. Nilai VFWA dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.3 hingga Persamaan 3.7.
3. Nilai VMA dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.8 dan Persamaan 3.9.
4. Nilai *density* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.10 dan Persamaan 3.11.

4.5.2 Analisis Parameter Kekuatan Campuran SMA

Parameter kekuatan campuran SMA dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut ini.

1. Nilai stabilitas dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.12.
2. Nilai *flow* dapat langsung diperoleh dari *dial flow* pada alat uji.
3. Nilai MQ dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.13.

4. Nilai ITS dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.14.
5. Nilai CL dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.15.

4.5.3 Analisis Parameter Durabilitas Campuran SMA

Parameter durabilitas campuran SMA dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut ini.

1. Nilai IRS dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.16.
2. Nilai TSR dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.17.
3. Nilai DD dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.18.

4.5.4 Analisis *Stiffness Modulus*

Nilai *stiffness modulus* dapat dianalisis dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut ini.

1. Nilai Sbit dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.19 hingga Persamaan 3.23.
2. Nilai Smix dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.24 dan Persamaan 3.25.

4.6 Tahapan Analisis Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan

Adapun tahapan analisis perkiraan umur pelayanan perkerasan berikut ini.

4.6.1 Tahapan Perencanaan Desain Tebal Perkerasan Metode MDPJ 2024

Berikut merupakan tahapan-tahapan desain tebal perkerasan yang mengacu pada dokumen MDPJ 2024.

1. Mempersiapkan data sekunder berupa data hasil survei lalu lintas.
2. Menentukan umur rencana sesuai dengan jenis perkerasan dan elemen struktur yang dirancang, sehingga perkerasan mampu memenuhi kinerja selama periode layanan yang ditetapkan.
3. Menentukan faktor laju pertumbuhan lalu lintas (i) berdasarkan data hasil survei lalu lintas atau klasifikasi jalan serta kondisi wilayah, guna memproyeksikan peningkatan beban lalu lintas pada masa mendatang.
4. Menentukan faktor distribusi arah (DD) untuk menggambarkan proporsi lalu lintas pada masing-masing arah jalan.

5. Menentukan faktor distribusi lajur (DL) dengan mempertimbangkan jumlah lajur per arah, sehingga diperoleh distribusi beban yang lebih realistis.
6. Menentukan faktor beban ekuivalen (VDF) sesuai lokasi wilayah, pada penelitian ini digunakan nilai VDF yang berlaku untuk Provinsi Jambi.
7. Menghitung nilai-nilai CESA 4 dan CESA 5 berdasarkan umur rencana yang telah ditetapkan sebagai dasar evaluasi kumulatif beban sumbu yang bekerja pada perkerasan.
8. Menentukan bagan desain menggunakan nilai ESA5 pada umur rencana 20 tahun untuk memperoleh rekomendasi tipe perkerasan yang sesuai.
9. Memilih alternatif desain tebal perkerasan yang paling optimal berdasarkan hasil perhitungan dan ketentuan dalam bagan desain.

4.6.2 Analisis Hasil Desain Perkerasan Menggunakan *Software* KENPAVE

Analisis hasil desain perkerasan menggunakan *software* KENPAVE diterapkan untuk memperoleh respons tegangan dan regangan yang timbul akibat pengaruh beban lalu lintas pada struktur perkerasan jalan. Data respons tersebut kemudian dianalisis untuk menentukan batas kemampuan perkerasan dalam menahan beban gandar maksimum sebelum terjadi kerusakan berupa *fatigue cracking*, *rutting*, maupun *permanent deformation*. Berikut ini merupakan tahapan-tahapan analisis desain perkerasan menggunakan *software* KENPAVE.

1. Menentukan Data Properties Material

Adapun data properties material yang harus ditentukan untuk digunakan dalam pemodelan struktur perkerasan yaitu sebagai berikut.

- a. Tebal setiap lapisan perkerasan,
- b. Nilai modulus elastisitas (E) setiap lapisan perkerasan,
- c. Nilai *poisson's ratio* setiap lapisan perkerasan, dan
- d. Menentukan nilai *creep compliances* dengan menggunakan Persamaan 3.30 sebagai karakteristik material viskoelastik.

2. Pemodelan Perkerasan Lentur

Proses analisis diawali dengan melakukan pemodelan perkerasan lentur pada menu LAYERINP sebagai representasi perkerasan jalan dengan pemodelan viskoelastik.

3. Membuka Menu *File*

Apabila pemodelan yang dilakukan merupakan pemodelan baru, maka buka menu *file* dan memilih opsi *New* untuk membuat pemodelan baru.

4. Membuka Menu *General*

Pada menu *general* harus memasukkan sejumlah informasi penting seperti judul analisis, jenis material, analisis kerusakan yang digunakan, nilai ketepatan data, jumlah lapisan, jumlah titik koordinat arah z yang akan dianalisis, hubungan antar lapisan, serta satuan yang digunakan.

5. Membuka Menu *Zcoord*

Pada menu *Zcoord* dilakukan input data jarak vertikal pada setiap titik koordinat yang dianalisis. Hal ini sangat penting untuk menghasilkan respons struktur yang akurat pada kedalaman yang diinginkan.

6. Membuka Menu *Layer*

Pada menu *layer*, dilakukan input data tebal setiap lapisan perkerasan beserta nilai *poisson ratio* masing-masing lapisan. Hal ini sangat penting terhadap respons elastis struktur saat menerima pembebanan.

7. Membuka Menu *Moduli*

Tahap berikutnya adalah membuka menu *moduli*, kemudian meng-klik bagian *period*, dan memasukkan nilai modulus elastisitas untuk masing-masing lapisan perkerasan. Parameter ini merupakan salah satu hal penting dalam menentukan besar regangan, tegangan, dan deformasi struktur perkerasan.

8. Membuka Menu *Load*

Membuka menu *load* dan memasukkan data beban lalu lintas yang terdiri dari sumbu kendaraan, jari-jari area kontak pembebanan (CR), besar beban yang diterapkan (CP), jarak antar roda dalam arah lateral (Y) dan memanjang (X), serta titik-titik koordinat yang digunakan untuk analisis tegangan dan regangan pada perkerasan.

9. Membuka Menu *Viskoelastic*

Membuka menu *viscoelastic* dan memasukkan beberapa parameter data yang diisikan pada bagian *General*, *Time*, *Layer*, *Creep*, dan *Temperature*.

10. Penyimpanan Data

Melakukan penyimpanan data yang telah diinput dengan cara klik *save as* dan memilih lokasi penyimpanan data tersebut.

11. Menjalankan Program KENLAYER

Menjalankan program KENLAYER untuk memperoleh hasil analisis struktur perkerasan berupa respon struktural seperti nilai tegangan, regangan dan defleksi.

4.6.3 Menghitung Tingkat Kerusakan dan Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan

Hasil analisis yang didapatkan dari program KENLAYER akan digunakan sebagai dasar untuk melakukan evaluasi terhadap potensi kerusakan yang mungkin terjadi pada struktur perkerasan. Melalui hasil tersebut, dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan besarnya jumlah repetisi beban lalu lintas yang masih dapat ditahan oleh perkerasan hingga nantinya timbul kerusakan. Perhitungan untuk mengetahui jumlah repetisi beban lalu lintas yang diizinkan hingga terjadi kerusakan retak lelah (*cracking*) dapat menggunakan Persamaan 3.29, untuk kerusakan retak alur (*rutting*) dapat menggunakan Persamaan 3.30, dan untuk kerusakan deformasi permanen (*permanent deformation*) dapat menggunakan Persamaan 3.31.

Selanjutnya, hasil perhitungan jumlah repetisi beban yang telah dilakukan akan digunakan sebagai acuan dalam memperkirakan besarnya umur pelayanan perkerasan, sehingga dapat memberikan gambaran rentang waktu perkerasan untuk mampu berfungsi secara optimal sebelum mengalami kerusakan yang berarti. Perkiraan umur pelayanan perkerasan untuk masing-masing jenis kerusakan dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 3.32.

4.7 Analisis Statistik *One-Way* MANOVA

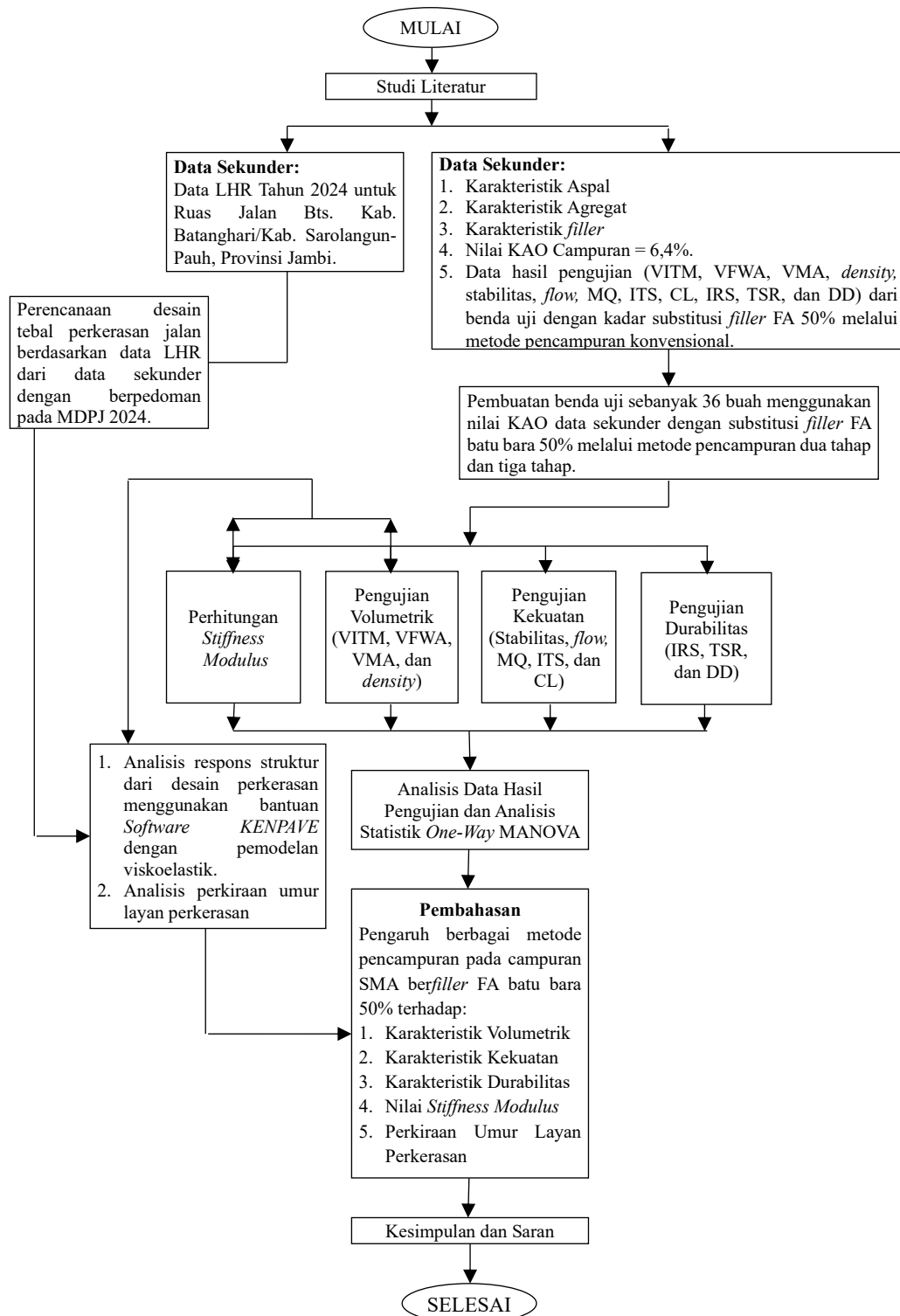
Tahapan analisis statistik pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *One-Way* MANOVA dengan bantuan *software* SPSS. Analisis ini digunakan untuk mengetahui pengaruh metode pencampuran terhadap beberapa variabel dependen secara simultan. Adapun tahapan analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan data hasil pengujian karakteristik campuran SMA berfiller FA batu bara 50% untuk semua metode pencampuran yang terdiri dari parameter VITM, VFWA, VMA, *density*, stabilitas, *flow*, MQ, ITS, CL, IRS, TSR, dan DD yang digunakans sebagai variabel dependen.
2. Mengelompokkan data berdasarkan metode pencampuran yang digunakan, yaitu metode konvensional, metode dua tahap, dan metode tiga tahap sebagai variabel independen (faktor bebas).
3. Membuka *software* SPSS dan membuat variabel penelitian pada menu *Variable View* yang terdiri dari:
 - a. Variabel independen berupa metode pencampuran, dan
 - b. Variabel dependen berupa parameter karakteristik campuran.
4. Memberikan kode pada variabel metode pencampuran, yaitu:
 - a. 1 = Metode Konvensional,
 - b. 2 = Metode Dua Tahap,
 - c. 3 = Metode Tiga Tahap.
5. Menginput seluruh data hasil pengujian ke dalam menu *Data View* sesuai dengan kelompok metode pencampuran dan parameter pengujian.
6. Memilih menu *Analyze*, dilanjutkan *General Linear Model*, dan terakhir *Multivariate*.
7. Memasukkan variabel dependen ke dalam kotak *Dependent Variables*.
8. Memasukkan variabel metode pencampuran ke dalam kotak *Fixed Factor (s)* sebagai variabel independen.
9. Klik bagian *Options*, kemudian mencentang *Descriptive Statistics*, *Estimates of Effect Size*, *Homogeneity Tests*, dan *Parameters Estimates*.
10. Menekan tombol *Continue*, kemudian memilih OK untuk menjalankan proses analisis MANOVA.
11. Memperoleh *output* hasil analisis berupa yang terdiri dari *Descriptive Statistics*, *Levene's Test of Equality of Error Variances*, *Multivariate Tests*, dan *Test of Between-Subjects Effects*.

12. Menginterpretasikan hasil *Levene's Test of Equality of Error Variances* berdasarkan nilai signifikansi (Sig.) untuk mengetahui apakah varians data antar kelompok metode pencampuran bersifat homogen atau tidak.
13. Menginterpretasikan hasil *Multivariate Tests* berdasarkan nilai signifikansi (Sig.) untuk mengetahui ada atau tidaknya pengaruh metode pencampuran terhadap seluruh karakteristik campuran SMA secara keseluruhan.
14. Menginterpretasikan hasil *Test of Between-Subjects Effects* berdasarkan nilai signifikansi (Sig.) untuk mengetahui pengaruh metode pencampuran terhadap masing-masing parameter karakteristik campuran SMA seperti VITM, VFWA, VMA, *density*, stabilitas, *flow*, MQ, ITS, CL, IRS, TSR, dan DD secara terpisah dengan mengacu pada Persamaan 3.33 dan Persamaan 3.34.

4.8 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian merupakan representasi visual yang menggambarkan urutan tahapan penelitian secara ringkas dan sistematis, sehingga memudahkan pemahaman terhadap keseluruhan proses yang dilakukan. Adapun bagan alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4. 4 Bagan Alir Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh hasil penelitian seperti sebagai berikut.

5.1.1 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap

Hasil pengujian campuran SMA berfiller FA batu bara 50% melalui metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap yang dilakukan di laboratorium pada penelitian ini dikelompokkan menjadi beberapa karakteristik, yaitu karakteristik volumetrik, karakteristik kekuatan, dan karakteristik durabilitas. Rekapitulasi hasil pengujian untuk seluruh karakteristik campuran berdasarkan metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap dapat dilihat pada Tabel 5.1 sampai Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5. 1 Hasil Pengujian Karakteristik Volumetrik Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap

Metode Pencampuran	VITM (%)	VFWA (%)	VMA (%)	Density (gr/cc)
Dua Tahap	3,907	77,939	17,711	2,243
Tiga Tahap	3,727	78,781	17,557	2,247
Spesifikasi	4 – 5	-	> 17	-

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Karakteristik Kekuatan Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap

Metode Pencampuran	Stabilitas (kg)	Flow (mm)	MQ (kg/mm)	ITS (kPa)	CL (%)
Dua Tahap	989,161	2,933	337,474	810,191	8,733
Tiga Tahap	1041,557	2,717	383,564	849,175	8,016
Spesifikasi	> 600	2 – 4,5	-		< 20

Tabel 5. 3 Hasil Pengujian Karakteristik Durabilitas Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Metode Pencampuran Dua Tahap dan Tiga Tahap

Metode Pencampuran	IRS (%)	TSR (%)	DD(%)
Dua Tahap	96,848	89,067	0,126
Tiga Tahap	97,402	89,621	0,119
Spesifikasi	> 90	> 80	< 0,3

5.1.2 Hasil Analisis Nilai *Stiffness Modulus* Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

Analisis nilai *stiffness modulus* pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kekakuan campuran SMA dalam menahan beban lalu lintas. Nilai ini terdiri dari dua komponen yaitu Sbit dan Smix. Rekapitulasi hasil analisis nilai Sbit dan Smix dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut ini.

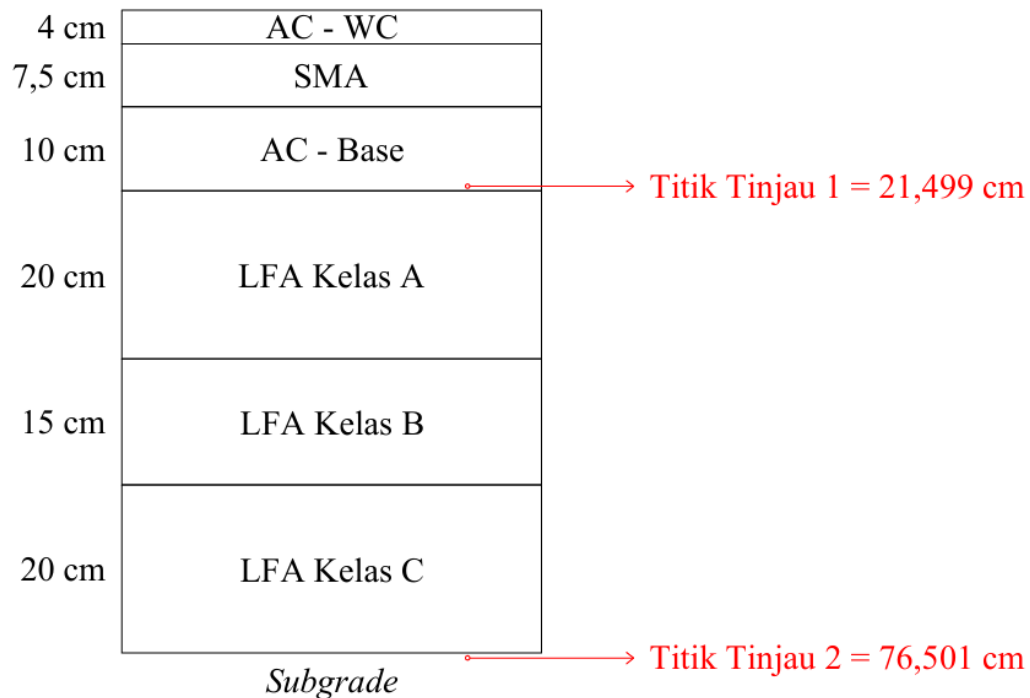
Tabel 5. 4 Rekapitulasi Nilai *Stiffness Modulus* Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

Metode Pencampuran	<i>Stiffnes Modulus of Bitumen, Sbit (MPa)</i>	<i>Stiffness Modulus of Mixture, Smix (MPa)</i>
Konvensional	10,795	1964,639
Dua Tahap		2065,863
Tiga Tahap		2129,613

5.1.3 Hasil Analisis Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

Analisis perkiraan umur pelayanan pada penelitian ini diawali dengan menentukan jenis struktur perkerasan berdasarkan data LHR lokasi studi kasus, yaitu Ruas Jalan Bts. Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh, Provinsi Jambi yang berpedoman pada MDPJ 2024. Berdasarkan perhitungan pada Lampiran 15 diperoleh nilai CESA5 sebesar 13.314.126,901 ESAL, sehingga diperoleh jenis struktur perkerasan seperti pada Lampiran 16, yaitu bagan desain 3A dengan kategori beban lalu lintas rencana FFF (1) 4. Selanjutnya, dilakukan analisis dengan menggunakan *software* KENPAVE untuk mengetahui respons struktur perkerasan

akibat pembebanan lalu lintas, berupa tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Respon tersebut didapatkan berdasarkan titik-titik tinjauan yang dimasukkan pada menu *Zcoord*. Adapun ilustrasi dari kedalaman titik-titik tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5. 1 Ilustrasi Kedalaman Titik Tinjauan Kerusakan

Berdasarkan Gambar 5.1, titik tinjau 1 terletak didasar lapis permukaan pada kedalaman 21,499 cm yang merupakan titik untuk menganalisis kerusakan *fatigue cracking* (Nf) dan *rutting* (Nr). Sedangkan titik tinjau 2 terletak di atas lapis tanah dasar pada kedalaman 76,501 cm yang merupakan titik untuk menganalisis kerusakan *permanent deformation* (Nd). Titik-titik ini dipilih untuk menggambarkan kondisi kritis pada suatu lapisan perkerasan, sehingga dapat digunakan untuk memperhitungkan nilai repetisi beban yang dapat ditahan oleh perkerasan sebelum terjadinya kerusakan. Rekapitulasi hasil analisis nilai repetisi beban berdasarkan titik-titik tinjauan dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5. 5 Rekapitulasi Hasil Analisis Nilai Repetisi Beban Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

Metode Pencampuran	Jenis Kerusakan	Repetisi Beban (ESAL)
Konvensional	Nf	207.129.910,315
	Nr	36.214.248,086
	Nd	36.176.488,177
Dua Tahap	Nf	209.870.193,109
	Nr	36.786.475,022
	Nd	36.709.542,229
Tiga Tahap	Nf	211.722.354,944
	Nr	37.252.236,837
	Nd	37.096.185,537

Berdasarkan Tabel 5.5, diperoleh perkiraan umur pelayanan perkerasan seperti pada Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5. 6 Rekapitulasi Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50% Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

Metode Pencampuran	Jenis Kerusakan	Umur Pelayanan	Kerusakan Awal
Konvensional	Nf	53 Tahun 0 Bulan 6 Hari	Nd
	Nr	28 Tahun 5 Bulan 12 Hari	
	Nd	28 Tahun 5 Bulan 7 Hari	
Dua Tahap	Nf	53 Tahun 2 Bulan 16 Hari	Nd
	Nr	28 Tahun 7 Bulan 25 Hari	
	Nd	28 Tahun 7 Bulan 16 Hari	
Tiga Tahap	Nf	53 Tahun 4 Bulan 3 Hari	Nd
	Nr	28 Tahun 9 Bulan 24 Hari	
	Nd	28 Tahun 9 Bulan 4 Hari	

5.1.4 Hasil Analisis Statistik *One-Way* MANOVA Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Campuran

Adapun rekapitulasi hasil analisis statistik *One-Way* MANOVA untuk mengetahui pengaruh berbagai metode pencampuran (konvensional, dua tahap, dan tiga tahap) terhadap seluruh parameter karakteristik campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Tabel 5.7 sampai Tabel 5.9 berikut ini.

Tabel 5. 7 Rekapitulasi Hasil Analisis Statistik *One-Way* MANOVA Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Volumetrik Campuran

No	Parameter	(Sig)	Hasil Analisis	Keterangan
1	VITM	0,217	H ₀ Diterima	Tidak Signifikan
2	VFWA	0,221	H ₀ Diterima	Tidak Signifikan
3	VMA	0,217	H ₀ Diterima	Tidak Signifikan
4	<i>Density</i>	0,228	H ₀ Diterima	Tidak Signifikan

Catatan:

H₀ = Tidak ada pengaruh signifikan akibat metode pencampuran

Tabel 5. 8 Rekapitulasi Hasil Analisis Statistik *One-Way* MANOVA Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik Kekuatan Campuran

No	Parameter	(Sig)	Hasil Analisis	Keterangan
1	Stabilitas	0,020	H ₀ Ditolak	Signifikan
2	<i>Flow</i>	< 0,001	H ₀ Ditolak	Signifikan
3	MQ	0,001	H ₀ Ditolak	Signifikan
4	ITS	0,008	H ₀ Ditolak	Signifikan
5	CL	0,843	H ₀ Diterima	Tidak Signifikan

Catatan:

H₀ = Tidak ada pengaruh signifikan akibat metode pencampuran

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

No	Parameter	(Sig)	Hasil Analisis	Keterangan
1	Stabilitas 0,5 Jam	0,020	H ₀ Ditolak	Signifikan
2	Stabilitas 24 Jam	< 0,001	H ₀ Ditolak	Signifikan
3	ITS 0,5 Jam	0,008	H ₀ Ditolak	Signifikan
4	ITS 24 Jam	0,003	H ₀ Ditolak	Signifikan
5	DD	0,906	H ₀ Diterima	Tidak Signifikan

Catatan:

H₀ = Tidak ada pengaruh signifikan akibat metode pencampuran

5.2 Pembahasan

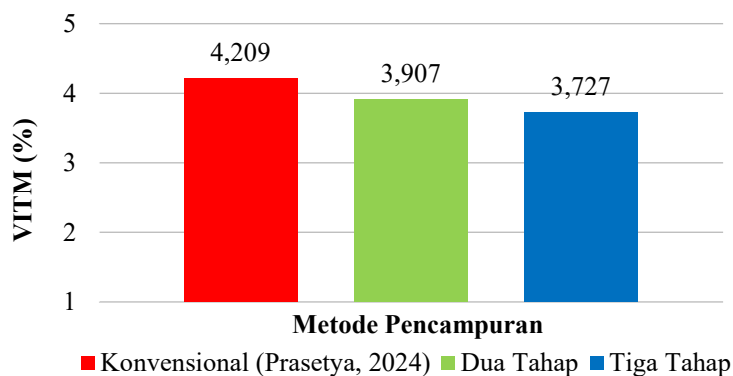
Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka pembahasannya dapat diuraikan seperti sebagai berikut.

5.2.1 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Parameter Volumetrik pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Parameter volumetrik pada penelitian ini terdiri dari nilai VITM, VFWA, VMA, dan *density*. Parameter-parameter tersebut akan memberikan gambaran mengenai distribusi material, besarnya rongga udara, serta tingkat kepadatan campuran. Adapun penjelasan dari setiap parameter volumetrik tersebut yaitu sebagai berikut.

1. *Voids in Total Mix* (VITM)

VITM merupakan persentase rongga udara di dalam suatu campuran agregat dan aspal yang telah melalui proses pemadatan. Besar kecilnya nilai VITM ini akan menentukan ketahanan dan kekuatan suatu campuran terhadap deformasi plastis. Apabila nilai VITM terlalu tinggi, artinya rongga udara dalam campuran semakin besar dan akan menyebabkan campuran bersifat *porous*. Sedangkan, apabila nilai VITM terlalu rendah, artinya rongga udara dalam campuran semakin terbatas, sehingga menyebabkan fleksibilitas campuran menurun dan potensi terjadinya keretakan meningkat. Adapun pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai VITM pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5. 2 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VITM pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.2, terlihat bahwa nilai VITM mengalami penurunan seiring dengan perubahan metode pencampuran. Pada metode konvensional, diperoleh nilai VITM sebesar 4,209%, kemudian pada metode dua tahap menurun menjadi 3,907%, dan menurun lagi pada metode tiga tahap menjadi 3,727%. Apabila dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh nilai tersebut masih berada dalam rentang nilai yang dipersyaratkan, yaitu 3 – 5%. Hal ini menunjukkan bahwa ketiga metode pencampuran tersebut telah mampu menghasilkan campuran dengan persentase rongga udara yang telah memenuhi standar. Selain itu, apabila dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA, berbagai metode pencampuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai VITM. Hal ini dikarenakan hasil nilai signifikansi MANOVA yang didapatkan sebesar 0,217 > 0,05 yang mana menandakan H_0 diterima.

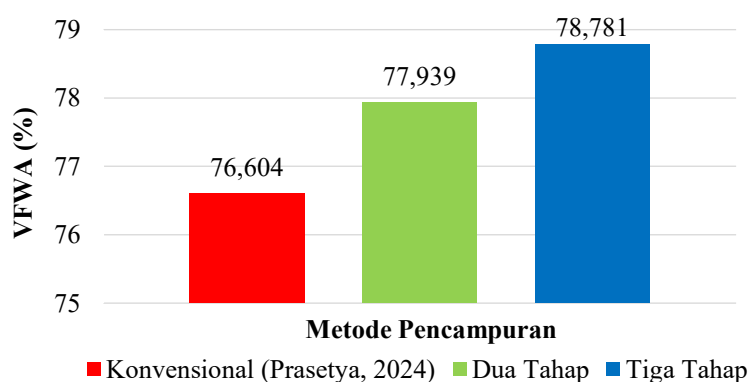
Meskipun demikian, terlihat bahwa metode dua tahap dan tiga tahap menghasilkan nilai VITM yang sedikit lebih rendah dibandingkan metode konvensional, dengan nilai paling rendah berada pada metode tiga tahap. Hal ini berkaitan dengan proses pencampuran bahan penyusun yang dilakukan secara bertahap. Pada metode dua tahap, proses pencampuran diawali dengan agregat kasar yang telah dipanaskan untuk dilapisi aspal terlebih dahulu, kemudian dilanjutkan dengan penambahan *filler* dan agregat halus yang telah dipanaskan juga pada suhu tertentu. Sementara itu, pada metode tiga tahap, penambahan *filler* dan agregat halus dilakukan secara terpisah, sehingga kontrol terhadap proses pencampuran menjadi lebih baik. Proses ini membuat aspal memiliki kesempatan untuk melapisi agregat secara merata, sehingga distribusi aspal di dalam campuran menjadi lebih homogen, serta pengisian rongga menjadi lebih efektif. Berbeda dengan metode konvensional yang proses pencampuran dilakukan secara sekaligus dalam satu tahap, sehingga berpotensi menyebabkan distribusi bahan penyusun kurang optimal, serta menghasilkan rongga udara yang lebih besar. Oleh karena itu, meskipun pengaruh yang diberikan tidak signifikan, metode tiga tahap dinilai sebagai

metode yang paling optimal menghasilkan nilai VITM yang lebih rendah dan lebih terkontrol.

Kondisi nilai VITM metode bertahap (dua tahap, tiga tahap) yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Iqbal dan Fauziah (2023), dimana nilai VITM berdasarkan metode konvensional dan bertahap pada campuran HRS-WC juga mengalami penurunan, yaitu nilai VITM metode konvensional sebesar 5,069% dan metode bertahap sebesar 4,766%.

2. *Voids Filled with Asphalt* (VFWA)

VFWA merupakan persentase dari rongga udara dalam suatu campuran yang terisi oleh aspal setelah proses pemadatan berlangsung. Nilai VFWA ini akan menentukan seberapa besar kemampuan campuran untuk menahan air agar tidak masuk ke dalam campuran, serta menentukan tingkat kelenturannya. Apabila nilai VFWA terlalu tinggi akan menyebabkan risiko terjadinya *bleeding*. Sementara itu, apabila nilai VFWA rendah artinya rongga yang ada dalam campuran tidak terisi aspal secara optimal. Oleh karena itu, nilai VFWA yang sesuai akan memberikan ketahanan yang lebih tinggi terhadap kerusakan, sehingga stabilitas terjaga dan umur layan perkerasan menjadi lebih panjang. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai VFWA pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5. 3 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VFWA pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

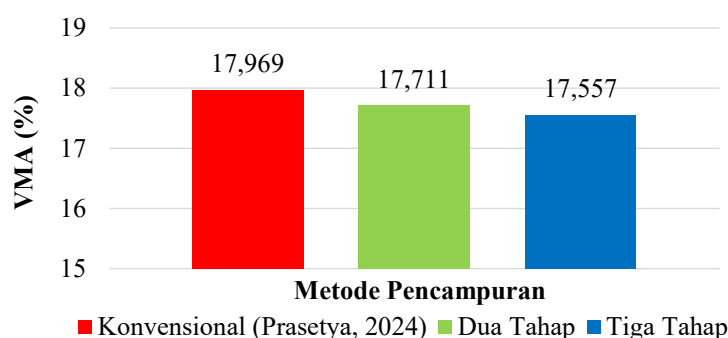
Berdasarkan Gambar 5.3, dapat dilihat bahwa nilai VFWA justru mengalami peningkatan seiring dengan perubahan metode pencampuran. Pada metode pencampuran konvensional diperoleh nilai VFWA sebesar 76,064%, lalu pada metode dua tahap meningkat menjadi 77,939%, dan metode tiga tahap meningkat lagi menjadi 78,781%. Hal ini sejalan dengan kondisi nilai VITM pada ketiga metode pencampuran sebelumnya, di mana campuran dengan nilai VITM yang lebih rendah akan menghasilkan nilai VFWA yang lebih tinggi. Artinya, jika dilihat pada metode tiga tahap, rongga yang ada dalam campuran cenderung lebih banyak terisi oleh aspal, karena nilai VITM yang dihasilkan lebih rendah dan nilai VFWA lebih tinggi dibandingkan metode lainnya. Akan tetapi, hasil nilai signifikansi MANOVA menunjukkan nilai sebesar $0,221 > 0,05$ yang mana menandakan H_0 diterima. Dengan demikian, metode pencampuran yang berbeda tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai VFWA campuran.

Meskipun demikian, peningkatan nilai VFWA ini terjadi karena metode pencampuran bertahap, yaitu dua tahap dan tiga tahap membuat distribusi agregat, *filler*, dan aspal terdistribusi lebih merata. Hal ini membantu aspal mengisi rongga-rongga dalam campuran dengan lebih optimal sehingga aspal yang terperangkap dalam campuran akan lebih tinggi serta homogenitas campuran lebih meningkat (Maqbool dkk., 2022). Sedangkan pada metode konvensional yang dilakukan secara satu tahap membuat distribusi material kurang merata, sehingga masih banyak rongga-rongga dalam campuran yang belum terisi oleh aspal. Dengan demikian, meskipun pengaruh yang diberikan tidak signifikan, metode tiga tahap dinilai sebagai metode yang memberikan hasil karakteristik campuran volumetrik (VFWA) yang lebih terkontrol.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Yaro dkk. (2021), dimana nilai VFWA yang dihasilkan melalui metode pencampuran bertahap menunjukkan terjadinya peningkatan. Peningkatan tersebut terjadi karena proses pencampuran yang dilakukan lebih terkontrol di setiap tahapannya, sehingga mampu memberikan distribusi material yang lebih merata, dan aspal menjadi lebih efektif dalam mengisi rongga-rongga pada campuran.

3. *Voids in Mineral Aggregate (VMA)*

VMA merupakan persentase rongga udara yang terdapat di antara butiran-butiran agregat dalam campuran agregat aspal yang telah dipadatkan, mencakup rongga yang terisi oleh aspal serta rongga yang terisi oleh udara. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai VMA pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5. 4 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai VMA pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

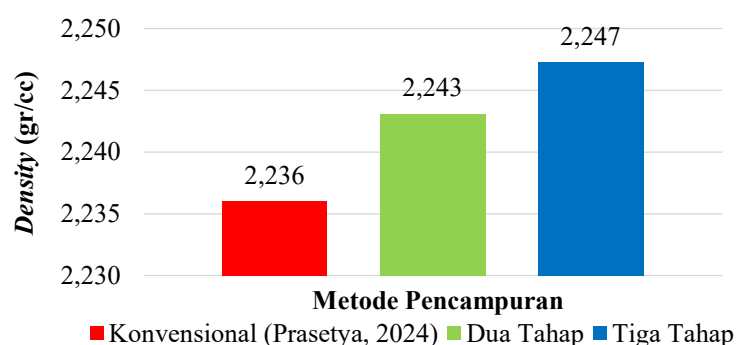
Berdasarkan Gambar 5.4, dapat dilihat bahwa nilai VMA mengalami penurunan seiring dengan perubahan metode pencampuran, di mana pada metode pencampuran konvensional sebesar 17,969%, metode dua tahap sebesar 17,711%, dan metode tiga tahap sebesar 17,557%. Jika dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh nilai VMA tersebut masih berada pada batas minimum yang disyaratkan yaitu 17%. Selain itu, dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA, diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,217 > 0,05$, yang artinya H_0 diterima. Dengan demikian, metode pencampuran yang berbeda tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai VMA campuran.

Meskipun tidak signifikan, terlihat bahwa metode dua tahap dan tiga tahap menghasilkan nilai VMA yang sedikit lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Hal ini terjadi karena proses pencampuran dua tahap dan terutama tiga tahap memungkinkan distribusi agregat dan pelapisan aspal pada campuran menjadi lebih merata, sehingga susunan agregat menjadi lebih

rapat dan stabil. Kondisi tersebut menyebabkan distribusi aspal dalam campuran menjadi lebih optimal dan mengurangi potensi penumpukan aspal pada rongga antar agregat. Sebaliknya, pada metode konvensional seluruh bahan dicampur secara sekaligus dalam satu tahap sehingga potensi terjadinya ketidakaturan susunan agregat akan menjadi lebih besar. Kurniawan dkk. (2022) menjelaskan bahwa campuran dengan distribusi bahan yang merata akan lebih mudah mencapai kondisi kepadatan optimal, sehingga ruang antar agregat dapat dioptimalkan. Dengan demikian, meskipun pengaruh yang diberikan tidak signifikan, metode tiga tahap dinilai sebagai metode yang memberikan hasil karakteristik campuran volumetrik (VMA) yang lebih terkontrol. Kondisi nilai VMA yang mengalami penurunan akibat metode pencampuran dua tahap dan tiga tahap sejalan dengan penelitian Hesami dkk. (2015) yang menyatakan bahwa proses pencampuran bertahap dapat membuat distribusi bahan penyusun campuran menjadi lebih rapat dan stabil.

4. Kepadatan (*Density*)

Density merupakan parameter yang menggambarkan seberapa rapat susunan butiran agregat dan aspal setelah melalui proses pemadatan. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *density* pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *Density* pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.5, dapat dilihat bahwa nilai *density* mengalami peningkatan seiring dengan perubahan metode pencampuran. Pada metode pencampuran konvensional diperoleh nilai *density* sebesar 2,236 gr/cc, lalu pada metode dua tahap meningkat menjadi 2,243 gr/cc, dan meningkat lagi pada metode tiga tahap menjadi 2,247 gr/cc. Selain itu, dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA, diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,228 > 0,05$, yang mana menandakan H_0 diterima. Dengan demikian, metode pencampuran yang berbeda tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *density* campuran.

Meskipun tidak signifikan, terlihat bahwa metode dua tahap dan tiga tahap menghasilkan nilai *density* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Pada metode konvensional, distribusi material yang terjadi kurang merata karena proses pencampuran yang dilakukan secara sekaligus dalam satu tahap. Hal ini menyebabkan pengisian rongga dalam campuran menjadi kurang optimal, sehingga setelah dilakukannya pemadatan masih terdapat rongga yang tersisa, serta nilai *density* yang dihasilkan lebih rendah. Sebaliknya, pada metode dua tahap dan terutama pada metode tiga tahap, proses pencampuran dilakukan dengan lebih terkontrol sesuai urutan yang ditetapkan pada masing-masing metode. Hal ini mampu membuat distribusi ukuran material tersebar secara merata dan mendukung butiran agregat agar lebih mudah tersusun rapat saat proses pemadatan, sehingga dapat menghasilkan nilai *density* yang sedikit lebih tinggi dibandingkan metode konvensional (Aprianto dkk., 2025). Kondisi ini juga sejalan dengan penelitian Hermadi dan Nono (2004) yang menyatakan bahwa peningkatan nilai *density* juga akan diikuti oleh penurunan rongga antar agregat (VMA) dan rongga dalam campuran (VITM), serta peningkatan rongga terisi aspal (VFWA).

Dengan demikian, meskipun secara statistik metode pencampuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan, metode tiga tahap dinilai sebagai metode yang mampu menghasilkan campuran dengan tingkat kepadatan yang lebih baik jika dibandingkan dengan metode dua tahap dan metode

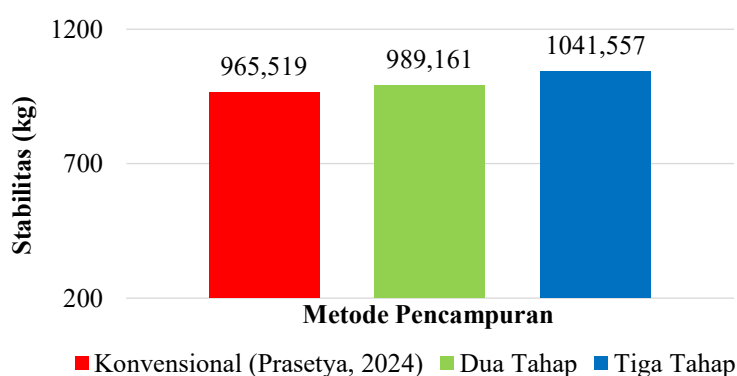
konvensional. Hal ini dibuktikan oleh nilai *density* metode tiga tahap yang lebih tinggi, nilai VMA dan VITM yang menurun, serta nilai VFWA yang meningkat. Hasil yang sama juga didapatkan oleh Iqbal dan Fauziah (2023) di dalam penelitiannya, di mana nilai *density* metode bertahap lebih tinggi dibandingkan metode konvensional, begitu juga dengan nilai VMA dan VITM yang ikut menurun, serta nilai VFWA yang meningkat.

5.2.2 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Parameter Kekuatan pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Parameter kekuatan pada penelitian ini terdiri dari nilai Stabilitas, *flow*, MQ, ITS, dan CL. Parameter-parameter tersebut akan digunakan sebagai dasar evaluasi kemampuan perkerasan dalam menahan beban serta ketahanan terhadap deformasi. Adapun penjelasan dari setiap parameter kekuatan tersebut yaitu sebagai berikut.

1. Stabilitas (*Stability*)

Nilai stabilitas merupakan nilai yang menggambarkan kemampuan lapis perkerasan untuk menahan beban dari kendaraan lalu lintas tanpa harus mengalami kerusakan yang berarti. Semakin tinggi nilai stabilitas, artinya lapis perkerasan mempunyai kekuatan dan kekakuan yang optimal. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai stabilitas pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5. 6 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai Stabilitas pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.6, terlihat bahwa nilai stabilitas mengalami peningkatan seiring dengan perubahan metode pencampuran. Pada metode pencampuran konvensional diperoleh nilai sebesar 965,519 kg, lalu pada metode dua tahap meningkat menjadi sebesar 989,161 kg, dan pada metode tiga tahap meningkat lagi menjadi sebesar 1041,557 kg. Jika dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh nilai stabilitas tersebut telah melewati batas minimum yang disyaratkan yaitu 600 kg. Hal ini menunjukkan bahwa metode konvensional, dua tahap, dan tiga tahap mampu menghasilkan campuran dengan ketahanan dan kekuatan struktural yang optimal terhadap beban lalu lintas. Selain itu, apabila dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA, diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,020 < 0,05$, yang artinya H_0 ditolak. Dengan demikian, metode pencampuran yang berbeda akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai stabilitas campuran.

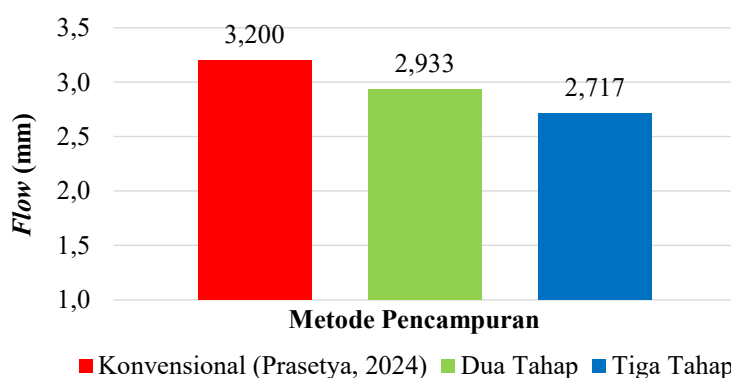
Pengaruh yang signifikan ini menunjukkan bahwa metode dua tahap dan terutama metode tiga tahap dengan stabilitas tertinggi mampu menghasilkan struktur agregat yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Proses pencampuran yang berurutan sesuai ketentuan pada metode dua tahap dan tiga tahap mendukung proses distribusi material campuran menjadi lebih merata, sehingga susunan antar agregat akan lebih rapat dan saling mengunci, serta meningkatkan ikatan adhesi antara agregat dan aspal. Hal ini akan menghasilkan campuran dengan stabilitas tinggi untuk menahan kerusakan yang terjadi akibat beban lalu lintas. Sebaliknya, metode konvensional yang dilakukan secara langsung akan menghasilkan distribusi material yang tidak merata, sehingga pengisian rongga antar agregat tidak optimal dan ikatan adhesinya akan kurang maksimal, serta stabilitas yang dihasilkan akan lebih rendah. Temuan ini sejalan dengan pendapat Fatardhoo dkk. (2024) yang mengatakan bahwa semakin rata distribusi aspal dan agregat dalam campuran, maka semakin tinggi *interlocking* yang akan terbentuk. Kondisi ini akan membuat campuran menjadi lebih kuat dan tahan terhadap beban lalu

lintas yang berulang, ditandai dengan stabilitasnya yang tinggi dan kemampuan untuk mencegah tidak terjadinya deformasi.

Dengan demikian, metode pencampuran bertahap, terutama metode tiga tahap terbukti memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan stabilitas campuran. Hal ini dapat dilihat dari nilai stabilitas metode tiga tahap yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode dua tahap dan konvensional, sehingga campuran yang dihasilkan akan lebih kuat dan mampu menahan beban lalu lintas secara optimal.

2. Kelelahan (*flow*)

Flow merupakan nilai yang menunjukkan seberapa besar perubahan bentuk campuran beraspal akibat pembebanan yang diberikan, terjadi pada saat kondisi stabilitas maksimum. Nilai *flow* yang terlalu tinggi dikhawatirkan akan mudah mengalami perubahan bentuk secara permanen. Sebaliknya, apabila nilai *flow* terlalu rendah akan membuat perkerasan mudah mengalami keretakan, karena campuran memiliki sifat yang lebih kaku. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *flow* pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.7.



Gambar 5. 7 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai *Flow* pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.7, dapat dilihat bahwa nilai *flow* tertinggi yaitu pada metode konvensional sebesar 3,200 mm, lalu pada metode dua tahap menurun menjadi 2,933 mm dan menurun kembali pada metode tiga tahap menjadi

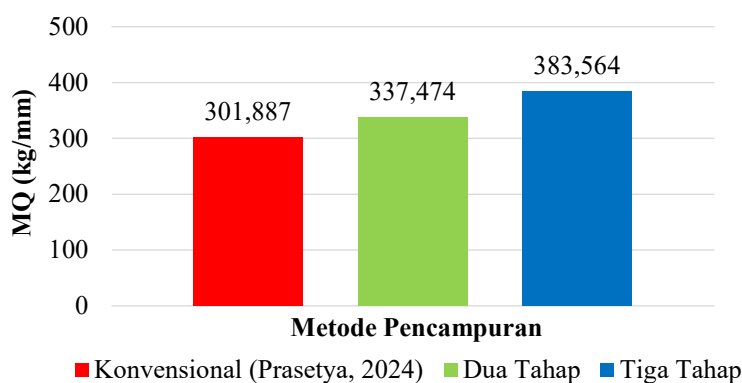
sebesar 2,717 mm. Penurunan nilai *flow* ini, menunjukkan bahwa campuran yang dihasilkan melalui metode dua tahap dan terutama tiga tahap memiliki sifat lebih kaku dan ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi plastis dibandingkan metode konvensional. Kondisi ini disebabkan oleh metode dua tahap dan tiga tahap yang mampu menghasilkan distribusi material yang lebih merata, sehingga rongga dalam campuran terisi oleh aspal secara optimal, struktur campuran lebih stabil, serta tidak mudah mengalami perubahan bentuk saat diberikan pembebanan. Sebaliknya, pada metode konvensional, proses pencampuran dilakukan sekaligus dalam satu tahap, sehingga berpotensi menyebabkan distribusi materialnya menjadi kurang merata, rongga campuran tidak terisi secara optimal dan campuran akan mudah mengalami deformasi. Hal ini dapat dilihat dari nilai *flow* metode konvensional yang lebih tinggi dibandingkan metode dua tahap dan tiga tahap.

Selanjutnya, jika dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh nilai *flow* tersebut masih berada pada rentang nilai yang disyaratkan yaitu 2,0 mm hingga 4,5 mm. Selain itu, apabila dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA, diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,001 < 0,05$, yang artinya H_0 ditolak. Dengan demikian, metode pencampuran yang berbeda akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *flow* campuran. Metode pencampuran tiga tahap terbukti dapat memberikan penurunan nilai *flow* melalui penyeimbangan yang lebih baik antara stabilitas dan fleksibilitas campuran, sehingga lebih kuat dan tahan terhadap deformasi. Hal ini sejalan dengan Hadi dkk. (2025) yang menyatakan bahwa campuran dengan metode pencampuran bertahap mampu membuat daya ikat antar agregat dan aspal menjadi lebih baik, sehingga campuran akan memiliki keseimbangan antara kelenturan atau ketahanan terhadap perubahan bentuk.

3. *Marshall Quotient* (MQ)

MQ merupakan nilai yang menggambarkan tingkat kelenturan campuran melalui perbandingan antara nilai stabilitas dan nilai *flow*. Apabila nilai MQ tinggi, artinya campuran lebih bersifat kaku. sebaliknya, apabila MQ rendah,

artinya campuran bersifat lebih lunak dan rentan terhadap deformasi. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai MQ pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.8.



Gambar 5. 8 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai MQ pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

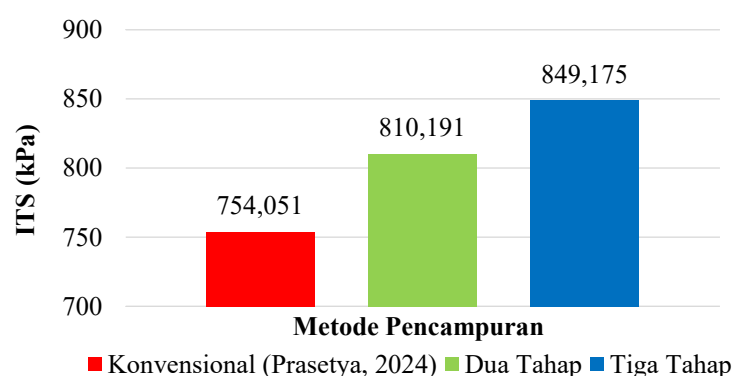
Berdasarkan Gambar 5.8, dapat dilihat bahwa nilai MQ mengalami peningkatan seiring dengan perubahan metode pencampuran, di mana pada metode pencampuran konvensional sebesar 301,887 kg/mm, metode dua tahap sebesar 337,474 kg/mm, dan metode tiga tahap sebesar 383,564 kg/mm. Jika dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA, diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,001 < 0,05$, yang menandakan H_0 ditolak. Dengan demikian, metode pencampuran yang berbeda akan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai MQ campuran.

Peningkatan nilai MQ berkaitan dengan nilai stabilitas yang meningkat dan nilai *flow* yang menurun. Peningkatan nilai ini menunjukkan bahwa campuran dengan metode tiga tahap memiliki kombinasi lebih baik antara stabilitas dan *flow* dibandingkan metode dua tahap dan konvensional, sehingga mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi berlebihan. Nilai stabilitas yang tinggi dan nilai *flow* yang lebih rendah membuat campuran menjadi lebih kaku dan lebih tahan terhadap deformasi. Hal tersebut terjadi karena metode dua tahap dan terutama metode tiga tahap mampu memberikan campuran dengan distribusi material yang lebih merata, sehingga *interlocking* antar

butiran agregat semakin meningkat. Berbeda dengan metode konvensional yang distribusi materialnya kurang merata, sehingga dihasilkan nilai stabilitas yang lebih rendah dan *flow* yang lebih tinggi. Kondisi ini sejalan dengan Fatmawati (2013) yang menyebutkan bahwa nilai MQ yang rendah menggambarkan campuran aspal cenderung lebih lentur dan mudah mengalami perubahan bentuk, sedangkan nilai MQ tinggi menggambarkan campuran lebih kaku dan tahan terhadap deformasi.

4. *Indirect Tensile Strength (ITS)*

ITS merupakan parameter yang menggambarkan besarnya gaya kuat tarik tidak langsung yang mampu ditahan oleh suatu campuran beraspal. Parameter ini digunakan untuk memperkirakan ketahanan campuran terhadap potensi kerusakan berupa retak, khususnya retak akibat tegangan tarik yang timbul dari beban lalu lintas berulang maupun pengaruh perubahan suhu. Nilai ITS yang tinggi menunjukkan bahwa ikatan dalam campuran cukup kuat, baik antara aspal dan agregat maupun antar aspal itu sendiri, sehingga campuran tidak mudah mengalami retak. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai ITS pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.9.



Gambar 5. 9 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai ITS pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

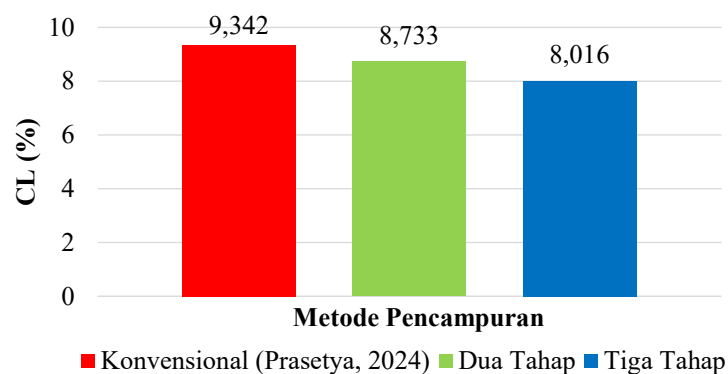
Berdasarkan Gambar 5.9, dapat dilihat bahwa pada metode pencampuran konvensional diperoleh nilai ITS sebesar 754,051 kPa, lalu pada metode dua

tahap meningkat menjadi sebesar 810,191 kPa, dan meningkat kembali pada metode tiga tahap menjadi sebesar 849,175 kPa. Peningkatan nilai ITS ini menunjukkan bahwa pada metode dua tahap dan terutama metode tiga tahap mampu menghasilkan campuran yang lebih tahan terhadap tegangan tarik yang timbul dari beban lalu lintas berulang maupun pengaruh perubahan suhu. Kondisi ini terjadi karena proses pencampuran yang dilakukan secara bertahap dengan suhu yang terkontrol memungkinkan distribusi material serta pelapisan aspal pada agregat menjadi lebih merata. Hal tersebut menyebabkan ikatan antara aspal dan agregat menjadi lebih baik serta struktur internal campuran menjadi lebih rapat dan stabil. Hasilnya campuran akan memiliki kekuatan yang lebih baik untuk menahan tegangan tarik yang terjadi. Sebaliknya, pada metode konvensional, proses pencampuran yang dilakukan secara langsung cenderung menghasilkan material yang kurang homogen dan pelapisan aspal pada agregat menjadi kurang optimal. Hal ini menyebabkan ikatan antara aspal dan agregat tidak terbentuk maksimal, sehingga kekuatan tarik campuran menjadi lebih rendah dan lebih rentan terhadap keretakan. Selain itu, berdasarkan hasil analisis statistik MANOVA diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,008 < 0,05$ yang menunjukkan bahwa H_0 ditolak, sehingga perbedaan metode pencampuran memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai ITS campuran. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode tiga tahap merupakan metode yang paling efektif dalam meningkatkan ketahanan campuran terhadap potensi keretakan dibandingkan metode lainnya. Temuan ini sejalan dengan penelitian Priambodo dan Fauziah (2026) yang memperkuat bahwa metode pencampuran bertahap memberikan nilai ITS yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional.

5. *Cantabro Loss (CL)*

CL merupakan parameter yang menggambarkan ketahanan campuran beraspal terhadap keausan atau pelepasan butiran agregat akibat gesekan. Nilai ini diperoleh melalui pengujian menggunakan mesin *Los Angeles* dengan jumlah putaran sebanyak 300 kali tanpa bola baja. Hal ini bertujuan untuk mensimulasikan seberapa baik campuran dapat menahan beban lalu

lintas berulang. Selama proses pengujian, campuran akan kehilangan berat akibat pelepasan butiran agregat. Apabila nilai kehilangan berat semakin kecil, maka campuran memiliki kemampuan yang semakin baik dalam menghadapi perilaku dari beban lalu lintas berulang, begitupun sebaliknya. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai CL pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.10.



Gambar 5. 10 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai CL pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.10, terlihat nilai CL mengalami penurunan seiring dengan perubahan metode pencampuran, di mana pada metode pencampuran konvensional sebesar 9,342%, metode dua tahap sebesar 8,733% dan metode tiga tahap sebesar 8,016%. Penurunan nilai CL ini menandakan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap keausan dan kehilangan butiran akibat berbagai metode pencampuran. Hal ini terjadi karena proses pencampuran metode dua tahap dan terutama tiga tahap yang dilakukan secara lebih terkontrol, sehingga distribusi material yang dihasilkan akan lebih merata, rongga antar agregat akan terisi aspal dengan lebih baik, serta ikatan antar material menjadi lebih kuat. Kondisi tersebut menyebabkan campuran menjadi lebih rapat dan stabil, sehingga mampu menahan benturan dan gesekan saat berada pada mesin *Loss Angeles*. Sebaliknya, pada metode konvensional, proses pencampuran yang dilakukan dalam satu tahap dinilai menghasilkan distribusi material yang kurang merata,

serta rongga antar agregat yang relatif lebih besar. Hal ini akan menyebabkan ikatan antar material tidak terbentuk secara optimal, sehingga campuran menjadi lebih rentan mengalami pelepasan butiran agregat saat berada pada mesin *Loss Angeles*.

Jika dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh nilai CL tersebut masih berada pada rentang nilai yang disyaratkan yaitu $< 20\%$. Selain itu, jika dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,228 > 0,05$ yang menunjukkan bahwa H_0 diterima, sehingga perbedaan metode pencampuran tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai CL campuran. Meskipun demikian, metode pencampuran tiga tahap tetap menunjukkan nilai CL yang lebih rendah dibandingkan metode lainnya, yang mengindikasikan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap benturan dan gesekan di dalam mesin uji keausan. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hadi dkk. (2025) yang menyebutkan bahwa campuran dengan metode bertahap tiga memiliki *interlocking* yang baik antar materialnya sehingga dapat mempertahankan kondisi awalnya pada saat benturan diterima, ditandai dengan nilai CL yang lebih rendah.

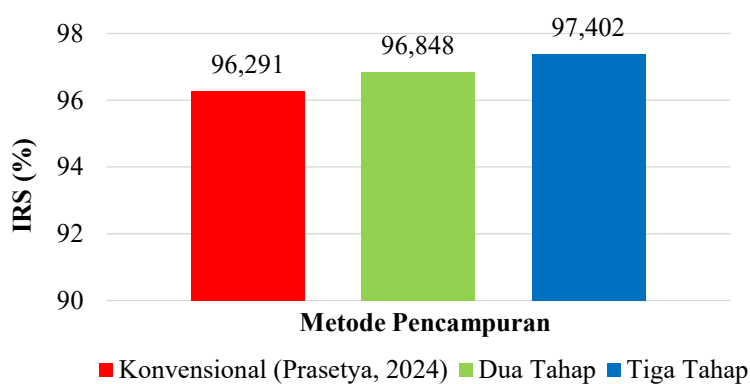
5.2.3 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Parameter Durabilitas pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Parameter durabilitas pada penelitian ini terdiri dari nilai IRS, TSR, dan DD. Parameter-parameter tersebut akan digunakan sebagai dasar evaluasi durabilitas campuran dalam mempertahankan kinerja terhadap pengaruh lingkungan, seperti air dan perubahan suhu, serta ketahanannya terhadap kerusakan akibat beban lalu lintas berulang. Adapun penjelasan pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap campuran SMA berfiller FA batu bara 50% yang ditinjau dari parameter durabilitas yaitu sebagai berikut.

1. *Index of Retained Strength* (IRS)

IRS merupakan nilai yang menggambarkan besarnya ketahanan atau keawetan dari suatu campuran terhadap pengaruh air dan suhu. Selain itu, nilai IRS ini umumnya didefinisikan sebagai persentase nilai stabilitas

Marshall sisa setelah campuran aspal mengalami perendaman. Nilai ini diperoleh dengan membandingkan stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 24 jam pada *waterbath* suhu 60°C dengan stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 30 menit pada *waterbath* dengan suhu yang sama. Adapun nilai stabilitas perendaman selama 24 jam dan 30 menit dapat dilihat pada Lampiran 4. Berdasarkan lampiran tersebut, nilai stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 24 jam pada *waterbath* suhu 60°C berturut-turut untuk metode pencampuran konvensional, dua tahap, dan tiga tahap adalah 929,707 kg; 957,979 kg; dan 1014,493 kg. Sementara itu, setelah perendaman selama 30 menit diperoleh nilai sebesar 965,519 kg; 989,161 kg; dan 1041,557 kg. Hasil analisis statistik MANOVA menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,010 untuk perendaman 24 jam dan 0,020 untuk perendaman 30 menit, dimana kedua nilai tersebut lebih kecil dari 0,05 sehingga menunjukkan bahwa H_0 ditolak. Dengan demikian, perbedaan metode pencampuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai stabilitas campuran, baik pada kondisi perendaman 24 jam maupun 30 menit. Selanjutnya, diperoleh persentase perbandingan (IRS) antara nilai stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 24 jam dengan stabilitas *Marshall* setelah perendaman selama 30 menit akibat pengaruh berbagai metode pencampuran pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% yang dapat dilihat pada Gambar 5.11.



Gambar 5. 11 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai IRS pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

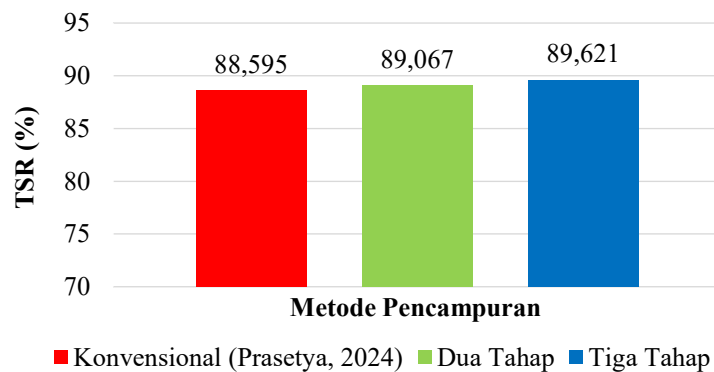
Berdasarkan Gambar 5.11, dapat dilihat bahwa nilai IRS mengalami peningkatan seiring dengan perubahan metode pencampuran, di mana pada metode pencampuran konvensional diperoleh nilai IRS sebesar 96,291%, metode dua tahap sebesar 96,848%, dan metode tiga tahap sebesar 97,402%. Jika dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh nilai IRS tersebut telah melampaui batas minimum yang disyaratkan yaitu 90%. Peningkatan nilai IRS ini menunjukkan bahwa metode pencampuran dua tahap dan terutama tiga tahap mampu menghasilkan campuran dengan ketahanan yang lebih baik terhadap penurunan stabilitas akibat perendaman dalam jangka waktu tertentu. Nilai IRS yang lebih tinggi pada metode dua tahap dan terutama tiga tahap dibandingkan dengan metode konvensional, dipengaruhi oleh distribusi aspal dan agregat yang lebih merata, sehingga campuran yang dihasilkan akan memiliki tingkat homogenitas yang tinggi. Selain itu, metode dua tahap dan tiga tahap ini juga memungkinkan seluruh bahan campuran berinteraksi dengan baik, sehingga aspal dapat melapisi agregat secara optimal. Kondisi ini meningkatkan kualitas ikatan adhesi, sehingga air sulit untuk masuk dan memisahkan aspal dari agregat. Begitu juga sebaliknya, pada metode konvensional, distribusi material yang kurang merata menyebabkan masih adanya rongga yang tidak terisi secara optimal serta pelapisan agregat yang kurang sempurna. Hal ini membuat campuran lebih rentan terhadap masuknya air dan terjadinya pelepasan aspal dari agregat, sehingga nilai IRS yang dihasilkan lebih rendah.

Oleh karena itu, metode tiga tahap dinilai sebagai metode yang mampu memberikan hasil karakteristik campuran yang lebih stabil, ikatan yang lebih kuat, serta ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh air. Kondisi ini sejalan dengan penjelasan Tajudin dan Suparma (2017) yang menyebutkan bahwa ikatan agregat dan aspal yang lemah akan memberikan tingkat stabilitas yang rendah, sehingga campuran lebih mudah dipengaruhi air saat perendaman, dan akan berdampak pada nilai IRS yang menurun.

2. *Tensile Strength Ratio (TSR)*

TSR merupakan parameter yang diperoleh dari perbandingan antara kekuatan tarik campuran yang telah direndam selama 24 jam pada *waterbath* bersuhu 60°C dengan kekuatan tarik campuran yang telah direndam selama 30 menit pada *waterbath* dengan suhu yang sama, lalu hasil tersebut diubah menjadi bentuk persentase. Apabila nilai TSR semakin tinggi, artinya campuran memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mempertahankan kekuatan tariknya setelah melewati perendaman, begitupun sebaliknya. Adapun nilai kekuatan tarik campuran setelah perendaman 24 jam dan 30 menit dapat dilihat pada Lampiran 7. Berdasarkan lampiran tersebut, diperoleh nilai kekuatan tarik campuran setelah perendaman 24 jam berturut-turut untuk metode pencampuran konvensional, dua tahap, dan tiga tahap adalah 668,050 kPa; 721,615 kPa; dan 761,036 kPa. Sementara itu, setelah perendaman selama 30 menit diperoleh nilai sebesar 754,051 kPa; 810,191 kPa; dan 849,175 kPa. Hasil analisis statistik MANOVA menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,003 untuk perendaman 24 jam dan 0,008 untuk perendaman 30 menit, dimana kedua nilai tersebut lebih kecil dari 0,05 sehingga menunjukkan bahwa H_0 ditolak. Dengan demikian, perbedaan metode pencampuran memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai kekuatan tarik campuran, baik pada kondisi perendaman 24 jam maupun 30 menit.

Selanjutnya, diperoleh persentase perbandingan (TSR) antara nilai kekuatan tarik campuran setelah perendaman selama 24 jam dengan kekuatan tarik campuran setelah perendaman selama 30 menit. Hasil persentase ini menggambarkan ketahanan campuran terhadap kerusakan akibat pengaruh air pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dengan berbagai metode pencampuran. Adapun hasil nilai TSR untuk masing-masing metode pencampuran dapat dilihat pada Gambar 5.12 berikut.



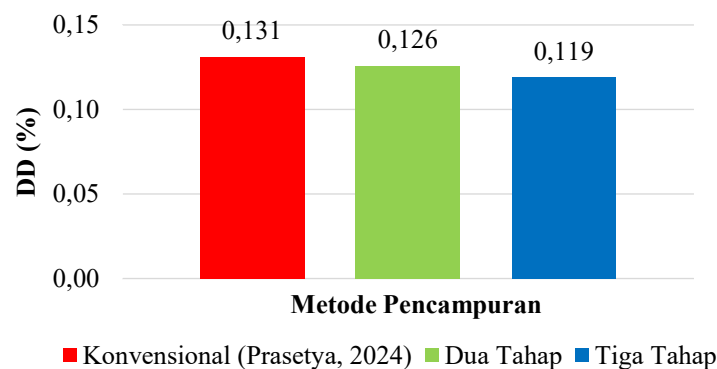
Gambar 5. 12 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai TSR pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.12, dapat dilihat bahwa nilai TSR mengalami peningkatan seiring dengan perubahan metode pencampuran, di mana pada metode pencampuran konvensional sebesar 88,595%, metode dua tahap sebesar 89,067%, dan metode tiga tahap sebesar 89,621%. Jika dibandingkan dengan SNI 8129:2015, seluruh nilai TSR tersebut masih berada pada batas minimum yang disyaratkan yaitu 80%. Nilai TSR yang lebih tinggi menunjukkan bahwa campuran memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh air, khususnya dalam mempertahankan kekuatan tarik setelah mengalami perendaman. Peningkatan nilai TSR pada metode pencampuran bertahap, baik dua tahap dan terutama tiga tahap, dipengaruhi oleh proses pencampuran yang dilakukan secara lebih teratur dan terkontrol, baik dari segi urutan pencampuran, maupun suhu pemanasan. Kondisi ini memungkinkan aspal menyelimuti agregat secara lebih merata, sehingga ikatan antara aspal dan agregat menjadi lebih kuat. Hasilnya, campuran tetap mampu mempertahankan kekuatannya meskipun berada dalam kondisi basah. Sebaliknya, pada metode konvensional, proses pencampuran yang dilakukan sekaligus dalam satu tahap bisa menghasilkan distribusi material yang kurang merata. Hal ini menyebabkan ikatan antar material tidak terbentuk secara optimal, sehingga campuran akan lebih mudah dipengaruhi oleh air dan mengalami penurunan kekuatan tarik setelah perendaman. Penelitian oleh Iqbal dan Fauziah (2023) menjelaskan bahwa metode

pencampuran bertahap mampu memperkuat sifat adhesi campuran dalam menahan gaya tarik yang disimulasikan dalam proses perendaman. Dengan demikian, metode pencampuran bertahap, khususnya metode tiga tahap, menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam meningkatkan ketahanan campuran terhadap pengaruh air jika dibandingkan dengan metode konvensional dan dua tahap.

3. *Draindown* (DD)

DD merupakan parameter yang menggambarkan persentase aspal yang terlepas atau mengalir keluar dari campuran aspal, akibat pengaruh suhu tinggi. Apabila nilai DD semakin rendah, artinya aspal dapat tertahan dan terdistribusi secara lebih stabil di dalam campuran, begitupun sebaliknya. Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai DD pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Gambar 5.13.



Gambar 5. 13 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Nilai DD pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.13, pada metode pencampuran konvensional diperoleh nilai DD sebesar 0,131%, lalu pada metode dua tahap menurun menjadi sebesar 0,126% dan pada metode tiga tahap semakin menurun menjadi sebesar 0,119%. Jika dibandingkan dengan Spesifikasi Umum Bina Marga 2025, seluruh nilai DD tersebut masih berada pada rentang nilai yang disyaratkan yaitu $< 0,3\%$. Penurunan nilai DD ini menunjukkan bahwa campuran memiliki stabilitas yang lebih baik dalam mempertahankan aspal

agar tidak terpisah dari agregat selama proses produksi campuran. Namun, jika dilihat dari hasil analisis statistik MANOVA diperoleh nilai signifikansi sebesar $0,906 > 0,05$ yang menunjukkan bahwa H_0 diterima, sehingga perbedaan metode pencampuran tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai DD campuran.

Pada metode pencampuran konvensional, seluruh material dicampur sekaligus dalam satu tahap, sehingga distribusi aspal di dalam campuran akan kurang merata. Kondisi ini menyebabkan sebagian aspal sulit untuk terikat secara optimal pada permukaan agregat, sehingga potensi aspal mengalir keluar dari campuran semakin meningkat, yang dapat dilihat dari nilai DD yang lebih tinggi. Reny (2026) juga menjelaskan bahwa distribusi material yang tidak merata akan menyebabkan rongga dalam campuran menjadi lebih besar dan potensi terjadinya DD menjadi meningkat. Sedangkan pada metode dua tahap, proses pencampuran sudah dilakukan secara bertahap dengan diawali pelapisan agregat kasar dengan aspal, kemudian dilanjutkan dengan penambahan *filler* beserta agregat halus. Tahapan ini membuat aspal menjadi mulai tersebar merata dan meningkatkan ikatan antar material, sehingga kemampuan campuran dalam menahan aspal agar tidak mengalir keluar menjadi lebih baik, yang dapat dilihat dari nilai DD yang mulai menurun. Kondisi ini menjadi lebih optimal pada penggunaan metode pencampuran tiga tahap, di mana proses tersebut dilakukan secara lebih terkontrol dan berurutan. Aspal menjadi memiliki kesempatan lebih besar untuk melapisi agregat secara menyeluruh, sementara *filler* dan agregat halus terdistribusi dengan lebih baik dalam campuran. Selain itu, pengendalian suhu yang lebih stabil selama proses pencampuran dapat meminimalisir aspal yang ingin mengalir keluar.

Dengan demikian, meskipun secara statistik pengaruh metode pencampuran terhadap nilai DD tidak signifikan, metode pencampuran tiga tahap tetap menunjukkan nilai DD paling rendah dibandingkan metode lainnya. Hal tersebut mengindikasikan bahwa metode tiga tahap mampu menghasilkan distribusi aspal yang lebih merata dan ikatan antar material yang lebih baik

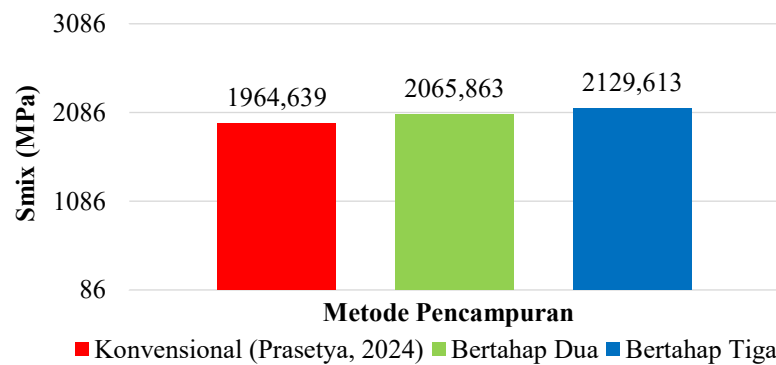
sehingga dapat mengurangi potensi pemisahan aspal. Temuan ini sejalan dengan penelitian Yaro dkk. (2021) yang menyebutkan bahwa metode pencampuran bertahap mampu menghasilkan campuran dengan nilai DD yang lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional.

5.2.4 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik *Stiffness Modulus* pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap nilai *stiffness modulus* pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% ditinjau berdasarkan parameter Sbit dan Smix. Parameter Sbit menggambarkan tingkat kekakuan bitumen yang berpengaruh terhadap kemampuan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas dan pengaruh lingkungan seperti suhu ekstrem. Menurut Widhiatmoko dan Fauziah (2024), nilai Sbit dipengaruhi oleh suhu, durasi pembebanan, *recovered softening point*, dan *recovered penetration index*. Durasi pembebanan dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan, dimana semakin rendah kecepatan kendaraan maka waktu pembebanan yang diterima perkerasan akan semakin lama. Pada penelitian ini digunakan kecepatan sebesar 15 km/jam karena dianggap sebagai kondisi paling kritis pada ruas jalan studi kasus yang tergolong sebagai jalan kolektor. Selain itu, karena seluruh campuran menggunakan jenis bahan pengikat yang sama yaitu aspal Pen 60/70, maka nilai Sbit yang dihasilkan pada setiap metode pencampuran cenderung sama yaitu sebesar 10,795 MPa.

Tahap selanjutnya adalah menghitung nilai Smix. Smix merupakan parameter yang menggambarkan tingkat kekakuan campuran perkerasan secara keseluruhan dalam menahan beban kendaraan. Nilai ini menjadi faktor penting dalam menilai kemampuan campuran untuk mendistribusikan beban lalu lintas serta menahan deformasi yang terjadi selama masa layan. Nilai Smix ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain nilai Sbit, kadar aspal, gradasi dan struktur agregat, serta karakteristik volumetrik (VITM, VFWA, VMA) yang mencerminkan kondisi rongga dalam campuran. Apabila nilai Smix yang dihasilkan semakin tinggi, artinya campuran aspal memiliki tingkat kekakuan yang baik dan kemampuan lebih dalam menahan beban tanpa harus mengalami perubahan bentuk, begitupun sebaliknya.

Adapun nilai S_{mix} untuk campuran SMA berfiller FA batu bara 50% berdasarkan berbagai metode pencampuran seperti pada Gambar 5.14 berikut ini.



Gambar 5. 14 Grafik Perbandingan Nilai S_{mix} Akibat Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.14, dapat dilihat bahwa metode konvensional menghasilkan nilai S_{mix} sebesar 1964,639 MPa, lalu meningkat menjadi 2065,863 MPa dengan penggunaan metode dua tahap, dan terakhir meningkat kembali pada metode tiga tahap hingga mencapai 2129,613 MPa. Nilai S_{mix} yang mengalami peningkatan ini dipengaruhi oleh nilai VMA, di mana semakin kecil nilai VMA, maka campuran jadi lebih padat dan kestabilan meningkat (Hadi dan Fauziah, 2022). Pada metode tiga tahap, nilai VMA yang lebih rendah menandakan rongga antar agregat semakin kecil atau terisi aspal dengan optimal, sehingga *interlocking* meningkat dan menghasilkan nilai S_{mix} yang lebih tinggi. Temuan ini sejalan dengan pendapat Hadi (2021) menyebutkan bahwa rendahnya nilai VMA berkorelasi dengan rongga udara (VITM) yang menurun dan rongga terisi aspal (VFWA) yang meningkat.

Proses pencampuran tiga tahap yang dilakukan secara terstruktur memberikan kesempatan kepada aspal untuk melapisi agregat kasar terlebih dahulu, kemudian baru disusul *filler* dan agregat halus, sehingga campuran menjadi lebih homogen. Kondisi tersebut menghasilkan ikatan yang lebih kuat antara aspal dan agregat, sehingga campuran memiliki kestabilan dan kekakuan yang lebih tinggi untuk menahan beban lalu lintas berulang, serta mencegah terjadinya deformasi. Selain

itu, pengendalian suhu yang dilakukan pada proses pencampuran bertahap juga turut menjaga aspal agar tidak rusak dan mampu melapisi agregat dengan optimal. Sebaliknya, pada metode konvensional, proses pencampuran dilakukan dalam satu tahap sekaligus, sehingga bahan penyusun tidak terdistribusi merata dan membuat campuran menjadi kurang homogen. Adapun nilai S_{mix} yang diperoleh ini akan digunakan sebagai data *input* modulus elastisitas (E) dalam analisis menggunakan *software* KENPAVE, untuk merepresentasikan kekakuan material perkerasan campuran SMA berfiller FA batu bara 50%.

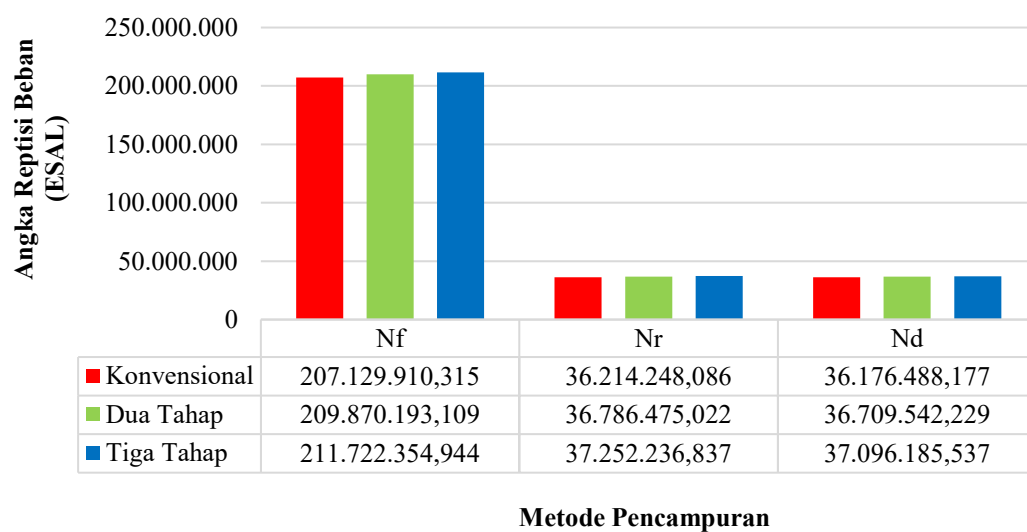
5.2.5 Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Perkiraan Umur Pelayanan pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Analisis perkiraan umur pelayanan perkerasan pada penelitian ini diawali dengan penentuan desain tebal lapis perkerasan. Berpedoman pada MDPJ 2024 serta data LHR ruas jalan Batas Kab. Batanghari/Kab.Sarolangun, Provinsi Jambi, diperoleh nilai CESA5 sebesar 13.314.126,901 ESAL sesuai dengan hasil perhitungan pada Lampiran 15. Berdasarkan nilai tersebut, diperoleh jenis struktur perkerasan dengan umur rencana 20 tahun, yaitu bagan desain 3A kategori beban lalu lintas rencana FFF (1) 4, dengan detail tebal setiap lapisannya seperti yang tercantum pada Lampiran 16. Pada penelitian ini, campuran SMA berfiller FA batu bara 50% digunakan sebagai pengganti lapis AC-BC, karena campuran SMA yang digunakan merupakan campuran SMA dengan ukuran agregat maksimum 25 mm, sehingga lebih sesuai untuk mengganti lapis AC-BC dengan ukuran agregat maksimum 25,4 mm. Dengan demikian, lapisan AB-BC ini diubah namanya menjadi lapisan SMA.

Setelah mengetahui tebal perkerasan, selanjutnya dilakukan analisis respons struktur perkerasan menggunakan *software* KENPAVE berbasis pemodelan viskoelastik. Analisis ini dilakukan dengan memasukkan beberapa parameter seperti tebal lapis perkerasan, modulus elastisitas campuran (E), *poisson ratio* dan nilai *creep* serta beberapa parameter lainnya. Berdasarkan hasil analisis tersebut, diperoleh nilai regangan tarik horizontal di bagian bawah lapisan aspal (ϵ_t) dan regangan tekan vertikal di bagian bawah lapisan aspal dan di bagian atas tanah dasar (ϵ_c), yang kemudian digunakan untuk menghitung jumlah repetisi beban hingga

terjadi kerusakan berupa *fatigue cracking* (Nf), *rutting* (Nr), dan *permanent deformation* (Nd). Analisis dengan *software* KENPAVE ini dilakukan sebanyak 3 kali sesuai dengan nilai modulus elastisitas lapis SMA dengan penerapan berbagai metode pencampuran, yang diambil dari nilai S_{mix} yang telah dijelaskan sebelumnya atau seperti yang tercantum pada Lampiran 16.

Adapun nilai repetisi beban yang diperoleh dari hasil analisis untuk masing-masing metode pencampuran dapat dilihat pada Gambar 5.15 berikut ini.

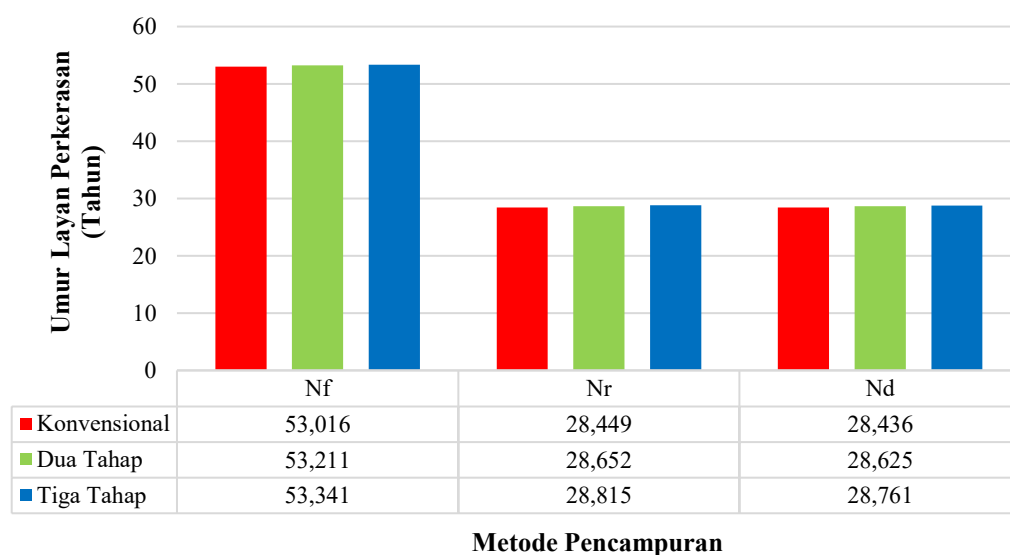


Gambar 5. 15 Perbandingan Nilai Repetisi Beban Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.15 dan Tabel 5.5, dapat dilihat bahwa pada campuran SMA Berfiller FA batu bara 50% yang dibuat dengan melalui metode pencampuran konvensional dapat mengakomodasi beban repetisi sebesar 207.129.910,315 ESAL sampai terjadinya kerusakan Nf, 36.214.248,086 ESAL sampai terjadinya Nr, dan 36.176.488,177 ESAL sampai terjadinya Nd. Selanjutnya melalui metode pencampuran dua tahap dapat mengakomodasi beban repetisi sebesar 209.870.139,109 ESAL sampai terjadinya kerusakan Nf, 36.786.475,022 ESAL sampai terjadinya Nr, dan 36.709.542,229 ESAL sampai terjadinya Nd. Terakhir pada metode pencampuran tiga tahap dapat mengakomodasi beban repetisi sebesar 211.722.354,944 ESAL sampai terjadinya kerusakan Nf, 37.252.236,837

ESAL sampai terjadinya Nr, dan 37.096.185,537 ESAL sampai terjadinya Nd. Berdasarkan nilai-nilai tersebut dapat dilihat bahwa nilai repetisi beban dari masing-masing metode pencampuran, baik metode konvensional, dua tahap, dan tiga tahap menghasilkan nilai repetisi terkecil pada kerusakan *permanent deformation* (Nd), yang artinya jenis kerusakan ini menjadi kerusakan awal pada perkerasan. Selanjutnya, nilai repetisi terbesar terjadi pada kerusakan *fatigue cracking* (Nf), yang artinya jenis kerusakan ini menjadi kerusakan terakhir pada perkerasan. Hal ini sejalan dengan beberapa penelitian dengan kondisi kerusakan awal yang sama seperti Hadi dan Fauziah (2022), Arianto dan Fauziah (2024), serta Tolab dan Fauziah (2024). Sedangkan penelitian yang berkaitan dengan kerusakan akhir berupa yang sama telah disampaikan oleh Panjago dan Hadi (2024) serta Pambudi dan Fauziah (2021) di dalam penelitiannya.

Selanjutnya, nilai repetisi beban tersebut kemudian dikonversikan menjadi perkiraan umur layan perkerasan berdasarkan berbagai metode pencampuran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.16 berikut ini.



Gambar 5. 16 Perbandingan Umur Pelayanan Perkerasan Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berdasarkan Gambar 5.16 dan Tabel 5.6, dapat dilihat bahwa umur pelayanan perkerasan yang dihasilkan menunjukkan pola kenaikan yang hampir sama dengan repetisi beban sebelumnya. Pada campuran SMA Berfiller FA batu bara 50% yang dibuat dengan melalui metode pencampuran konvensional memiliki umur layan 53 tahun 0 bulan 6 hari untuk jenis kerusakan Nf, 28 tahun 5 bulan 12 hari untuk jenis kerusakan Nr, 28 Tahun 5 bulan 7 hari untuk jenis kerusakan Nd. Selanjutnya melalui metode pencampuran dua tahap didapatkan umur layan 53 tahun 2 bulan 16 hari untuk jenis kerusakan Nf, 28 tahun 7 bulan 25 hari untuk jenis kerusakan Nr, dan 28 tahun 7 bulan 16 hari untuk jenis kerusakan Nd. Terakhir pada metode pencampuran tiga tahap didapatkan umur layan 53 tahun 4 bulan 3 hari untuk jenis kerusakan Nf, 28 tahun 9 bulan 24 hari untuk jenis kerusakan Nr, dan 28 tahun 9 bulan 4 hari untuk jenis kerusakan Nd. Hal ini menunjukkan bahwa metode pencampuran tiga tahap mampu memberikan umur pelayanan yang sedikit lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode lainnya.

Peningkatan umur pelayanan tersebut menunjukkan bahwa metode pencampuran bertahap, khususnya metode tiga tahap, mampu menghasilkan karakteristik campuran yang lebih baik sehingga perkerasan memiliki kemampuan yang lebih optimal dalam menahan beban lalu lintas. Hal ini ditunjukkan oleh nilai repetisi beban yang sedikit lebih tinggi serta umur pelayanan perkerasan yang sedikit lebih panjang dibandingkan metode lainnya. Nilai repetisi beban yang melebihi nilai rencana menunjukkan bahwa struktur perkerasan memiliki kapasitas yang lebih baik dalam menerima pembebanan berulang, sehingga umur layan yang dihasilkan pada setiap metode pencampuran mampu melampaui umur rencana 20 tahun tanpa mengalami kerusakan yang berarti (Ariesta dkk., 2023). Meskipun peningkatan umur layan yang dihasilkan relatif kecil, metode pencampuran tiga tahap tetap dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang lebih optimal karena mampu menghasilkan kinerja perkerasan yang lebih baik dan lebih stabil dalam jangka panjang.

5.2.6 Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Keseluruhan Parameter Pengujian pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Berikut ini hasil rekapitulasi pengaruh berbagai metode pencampuran terhadap pemenuhan spesifikasi parameter volumetrik, kekuatan, dan durabilitas yang dapat dilihat pada Tabel 5.10 hingga 5.12.

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Parameter Volumetrik pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Metode Pencampuran	Pemenuhan Spesifikasi Parameter Volumetrik			
	VITM	VFWA	VMA	Density
Konvensional	√	√	√	√
Dua Tahap	√	√	√	√
Tiga Tahap	√	√	√	√

Keterangan:

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Parameter Kekuatan pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Metode Pencampuran	Pemenuhan Spesifikasi Parameter Kekuatan				
	Stabilitas	Flow	MQ	ITS	CL
Konvensional	√	√	√	√	√
Dua Tahap	√	√	√	√	√
Tiga Tahap	√	√	√	√	√

Keterangan:

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Tabel 5. 12 Rekapitulasi Pengaruh Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Pemenuhan Spesifikasi Parameter Durabilitas pada Campuran SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Metode Pencampuran	Pemenuhan Spesifikasi Parameter Durabilitas		
	IRS	TSR	DD
Konvensional	√	√	√
Dua Tahap	√	√	√
Tiga Tahap	√	√	√

Keterangan:

√ = Memenuhi Spesifikasi

× = Tidak Memenuhi Spesifikasi

Berdasarkan Tabel 5.10 hingga Tabel 5.12, dapat dilihat bahwa penerapan berbagai metode pencampuran pada campuran SMA berfiller FA batu bara 50% dapat memberikan hasil yang masih memenuhi spesifikasi yang berlaku. Selanjutnya, adapun rekapitulasi perbandingan berbagai metode pencampuran terhadap karakteristik dan umur layan perkerasan SMA berfiller FA batu bara 50% dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut ini.

Tabel 5. 13 Perbandingan Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan SMA Berfiller FA Batu Bara 50%

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Konvensional (Prasetya, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
Volumetrik	VITM (%)	4,209	3,907	3,727	Metode tiga tahap memiliki nilai VITM yang lebih rendah dibandingkan konvensional dan dua tahap. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah rongga udara yang terdapat pada metode tiga tahap lebih sedikit dibandingkan dengan metode lainnya, walaupun selisih perbedaannya tidak signifikan.
	VFWA (%)	76,604	77,939	78,781	Metode tiga tahap memiliki nilai VFWA yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap mampu melakukan pengisian rongga dengan aspal secara lebih optimal, walaupun selisih nilai VFWA dengan metode lainnya tidak signifikan.
	VMA (%)	17,969	17,711	17,557	Metode tiga tahap memiliki nilai VMA yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap mampu menciptakan rongga udara antar butiran agregat menjadi lebih kecil/padat dibandingkan metode lainnya, walaupun selisih perbedaannya tidak signifikan.
	<i>Density</i>	2,236	2,243	2,247	Metode tiga tahap memiliki nilai <i>density</i> yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap memiliki tingkat kepadatan yang baik, walaupun perbedaan nilai dengan metode lainnya tidak signifikan.

**Lanjutan Tabel 5. 13 Perbandingan Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan SMA
Berfiller FA Batu Bara 50%**

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Konvensional (Prasetya, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
Kekuatan	Stabilitas (kg)	965,519	989,161	1041,557	Metode tiga tahap memiliki nilai stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap mampu menghasilkan campuran dengan stabilitas tinggi dalam menahan beban lalu lintas secara signifikan.
	Flow (mm)	3,200	2,933	2,717	Metode tiga tahap memiliki nilai <i>flow</i> yang lebih rendah jika dibandingkan dengan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini mengindikasikan bahwa metode tiga tahap mampu menghasilkan nilai <i>flow</i> yang lebih terkontrol dengan kualitas campuran yang lebih kaku untuk menahan beban lalu lintas secara signifikan.
	MQ (kg/mm)	301,887	337,474	383,564	Nilai MQ merupakan perbandingan antara nilai stabilitas dan <i>flow</i> . Pada metode tiga tahap menunjukkan nilai MQ tertinggi, yang artinya campuran yang dihasilkan akan lebih kaku dan tahan terhadap deformasi secara signifikan.
	ITS (kPa)	754,051	810,191	849,175	Metode tiga tahap memiliki nilai ITS yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode lainnya, artinya metode tersebut mampu meningkatkan ketahanan campuran terhadap gaya tarik tidak langsung yang berpotensi menyebabkan keretakan. Perbedaan antar metode tergolong signifikan.
	CL (%)	9,342	8,733	8,016	Nilai CL pada metode tiga tahap memiliki nilai CL yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap lebih sedikit kehilangan butiran karena memiliki daya tahan yang sedikit lebih kuat terhadap keausan, meskipun pengaruhnya tidak signifikan.

**Lanjutan Tabel 5. 13 Perbandingan Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan SMA
Berfiller FA Batu Bara 50%**

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Konvensional (Prasetya, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
Durabilitas	IRS (%)	96,291	96,848	97,402	Metode tiga tahap memiliki peresentase nilai IRS yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap mampu menghasilkan campuran dengan penurunan stabilitas yang lebih rendah setelah direndam dibandingkan dengan metode lainnya.
	TSR (%)	88,595	89,067	89,621	Metode tiga tahap memiliki persentase nilai TSR yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap mampu menghasilkan campuran dengan penurunan daya tahan tarik setelah mengalami perendaman lebih rendah dibandingkan metode lainnya.
	DD (%)	0,131	0,126	0,119	Metode tiga tahap memiliki nilai DD yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini menunjukkan bahwa metode tiga tahap lebih sedikit mengalami pemisahan aspal dari campuran dibandingkan metode lainnya, meskipun pengaruhnya tidak signifikan.
Stiffness Modulus	Sbit (MPa)	10,795			Nilai Sbit pada ketiga metode pencampuran sama, karena jenis aspal yang digunakan sama yaitu aspal pen 60/70.
	Smix (MPa)	1964,639	2065,863	2129,613	Metode tiga tahap memiliki nilai Smix yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional dan dua tahap. Hal ini mengindikasikan bahwa metode tiga tahap mampu meningkatkan kekakuan campuran yang didukung oleh karakteristik volumetrik yang optimal.

**Lanjutan Tabel 5. 13 Perbandingan Berbagai Metode Pencampuran Terhadap Karakteristik dan Umur Layan Perkerasan SMA
Berfiller FA Batu Bara 50%**

Tinjauan	Parameter	Metode Pencampuran			Keterangan
		Konvensional (Prasetya, 2024)	Dua Tahap	Tiga Tahap	
Perkiraan Umur Pelayanan Perkerasan	Nf	53 Tahun 0 Bulan 6 Hari	53 Tahun 2 Bulan 16 Hari	53 Tahun 4 Bulan 3 Hari	Berdasarkan kerusakan Nf, metode tiga tahap memberikan umur pelayanan yang sedikit lebih panjang jika dibandingkan dengan metode lainnya. Kerusakan Nf merupakan kerusakan terakhir yang terjadi.
	Nr	28 Tahun 5 Bulan 12 Hari	28 Tahun 7 Bulan 25 Hari	28 Tahun 9 Bulan 24 Hari	Berdasarkan kerusakan Nr, metode tiga tahap memberikan umur pelayanan yang juga sedikit lebih panjang dibandingkan metode lainnya. Kerusakan ini merupakan kerusakan kedua yang terjadi pada perkerasan.
	Nd	28 Tahun 5 Bulan 7 Hari	28 Tahun 7 Bulan 16 Hari	28 Tahun 9 Bulan 4 Hari	Berdasarkan kerusakan Nd, metode tiga tahap memberikan umur pelayanan yang sedikit lebih panjang juga dibandingkan metode lainnya. Kerusakan Nd merupakan kerusakan awal yang terjadi pada perkerasan ini.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan permasalahan, tujuan penelitian, hasil pengujian dan analisis data, serta pembahasan penelitian yang telah diuraikan sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan seperti sebagai berikut.

1. Penggunaan metode pencampuran tiga tahap pada campuran SMA ber*filler* FA batu bara 50% menghasilkan karakteristik volumetrik yang lebih baik dibandingkan metode dua tahap dan konvensional. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan nilai VITM dan VMA, serta peningkatan nilai VFWA pada metode tiga tahap, yang mengindikasikan distribusi aspal lebih merata dan struktur campuran yang lebih padat. Meskipun demikian, analisis statistik menunjukkan metode pencampuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai VITM, VFWA, VMA, dan *density*.
2. Metode pencampuran tiga tahap menghasilkan karakteristik kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan metode dua tahap dan konvensional. Hal ini ditunjukkan oleh metode tiga tahap yang mampu menciptakan campuran dengan stabilitas dan kekakuan yang lebih optimal untuk menahan beban lalu lintas. Berdasarkan hasil analisis statistik, metode pencampuran memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai stabilitas, *flow*, MQ, dan ITS secara signifikan. Namun, metode pencampuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai CL.
3. Metode pencampuran tiga tahap menghasilkan karakteristik durabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan metode dua tahap dan konvensional, ditunjukkan oleh ketahanan yang lebih unggul terhadap air, suhu, dan gaya tarik tidak langsung. Berdasarkan hasil analisis statistik, metode pencampuran memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai IRS dan TSR

secara signifikan. Namun, metode pencampuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai DD.

4. Penerapan berbagai metode pencampuran tidak mempengaruhi nilai Sbit karena jenis aspal yang digunakan sama yaitu aspal pen 60/70. Akan tetapi, perbedaan terlihat pada nilai Smix, di mana metode tiga tahap memberikan nilai Smix yang sedikit lebih tinggi, yang disebabkan oleh nilai VMA yang lebih kecil, sehingga membuat kekakuan campuran menjadi lebih optimal.
5. Metode pencampuran tiga tahap menghasilkan perkiraan umur layan perkerasan yang sedikit lebih panjang dibandingkan dengan metode lainnya, sejalan dengan nilai Smix yang lebih tinggi. Kerusakan awal yang terjadi pada masing-masing metode yaitu *permanent deformation* (Nd) dan kerusakan terakhir berupa *fatigue cracking* (Nf).

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah disampaikan sebelumnya, penulis memberikan beberapa saran seperti sebagai berikut.

1. Perkerasan jalan yang menggunakan campuran SMA berfiller FA batu bara 50% direkomendasikan menggunakan metode pencampuran tiga tahap dalam proses produksi campurannya, karena mampu menciptakan karakteristik campuran dan umur layan yang lebih baik.
2. Perlunya penelitian lebih lanjut tentang penggunaan bahan ikat lainnya pada campuran SMA dengan penerapan berbagai metode pencampuran.
3. Perlunya penelitian lebih lanjut tentang penggunaan limbah FA batu bara pada jenis campuran lainnya, untuk meningkatkan nilai pemanfaatan limbah sebagai inovasi material perkerasan jalan.
4. Perlu dilakukan analisis ekonomi terhadap penggunaan berbagai metode pencampuran untuk mengetahui efisiensi biaya dan potensi penerapannya pada pekerjaan konstruksi jalan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, A. A. dan Ismael, M. Q. 2025. Effect of Waste Jute Fibers on the Mechanical Properties of Stone Matrix Asphalt Mixtures. *Journal of The Faculty of Civil Engineering, University of Zilina*, 22 (1), 40-59. <https://doi.org/10.2478/cee-2026-0004>.
- Alirusi, R., Maryam, S. dan Massara, A. 2023. Studi Experimental Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) Dengan Penambahan Zat Aditif Polyurethane Terhadap Ketahanan Deformasi Dan Modulus Elastis. *Journal Of Social Science Research*, 3(3), 5001-5015.
- Anggara, F., Petrus, H. T., Besari, D. A. A., Manurung, H. dan Saputra, F. Y. A. 2021. Tinjauan Pustaka Karakterisasi dan Potensi Pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA). *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(1), 53-70.
- Aprianto, R., Rosyad, F. dan Mulyati, E. 2025. Perencanaan Campuran Aspal Beton Menggunakan Gradasi Agregat No. 4 SNI NO 1737-1989F. *Jurnal Teknik SILITEK*, 5(03), 1413-1422. <https://doi.org/10.51135/9ny4jj31>.
- Archenita, D., Alkhairi, W., Rizki, A., Apwiddhal dan Satwarnirat. 2023. Durability Performance Analysis of Mixture Asphalt Concrete - Base Course (AC-Base) Using Coal Fly Ash as A Filler Substitute. *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, 5(1), 31-43. <https://doi.org/10.62527/ijasce.5.1.120>.
- Arianto, R. dan Fauziah, M. 2024. Kajian Kinerja Struktur Perkerasan Lentur dengan Pendekatan Elastik dan Viskoelastik Pada Jalan Cipatujah-Kalapagenep-Pangandaran. *Proceeding Civil Engineering Research Forum*, 3(2), 58-68. <http://hdl.handle.net/123456789/56193>.
- Ariesta, P. G. W., Purwayudhaningsari, R. dan Hartono, H. 2023. Analisis Tebal Perkerasan Lentur Metode Analisa Komponen Area South Check Road dengan Menerapkan Program KENPAVE di Bandar Udara Syamsudin Noor Banjarmasin. *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan (SNITP)*, 9(1), 1-15.
- Arrang, A.T., Irmawaty, R., Djamaluddin, R. dan Parung, H. 2025. Efektifitas Sabut Kelapa Sebagai Stabilizing Agent Dalam Campuran Stone Matrix Asphalt

- Agregat Slag Nikel. *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS)*, 2(1).
<https://doi.org/10.62603/konteks.v2i1.242>.
- Badan Standardisasi Nasional. 2015. SNI 8129:2015 Spesifikasi Stone Matrix Asphalt (SMA). Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. 2014. SNI 2460:2014: Spesifikasi Abu Terbang Batu Bara dan Pozolan Alam untuk Campuran Beton. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bahar, F. F. dan Wiranto, D. 2024. Inovasi Material dalam Beton Berkelanjutan: Studi Literatur Tentang Pemanfaatan Fly Ash dengan Peningkatan Kekuatan Beton. *Jurnal Engineering*, 6(1), 47-52.
- Basri, D. R., Ningrum, P., dan Poerta, A. A. 2024. Analisis Pengaruh Penggunaan Fly Ash Batu Bara dan Abu Batu Sebagai Filler pada Campuran Laston Lapis Aus (AC-WC). *Sainstek Stt Pekanbaru*, 12(1), 141-147.
<https://doi.org/10.35583/js.v12i1.248>.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2024. Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 (MDPJ 2024). Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2025. Spesifikasi Umum 2025 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Fatardhoo, A. K., Cahyono, A. D., Hidiyati E. F., Zakaria, A. L., Pratama, A. F., Nugraha, N. W. D., Febriansyah, Y. dan Pratama, D. I. 2024. Hubungan Antara Rasio Agregat dan Volumetrik dalam Menentukan Kualitas Perkerasan Jalan. *Jurnal Manajemen Teknologi dan Teknik Sipil*, 7(1), 69-81.
<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i1.5721>.
- Fatmawati, L. 2013. Karakteristik Marshall Dalam Aspal Campuran Panas AC-WC Terhadap Variasi Temperatur Perendaman. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 18(2), 88-94.
<https://doi.org/10.32497/wahanats.v18i2.981>.
- Febrianto, I., Adiman, E.Y., dan Putra, B. H. R. 2024. Potensi Penggunaan Serat Tebu Sebagai Substitusi Serat Selulosa Pada Campuran Stone Matrix Asphalt. *Journal of Infrastructure and Construction Technology*, 2(1), 20-30.
<https://doi.org/10.56208/jictech.2.1.20-30>.

- Gultom, Z.A., Tanjung, M.A.P. dan Hamidy, A. 2026. Adaptasi Perilaku Berkendara Motor yang Agresif Menggunakan PCA dan Manova. *Blend Sains Jurnal Teknik*, 4(3), 515-528. <https://doi.org/10.56211/blendsains.v4i3.1332>.
- 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. <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 Permodelan Viskoelastik dan Elastik. *Jurnal Teknisia*, 27(02), 71–82. <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. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/933/1/012003>.
- Hasanuddin, Setiawati, D.A., dan Anggoro, A.T. 2023. Pengaruh Beban Berlebih terhadap Umur Rencana Perkerasan Jalan (Studi Kasus: Ruas Jalan Yos Sudarso). *Jurnal Kolaboratif Sains*, 6(11), 1487-1493. <https://doi.org/10.56338/jks.v6i11.4312>.
- Hermadi, M. dan Nono. 2004. Pengaruh Tingkat Kepadatan Terhadap Volumetrik Campuran Beton Aspal dengan Analisis Jalur. *Jurnal Jalan Jembatan*, 21(4), 60-66.
- Hesami, E., Birgisson, B. dan Kringos, N. 2015. Effect of Mixing Sequence on The Workability and Performance of Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 16(S2), 197-213. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1077008>.
- Huang, Y.H. 2004. Pavement Analysis and Design Second Edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.
- Intari, D. E., Bethary, R. T., Yohana, E., dan Budiman, A. 2024. Kinerja Campuran Stone Matrix Asphalt Menggunakan Serat Selulosa Eceng Gondok. *Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia*, 10(2), 119–130. <https://doi.org/10.26593/jhpji.v10i2.8380.119-130>.

- Iqbal, I. 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. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/teknik>.
- Jainuri, M. 2023. Pengantar Aplikasi Komputer SPSS (Edisi Revisi). Jambi: Hira Institute.
- Jaya, Z., Majuar, E., Gani, F. A., dan Yuanda, G. P. 2021. Pemanfaatan Fly Ash Batubara Kelas C Sebagai Filler Untuk Meningkatkan Kekuatan Aspal Beton Porus. *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 5(1), 137-142.
- Kurniawan, A. T., Mulyono, A. T. dan Suparma, L. B. 2022. Pengaruh Kepadatan Campuran Beraspal Terhadap Kerusakan Perkerasan Lentur Selama Masa Pelayanan. *Jurnal HPJI (Himpunan Pengembangan Jalan Indonesia)*, 8(1), 81-90. <https://doi.org/10.26593/jhpji.v8i1.6071.8-90>.
- Lopes, A. M. da S., Neto, O. de M. M, Lucena, L. C. de F. L., Nascimento, M. das V. do, Siqueira, M. V. de, Sousa, T. M. de dan Monteiro, A. F. de F. 2023. Impact of aging protocols on asphalt binder behavior: A laboratory and field study. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02629. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02629>.
- Marlina, E., Frans, J. H., dan Nasjono, J. K. 2023. Analisis Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Bina Marga 2017 Dan Program KENPAVE. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 173-184.
- Maqbool, S., Khan, A. H., Rizvi, M. A., Inam, A. dan Kashmiri, F. A. 2022. Modelling and Evaluating Moisture Susceptibility of Laboratory Prepared Asphalt Concrete Mixtures. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1), 101512. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.05.026>.
- Novriani, S., Setiawan, A., dan Pratama, N. 2024. Perkerasan Lentur Menggunakan MDPJ 2017 Berdasarkan Umur Rencana di Jawa Barat. *Jurnal Konstruksia*, 15(2), 111–119. <http://dx.doi.org/10.24853/jk.15.2.111-119>.
- Pagau, J., Alpius dan Pagoray, G. L. 2024. Pemanfaatan Agregat Sungai (Salu Bangkokte) Kabupaten Tana Toraja Pada Campuran Stone Matrix Asphalt Kasar. *Paulus Civil Engineering Journal*, 6(2), 276-282. <https://doi.org/10.52722/zrxcvf38>.

- Pahlevi, R., Thamrin, S., Ahmad, I. dan Nugroho, F. B. 2024. Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 5(2), 50–60. <https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22973>.
- Pambudi, R. A. dan Fauziah, M. 2021. Evaluasi Perancangan Struktur Perkerasan dengan Metode Bina Marga 2017 dan Program KENPAVE menggunakan pendekatan elastik dan viskoelastik (Studi Kasus: Jalan Simpang Pundu – Tumbang Samba). *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian dan Pengabdian Masyarakat*, 303-314.
- Panjago, F. dan Hadi, M. A. 2024. Evaluasi Kerusakan Jalan dan Kinerja Menggunakan Program KENPAVE dengan Permodelan Elastik dan Viskoelastik pada Ruas Jalan Klangon Tempel Yogyakarta. *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 29(2), 297-308.
- Prakayuda, W. A., Halim, A., dan Aditya, C. 2021. Pengaruh Penambahan Damdex pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 1(2), 40-47. <https://doi.org/10.31328/bouwplank.v1i2.222>.
- Prasetya, D. 2024. Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Filler Pengganti Terhadap Karakteristik Stone Matrix Asphalt. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Prasojo, G. dan Narendra, A. 2023. Analisis Perbandingan Tebal Perkerasan Kaku dan Perkerasan Lentur Metode MDPJ 2017 (Studi Kasus Paket I. 4 Jalan KIT Batang Sta 8+ 100–10+ 500). *Jurnal Teknik Sipil UBL*, 14(1), 1-13.
- Pratama, N. G. dan Haratama, K. R. 2024. Studi Komparasi Karakteristik dan Nilai Daktilitas Aspal Modifikasi Pg 70 dengan Aspal Pertamina Penetrasi 60/70. *Jurnal Media Publikasi Terapan Transportasi*, 2(2), 183–189. <https://doi.org/10.26740/mitrans.v2n2.p183-189>.
- Priambodo, W. dan Fauziah, M. 2026. Pemanfaatan Fly Ash Batu Bara Sebagai Filler Pengganti Terhadap Karakteristik Campuran AC-BC dengan Metode Pencampuran Konvensional dan Metode Pencampuran Bertahap. *Prosiding The 10TH CEREFORM*, 5(2), 356-365.
- Putri, Y., Santosa, L., dan Adiman, E. Y. 2023. Kajian Penggunaan Serat Selulosa Alami Dari Daun Nanas (Serat Nanas) Sebagai Bahan Stabilizer Campuran

- Beraspal SMA. *Journal of Infrastructure and Construction Technology*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.56208/jictech.1.1.1-9>.
- Qubro, K. A., Fauzi, M., Nisumanti S., Febriyandi, H. S. dan Hendarto, S. 2025. Kinerja Campuran Stone Matrix Asphalt (SMA) Menggunakan Aspal Modifikasi Asbuton Murni Lawele. *Jurnal Talenta Sipil*, 8(1), 885-891. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v8i2.1014>.
- Rahmawati, A., dan Adiyasa, M. 2021. Analysis of Remaining Service Life for Flexible Pavement Using Mechanistic-Empirical Methods. *International Journal of Geomate*, 21(85), 145–153. <https://doi.org/10.21660/2021.85.j2203>.
- Reny. (2026). Pengujian Marshall dan Draindown Campuran SMA Kasar Menggunakan Agregat Gunung Bittuang. *Paulus Civil Engineering Journal*, 8(1), 94-101.
- Roni, R. P. dan Hadi, M. A. 2025. Transformasi Limbah Abu Arang Kayu Jati Menjadi Material Fungsional pada Aspal Stone Matrix Asphalt (SMA). *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 30(2), 264-277. <https://doi.org/10.32497/wahanats.v30i2.6848>.
- Sukirman, S. 2010. Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur. Bandung: Nova.
- Sriharyani, L. dan Septiadi, D. 2024. Penambahan Zat Additive Anti Stripping Agent Dan Filler Serbuk PVC Pada Campuran Aspal AC-WC. *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 14(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.24127/tp.v14i1.3830>.
- Syafiqah, S.N., Masri, K. A., Jasni, N. E., dan Hasan, M. 2021. Performance of Stone Mastic Asphalt incorporating Kenaf fiber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 641(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/641/1/012001>.
- Tajudin, A. N. dan Suparma, L. B. 2017. Analisis Indeks Stabilitas Sisa pada Campuran Asphalt Concrete dengan Penggunaan Limbah Plastik Sebagai Agregat Pengganti. *Jurnal Muara Sains*, 1(1), 272-280. <https://doi.org/10.24912/jmstkik.v1i1.439>.
- Tolab, L. Z. dan Fauziah, M. 2024. Prediction of Damage and Remaining Life of Yogyakarta-Bawen Toll Road Pavement with Elastic and Viscoelastic

Approaches. *Rekayasa Sipil*, 18(2), 150–158.
<https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2024.018.02.12>.

Waluyo, D. dan Nofiq, M. I. 2023. Analisis Kinerja Aspal Stone Matrix Asphalt (SMA) pada Fly Over Kretek - Bumiayu. *TEKSLING: Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2(1), 24-40. <https://doi.org/10.53863/teksling.v2i01.936>.

Wenur, K. R., Palenewen, S. C. N., dan Waani, J. E. 2023. Pengaruh Variasi Kandungan Bahan Pengisi Filler Fly Ash Batu Bara Pada Campuran Beraspal Panas Jenis Lataston Hot Rolled Sheet Wearing Course (HRS-WC). *Tekno*, 21(85), 805–814. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v3/index.php/tekno>.

Widhiatmoko, G. dan Fauziah, M. 2024. Analisis Perbandingan Tebal Perkerasan Lentur dengan Metode Viskoelastik pada MDPJ 2017 dan MDP 2024 Menggunakan Kenpave (Studi kasus: Ruas Jalan Tol Solo–Yogyakarta–NYIA Kulon Progo pada STA 02+ 00–STA 07+ 500). *Prosiding Konferensi Nasional Inovasi Lingkungan Terbangun (KN-ILT 2024)*, 7, 209-217.

Yaro, N. S. A., Napih, M. B., Sutanto, M. H., Usman, A., dan Saeed, S. M. 2021. Performance Evaluation of Waste Palm Oil Fiber Reinforced Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Traditional and Sequential Mixing Processes. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00783. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00783>.

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. ftsp.uii.ac.id

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

HASIL PENGUJIAN MARSHALL STANDARD BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

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

Dikerjakan Oleh : Saphira Ashya Aulia
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	No. Sampel	Tinggi	Persentase Aspal		Berat			Volume	Density	VMA	VFWA	VITM	Meus	Meus x Kalibrasi	Angka Koreksi Tebal	Stabilitas	Flow	MQ
		t (cm)	A (%)	B (%)	Udara (gram)	Air (gram)	SSD (gram)											
Konvensional	A	73,15	6,84	6,40	1177,35	1181,96	658,14	523,82	2,248	17,544	78,839	3,712	62	1190,660	0,808	962,054	3,200	300,642
	B	73,28	6,84	6,40	1173,02	1184,68	658,07	526,61	2,227	18,282	74,977	4,575	61	1171,456	0,796	932,382	3,250	286,887
	C	71,83	6,84	6,40	1162,19	1173,38	652,91	520,47	2,233	18,082	75,995	4,340	63	1209,865	0,828	1002,121	3,150	318,134
									2,236	17,969	76,604	4,209				965,519	3,200	301,887
Dua Tahap	A	70,76	6,84	6,40	1172,52	1178,70	656,12	522,58	2,244	17,687	78,064	3,880	81	1160,764	0,836	970,586	3,000	323,529
	B	70,70	6,84	6,40	1174,01	1181,24	657,53	523,71	2,242	17,761	77,673	3,965	84	1203,755	0,837	1007,271	2,850	353,429
	C	70,43	6,84	6,40	1165,92	1172,89	653,27	519,62	2,244	17,684	78,080	3,876	82	1175,094	0,842	989,625	2,950	335,466
									2,243	17,711	77,939	3,907				989,161	2,933	337,474
Tiga Tahap	A	70,09	6,84	6,40	1170,99	1176,80	654,51	522,29	2,242	17,749	77,734	3,952	87	1246,746	0,843	1050,605	2,800	375,216
	B	69,96	6,84	6,40	1167,33	1173,62	653,87	519,75	2,246	17,606	78,505	3,784	88	1261,077	0,829	1045,196	2,650	394,414
	C	70,90	6,84	6,40	1172,21	1176,18	656,09	520,09	2,254	17,315	80,103	3,445	86	1232,416	0,835	1028,869	2,700	381,062
									2,247	17,557	78,781	3,727				1041,557	2,717	383,564

Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya
Signed by:

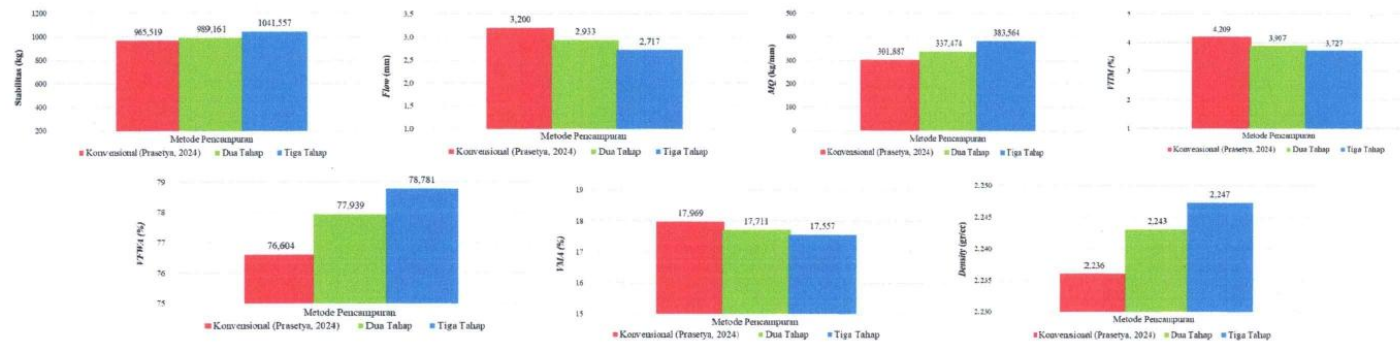
25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 223

Lampiran 2 Grafik Hasil Pengujian *Marshall Standard* Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL PENGUJIAN *MARSHALL STANDARD* BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN



Dibuatkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
BERLIAN KUSHARI
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM, ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya
MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5E0A-4680-AF4...
Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPT.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti
Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 253

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

HASIL PENGUJIAN INDEX OF RETAINED STRENGTH (IRS) BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

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

Dikerjakan Oleh : Saphira Ashya
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	No. Sampel	Tebal Sampel				Angka Koreksi Tebal				Koreksi	Arloji/Stability			Stability		
		(mm)				Tebal (mm)		Koreksi			Meas	Kalibrasi	Meas x Kalibrasi	Awal	(kg)	
		1	2	3	Rata-Rata	MIN	MAX	MIN	MAX						Rata-Rata	MIN
Konvensional	A	72,57	72,55	72,08	72,40	71,40	73,00	0,83	0,81	0,818	60	19,204	1152,252	941,966	929,707	600
	B	71,24	71,81	72,76	71,94	71,40	73,00	0,83	0,81	0,823	59	19,204	1133,048	932,829		
	C	72,46	71,62	72,31	72,13	71,40	73,00	0,83	0,81	0,821	58	19,204	1113,844	914,326		
Dua Tahap	A	69,37	69,46	69,53	69,45	68,30	71,40	0,86	0,83	0,849	78	14,330	1117,773	948,809	957,979	600
	B	70,97	70,90	70,85	70,91	68,30	71,40	0,86	0,83	0,835	81	14,330	1160,764	968,976		
	C	69,82	69,94	69,92	69,89	68,30	71,40	0,86	0,83	0,845	79	14,330	1132,103	956,152		
Tiga Tahap	A	69,75	69,89	69,74	69,79	68,30	71,40	0,86	0,83	0,846	84	14,330	1203,755	1017,833	1014,493	600
	B	70,88	70,89	70,56	70,78	68,30	71,40	0,86	0,83	0,836	86	14,330	1232,416	1030,340		
	C	69,42	69,66	69,85	69,64	68,30	71,40	0,86	0,83	0,837	82	14,330	1175,094	995,305		

Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Signed by:

BERLIAN KUSHARI
ES0CA8B7-4B85-48B7-48C4-E32B73E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng. IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya
Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5E0A-46B0-AF4...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

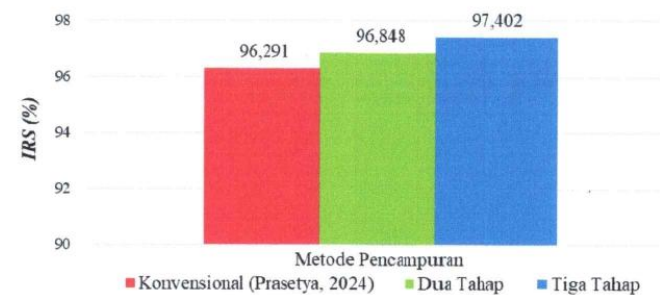
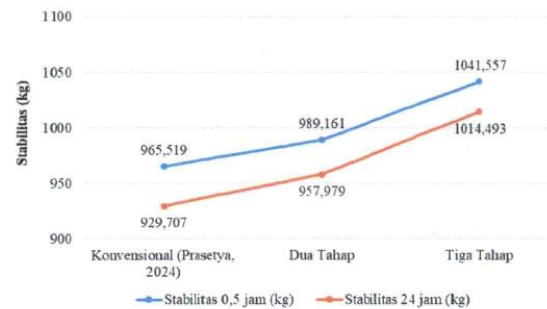
Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Saphira Ashya, Aulia
NIM : 22 511 223

Lampiran 4 Grafik Hasil Pengujian *Index of Retained Strength (IRS)* Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL PENGUJIAN INDEX OF RETAINED STRENGTH (IRS) BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

Metode Pencampuran	Stabilitas 0,5 Jam	Stabilitas 24 Jam	IRS
	(kg)	(kg)	(%)
Konvensional	965,519	929,707	96,291
Dua Tahap	989,161	957,979	96,848
Tiga Tahap	1041,557	1014,493	97,402



Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Signed by:

BERLIAN KUSHARI
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, I.P.M, I.P.A.S.E.A.N, Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya
Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694P-5EDA-4680-AE4
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 223



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.uui.ac.id

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

HASIL PENGUJIAN INDIRECT TENSILE STRENGTH (ITS) 0,5 JAM BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

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

Dikerjakan Oleh : Saphira
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	No. Sampel	Tebal Sampel (mm)				Angka Koreksi Tebal				Koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				Angka Koreksi Diameter				Koreksi (A0)	Arloji Stability			Stability (kg)		ITS 0,5 Jam (kPa)	
		1	2	3	Rata-Rata	MIN	MAX	MIN	MAX		1	2	3	Rata-Rata	MIN	MAX	MIN	MAX		Mean	Kalibrasi	Mean x Kalibrasi	Awal	Rata-Rata	Awal	Rata-Rata
Konvensional	A	70,32	70,81	70,15	70,43	68,36	71,40	0,86	0,83	0,839	3,98	3,99	3,99	3,99	3,90	4,00	0,16	0,16	0,156	29	14,330	415,582	348,848		760,049	
	B	71,05	70,84	70,62	70,84	68,36	71,40	0,86	0,83	0,835	4,01	4,01	4,02	4,01	4,00	4,10	0,16	0,15	0,155	30	14,330	429,913	359,171	348,037	773,127	754,05
	C	70,22	70,58	71,04	70,61	68,36	71,40	0,86	0,83	0,838	4,00	3,99	4,00	4,00	3,90	4,00	0,16	0,16	0,156	28	14,330	401,252	336,094		728,977	
Dua Tahap	A	71,51	71,35	70,84	71,23	71,46	73,00	0,83	0,81	0,832	4,02	4,03	4,03	4,03	4,00	4,10	0,16	0,15	0,155	31	14,330	444,243	369,647		788,199	
	B	71,46	71,21	71,59	71,42	71,46	73,00	0,83	0,81	0,830	4,04	4,03	4,04	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,155	32	14,330	458,573	380,501	381,064	807,630	810,191
	C	71,33	71,47	71,05	71,28	68,36	71,40	0,86	0,83	0,831	4,05	4,04	4,04	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,154	33	14,330	472,904	393,044		834,745	
Tiga Tahap	A	72,54	72,42	72,47	72,48	71,46	73,00	0,83	0,81	0,817	4,07	4,03	4,03	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,154	34	14,330	487,234	397,847		830,750	
	B	71,35	71,65	71,52	71,51	71,46	73,00	0,83	0,81	0,829	4,05	4,03	4,05	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,154	35	14,330	501,565	415,630	404,282	879,446	849,175
	C	72,46	71,92	72,30	72,23	71,46	73,00	0,83	0,81	0,820	4,04	4,04	4,04	4,04	4,00	4,10	0,16	0,15	0,154	34	14,330	487,234	399,370		837,329	

Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

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

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya

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

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Saphira Ashra Aulia
NIM : 22 511 223



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 6 Hasil Pengujian *Indirect Tensile Strength (ITS)* 24 Jam Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

HASIL PENGUJIAN INDIRECT TENSILE STRENGTH (ITS) 24 JAM BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

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

Diterjakan Oleh : Saphira Ashya Aulia
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	No. Sampel	Tebal Sampel (mm)				Angka Koreksi Tebal				Koreksi	Diameter Sampel (Inchi)				Angka Koreksi Diameter				Koreksi (AD)	Artloji Stability			Stability (kg)		ITS 24 Jam (kPa)	
		1	2	3	Rata-Rata	MIN	MAX	MIN	MAX		1	2	3	Rata-Rata	MIN	MAX	MIN	MAX		Mean	Kalibrasi	Mean x Kalibrasi	Awal	Rata-Rata	Awal	Rata-Rata
Konvensional	A	70.92	70.55	70.24	70.57	68.30	71.40	0.86	0.83	0.838	4.00	4.01	3.99	4.00	3.90	4.00	0.16	0.16	0.156	26	14.330	372.591	312.243		677.251	
	B	70.85	70.44	70.67	70.65	68.30	71.40	0.86	0.83	0.837	3.98	3.99	4.00	3.99	3.90	4.00	0.16	0.16	0.156	25	14.330	358.260	299.945	308.228	650.619	668.05
	C	70.48	70.52	70.50	70.50	68.30	71.40	0.86	0.83	0.839	3.99	4.02	4.03	4.01	4.00	4.10	0.16	0.15	0.156	26	14.330	372.591	312.496		676.280	
Dua Tahap	A	70.62	71.08	70.82	70.84	68.30	71.40	0.86	0.83	0.835	3.98	3.99	3.99	3.99	3.90	4.00	0.16	0.16	0.156	28	14.330	401.252	335.213		725.936	
	B	71.13	71.53	71.46	71.37	68.30	71.40	0.86	0.83	0.830	4.00	3.99	3.99	3.99	3.90	4.00	0.16	0.16	0.156	29	14.330	415.582	345.040	334.332	741.061	721.615
	C	70.30	71.22	71.40	70.97	68.30	71.40	0.86	0.83	0.834	3.97	4.00	3.99	3.99	3.90	4.00	0.16	0.16	0.156	27	14.330	386.921	322.742		697.850	
Tiga Tahap	A	71.23	71.84	71.36	71.48	71.40	73.00	0.83	0.81	0.829	4.03	4.04	4.02	4.03	4.00	4.10	0.16	0.15	0.155	31	14.330	444.243	368.296		782.697	
	B	72.12	72.03	71.95	72.03	71.40	73.00	0.83	0.81	0.822	4.03	4.04	4.04	4.03	4.00	4.10	0.16	0.16	0.155	30	14.330	429.913	353.424	359.419	744.099	761.036
	C	71.73	71.13	71.55	71.47	68.30	71.40	0.86	0.83	0.829	4.04	4.03	4.04	4.04	4.00	4.10	0.16	0.15	0.155	30	14.330	429.913	356.536		756.311	

Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

BERLIAN KUSHARI
NIM : 25020007-0005-4487-ABCA-63267026543
Ir. Berlian Kushari, N.Eng. IPM, ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya

MUHAMAD ABDUL HADI
NIM : 250200040-5E0A-4680-AFA-...
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

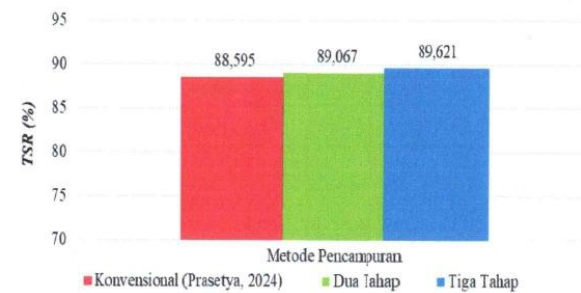
Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 223

Lampiran 7 Grafik Hasil Pengujian *Tensile Strength Ratio* (TSR) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL TENSILE STRENGTH RATIO (TSR) BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

Metode Pencampuran	ITS 0,5 Jam	ITS 24 Jam	TSR
	(kPa)	(kPa)	(%)
Konvensional	754,051	668,050	88,595
Dua Tahap	810,191	721,615	89,067
Tiga Tahap	849,175	761,036	89,621



Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil
Signed by:

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

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya
Signed by:

MUHAMAD ABDUL HADI
25C7694B-5EDA-4680-AE4
Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.
NIK : 21 511 1307

Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 223



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

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

Lampiran 8 Hasil Pengujian *Cantabro Loss* (CL) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

HASIL PENGUJIAN CANTABRO LOSS (CL) BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

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

Dikerjakan Oleh : Saphira Ashya Aulia
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	No	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
Konvensional	1	Berat Sebelum Abrasi (gr)	1116,750	1114,110	1161,870
	2	Berat Sesudah Abrasi (gr)	1068,580	960,940	1046,110
	3	Persentase Kehilangan Berat (%)	4,313	13,748	9,963
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat (%)	9,342		
Dua Tahap	1	Berat Sebelum Abrasi (gr)	1149,380	1144,320	1152,400
	2	Berat Sesudah Abrasi (gr)	1048,650	1044,450	1052,050
	3	Persentase Kehilangan Berat (%)	8,764	8,727	8,708
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat (%)	8,733		
Tiga Tahap	1	Berat Sebelum Abrasi (gr)	1154,600	1158,300	1152,810
	2	Berat Sesudah Abrasi (gr)	1061,860	1065,110	1060,940
	3	Persentase Kehilangan Berat (%)	8,032	8,045	7,969
	4	Rata-Rata Kehilangan Berat (%)	8,016		

Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil



BERLIAN KUSHARI

E30CAEB7-49E5-44B7-ABC4-E32E7F3E45A3
Ir. Berlian Kushari, M.Eng., IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya



MUHAMAD ABDUL HADI

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

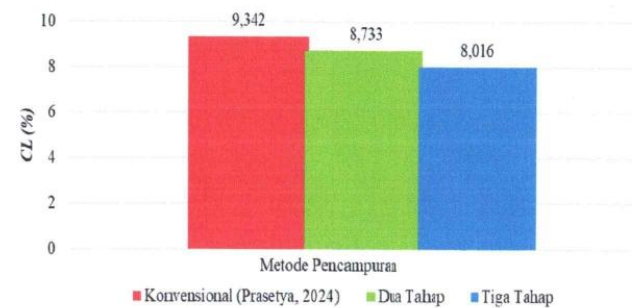
Yogyakarta, April 2026
Peneliti

Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 223

Lampiran 9 Grafik Hasil Pengujian *Cantabro Loss* (CL) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL PENGUJIAN *CANTABRO LOSS* (CL) BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

Metode Pencampuran	CL (%)
Konvensional	9,342
Dua Tahap	8,733
Tiga Tahap	8,016



Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:

BERLIAN KUSHARI
E30CAEB7-49E5-44B7-ABC4-E32E7F3E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng., IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium 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


Saphira Ashya Adlia
NIM : 22 511 223



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.uui.ac.id

Lampiran 10 Hasil Pengujian *Draindown* (DD) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

HASIL PENGUJIAN *DRAINDOWN* (DD) BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

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

Dikerjakan Oleh : Saphira Ashya Aulia
Diperiksa Oleh : Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., IPP.

Metode Pencampuran	No	Keterangan	Benda Uji		
			1	2	3
Konvensional	1	Berat Piring + Benda Uji (gr)	1458,300	1408,430	1534,540
	2	Berat Benda Uji (gr)	1266,700	1161,940	1176,230
	3	Berat Awal Piring Penampung (gr)	191,600	246,490	358,310
	4	Berat Akhir Piring Penampung (gr)	192,480	248,210	360,380
	5	Draindown (%)	0,069	0,148	0,176
	6	Rata-Rata <i>Draindown</i> (%)	0,131		
Dua Tahap	1	Berat Piring + Benda Uji (gr)	1392,810	1407,050	1412,640
	2	Berat Benda Uji (gr)	1139,360	1142,540	1155,200
	3	Berat Awal Piring Penampung (gr)	243,250	254,510	257,440
	4	Berat Akhir Piring Penampung (gr)	244,660	255,960	258,910
	5	Draindown (%)	0,124	0,127	0,127
	6	Rata-Rata <i>Draindown</i> (%)	0,126		
Tiga Tahap	1	Berat Piring + Benda Uji (gr)	1421,360	1437,270	1415,880
	2	Berat Benda Uji (gr)	1154,820	1156,720	1152,430
	3	Berat Awal Piring Penampung (gr)	266,540	280,550	263,450
	4	Berat Akhir Piring Penampung (gr)	267,950	281,910	264,810
	5	Draindown (%)	0,122	0,118	0,118
	6	Rata-Rata <i>Draindown</i> (%)	0,119		

Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:

BERLIAN KUSHARI
25C7694B-5E0A-4680-AF4-
Ir. Berlian Kushari, M.Eng., IPP., ASEAN Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium Jalan Raya

Signed by:

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

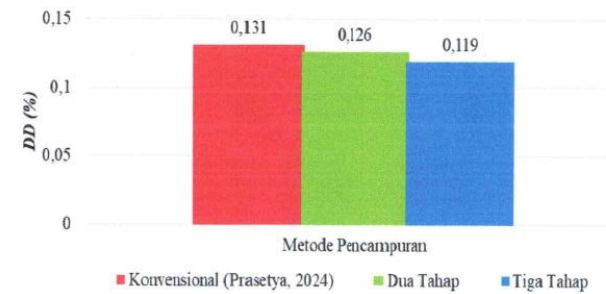
Yogyakarta, April 2026
Peneliti


Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 223

Lampiran 11 Grafik Hasil Pengujian *Draindown* (DD) Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

GRAFIK HASIL PENGUJIAN DRAINDOWN (DD) BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

Metode Pencampuran	DD (%)
Konvensional	0,131
Dua Tahap	0,126
Tiga Tahap	0,119



Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:



BERLIAN KUSHARI

E30CAEB7-49E5-4487-ABCA-E32E7F2E4543

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

NIK : 01 511 0101

Mengetahui

Kepala Laboratorium 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



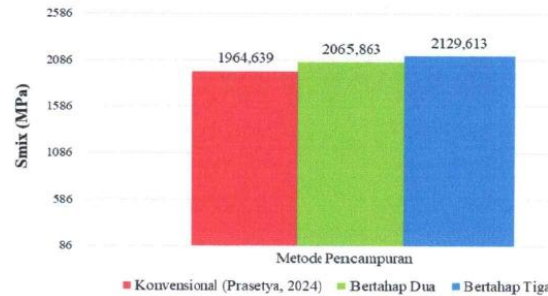
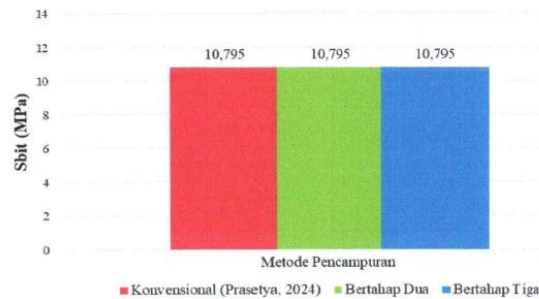
Saphira Ashya Aulia

NIM : 22 511 223

Lampiran 12 Hasil Analisis Nilai *Stiffness Modulus* Berdasarkan Berbagai Metode Pencampuran

HASIL ANALISIS NILAI *STIFFNESS MODULUS* BERDASARKAN BERBAGAI METODE PENCAMPURAN

Metode Pencampuran	Temperature (°C)	Kecepatan (km/jam)	<i>Stiffness Modulus of Bitumen (Sbit)</i> (MPa)	<i>Stiffness Modulus of Mixture (Smix)</i> (MPa)
Konvensional	25	15	10,795	1964,639
Dua Tahap				2065,863
Tiga Tahap				2129,613



Disahkan Oleh,
Manager Laboratorium Jurusan Teknik Sipil

Signed by:



BERLIAN KUSHARI

E30CAE87-49E5-4487-ABC4-E32E7F2E4543
Ir. Berlian Kushari, M.Eng, IPM., ASEAN.Eng.
NIK : 01 511 0101

Mengetahui
Kepala Laboratorium 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



Saphira Ashya Aulia
NIM : 22 511 223

Lampiran 13 Data Lalu Lintas Harian Rata-rata Ruas Jalan Batas Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh Provinsi Jambi Tahun 2024

PROVINSI :		JAMBI	T.A 2024													
No.	LINKID	NAMA RUAS	Arus Rata-rata (kend/hari)											LHR (kend/hari)	LHR (smp/hari)	
			veh 1	veh 2	veh 3	veh 4	veh 5a	veh 5b	veh 6a	veh 6b	veh 7a	veh 7b	veh 7c			veh 8
28	11015	MUARA TEMBESI - BTS. KAB. BATANGHARI/KAB. SAROLANGUN	10.940,67	2.457,00	47,33	696,00	6,00	15,67	38,67	1.085,67	278,33	-	12,67	22,67	15.600,68	18.228,13
29	11016	BTS. KAB. BATANGHARI/KAB.SAROLANGUN - PAUH	4.225,67	1.732,33	61,33	503,00	16,00	5,33	120,33	1.688,33	273,67	-	12,00	4,00	8.641,99	7.542,27
30	11017	PAUH - SAROLANGUN	8.743,33	2.737,33	12,67	738,67	35,00	13,00	51,33	1.703,67	194,67	-	2,67	1,67	14.234,01	11.253,49

Sumber: Balai Pelaksanaan Jalan Nasional (BPJN) Provinsi Jambi

Lampiran 14 Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas Berdasarkan Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Wilayah Kab. Sarolangun Provinsi Jambi Tahun 2022 - 2025

Tahun	Mobil	Faktor Pertumbuhan (%)	Bus	Faktor Pertumbuhan (%)	Truk	Faktor Pertumbuhan (%)	Kendaraan Bermotor - Sepeda Motor	Faktor Pertumbuhan (%)	TOTAL	Faktor 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
Rata-rata Pertumbuhan		18,922		3,984		5,769		6,492		6,758

Sumber: <https://jambi.bps.go.id/id/statistics-table/3/VjJ3NGRGa3dkRk5MTIU1bVNFOTVVbmQyVURSTVFUMDkjMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-kabupaten-kota-dan-jenis-kendaraan-di-provinsi-jambi--unit---2024.html>.

Akses: Tanggal 23 April 2026, Pukul 08:30 WIB

Lampiran 15 Hasil Analisis Perhitungan Nilai CESA 4 dan CESA 5 Berdasarkan Data LHR Ruas Jalan Batas Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh Provinsi Jambi Tahun 2024

Golongan Kendaraan	LHR 2024	i	LHR 2025	LHR 2028	Faktor VDF 4		Faktor VDF 5		DL	DD	R		CESA 4		CESA 5	
	(Kend/Hari)	(%)	(Kend/Hari)	(Kend/Hari)	Faktual	Normal	Faktual	Normal	(%)		3	17	Faktual	Normal	Faktual	Normal
											(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)	(17)
1	4226	0,068	4228,856	4237,435					100	0,50	3,002	17,092				
2	1732	0,068	1733,170	1736,686					100	0,50	3,002	17,092				
3	61	0,068	61,041	61,165					100	0,50	3,002	17,092				
4	503	0,068	503,340	504,361					100	0,50	3,002	17,092				
5a	16	0,068	16,011	16,043					100	0,50	3,002	17,092				
5b	5	0,068	5,003	5,014	1,2	1,2	1,3	1,3	100	0,50	3,002	17,092	3,289,44	18,766,62	3,563,56	20,330,50
6a	120	0,068	120,081	120,325	0,5	0,5	0,4	0,4	100	0,50	3,002	17,092	32,894,42	187,666,18	26,315,53	150,132,94
6b	1688	0,068	1689,141	1692,567	1,4	0,5	1,8	0,4	100	0,50	3,002	17,092	1,295,601,47	2,639,837,55	1,665,773,32	2,111,870,04
7a	274	0,068	274,185	274,741	13,8	4,6	25,4	6	100	0,50	3,002	17,092	2,073,006,21	3,942,240,81	3,815,333,17	5,142,053,24
7b	0	0,068	0,000	0,000					100	0,50	3,002	17,092				
7c	12	0,068	12,008	12,032	8,4	6,1	11,9	8	100	0,50	3,002	17,092	55,262,62	228,952,74	78,288,71	300,265,88
8	4	0,068	4,003	4,011					100	0,50	3,002	17,092				
Jumlah ESA											3.460.054,16	7.017.463,89	5.589.474,30	7.724.652,60		
											10.477.518,06			13.314.126,90		

Keterangan Rumus Setiap Kolom:

(2) = Berdasarkan Lampiran 13

(3) = Berdasarkan Lampiran 14

(4) = $(2) \times \left(\left(1 + \frac{(3)}{100} \right)^1 \right)$

(5) = $(2) \times \left(\left(1 + \frac{(3)}{100} \right)^4 \right)$

(6), (7), (8), (9) = Berdasarkan Tabel 3.11

(10) = Berdasarkan Tabel 3.10

(11) = Berdasarkan sub bab 3.11.1 No. 5 tentang faktor distribusi arah

Lanjutan Lampiran 15 Hasil Analisis Perhitungan Nilai CESA 4 dan CESA 5 Berdasarkan Data LHR Ruas Jalan Batas Kab. Batanghari/Kab. Sarolangun – Pauh Provinsi Jambi Tahun 2024

$$(12) = \frac{(1 + 0,01 \times (3))^{(2028-2025)} - 1}{0,01 \times (3)} = 3,002$$

$$(13) = \frac{(1 + 0,01 \times (3))^{(2045-2028)} - 1}{0,01 \times (3)} = 17,092$$

$$(14) = (4) \times (6) \times (10) \times (11) \times (12) \times 365$$

$$(15) = (5) \times (7) \times (10) \times (11) \times (13) \times 365$$

$$(16) = (4) \times (8) \times (10) \times (11) \times (12) \times 365$$

$$(17) = (5) \times (9) \times (10) \times (11) \times (13) \times 365$$

Lampiran 16 Hasil Desain Tebal Perkerasan Beserta Data Properties Material Lapis Perkerasan

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	FFF(1) 9	
Untuk beban rencana < 30 juta ESAS			menggunakan Aspal Pen		Untuk beban rencana ≥ 30 juta ESAS direkomendasikan menggunakan Aspal PG70 ⁽¹⁾				
Beban rencana 20 tahun (10 ⁶ ESAS)	< 2	> 2 - 5	> 5 - 10	> 10 - 15	> 15 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 150	> 150 - 200
Tebal Perkerasan (mm)									
AC WC	60 ⁽²⁾	40	40	40	40	40	40	50	40
AC BC	-	65	75	75	60	60	75	80	60
	-	80	80	-	-	-	-	-	-
AC Base ⁽³⁾	-	-	-	100	80	85	100	100	80
	-	-	-	-	80	100	100	100	80
	-	-	-	-	-	-	-	-	90
Lapis Fondasi Agregat Kelas A ⁽⁴⁾	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	150	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	200

- (1) Khusus untuk AC WC dan AC BC.
(2) Tumbukan Marshall sebanyak 2 x 50 tumbukan.
(3) Khusus untuk AC Base dengan lalu lintas rencana di atas 30 juta ESAS dapat tidak menggunakan aspal PG70.
(4) Untuk perkerasan dengan jumlah lajur lebih dari 2 per arahnya, tebal lapis fondasi agregat kelas A minimal 300 mm.
(5) Dapat menggunakan timbunan pilihan berbutir kasar yang mempunyai CBR minimum 30% dengan PI 6 - 15 dan ukuran butir maksimum 50 mm atau LFA Kelas C atau stabilisasi semen (UCS 10 kg/cm²). Bilamana untuk ketiga jenis material atau alat yang diperlukan untuk stabilisasi tidak bisa terpenuhi, maka lapisan ini dapat diganti menjadi LFA Kelas B dengan ketebalan 200 mm bila harganya sama atau lebih rendah dari ketiga material tersebut.

Lapisan	Ketebalan (mm)	Modulus Elastisitas (KPa)			Poisson Ratio
		Konvensional	Dua Tahap	Tiga Tahap	
AC WC	40	1100000	1100000	1100000	0,40
SMA	75	1964639,378	2065863,168	2129613,273	0,40
AC BASE	100	1500000	1500000	1500000	0,40
LFA Kelas A	200	220000	220000	220000	0,35
LFA Kelas B	150	170000	170000	170000	0,35
TP/LFA KELAS C/SS	200	131000	131000	131000	0,35
Subgrade	∞	65000	65000	65000	0,45

Lampiran 17 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

```

INPUT FILE NAME -D:\KONVENIONAL 0,001 19 APRIL 26.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -KONVENIONAL

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 1.965E+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:
4.238E-10 1.270E-09 4.222E-09 1.256E-08 4.068E-08 1.126E-07 2.877E-07
4.672E-07 5.089E-07 5.090E-07 5.090E-07

```

Lanjutan Lampiran 17 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

```

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    VERTICAL    VERTICAL    VERTICAL    MAJOR    MINOR    INTERMEDIATE
NO.      COORDINATE    DISP.      STRESS      PRINCIPAL    PRINCIAL    P. STRESS
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (HORIZONTAL
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    P. STRAIN)
1         0.00000    0.00604    550.000    1188.638    65.834    1183.396
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         21.49900    0.00606    0.859      0.859      -2095.466    -1965.790
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         21.50100    0.00606    0.859      0.863      0.226      0.238
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         76.49900    0.00584    0.635      0.636      -0.025      -0.021
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         76.50100    0.00584    0.635      0.636      0.305      0.306
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)

TIME = 0.003

POINT    VERTICAL    VERTICAL    VERTICAL    MAJOR    MINOR    INTERMEDIATE
NO.      COORDINATE    DISP.      STRESS      PRINCIPAL    PRINCIAL    P. STRESS
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (HORIZONTAL
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    P. STRAIN)
1         0.00000    0.00834    550.000    987.245    65.833    982.294
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         21.49900    0.00840    1.767      1.767      -1821.558    -1692.528
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         21.50100    0.00840    1.767      1.781      0.333      0.367
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         76.49900    0.00795    1.130      1.131      -0.217      -0.206
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         76.50100    0.00795    1.130      1.132      0.441      0.445
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)

TIME = 0.01

POINT    VERTICAL    VERTICAL    VERTICAL    MAJOR    MINOR    INTERMEDIATE
NO.      COORDINATE    DISP.      STRESS      PRINCIPAL    PRINCIAL    P. STRESS
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (HORIZONTAL
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    P. STRAIN)
1         0.00000    0.01166    550.000    883.595    72.790    872.996
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         21.49900    0.01174    4.110      4.111    -1559.801    -1432.436
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         21.50100    0.01174    4.110      4.165      0.449      0.555
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         76.49900    0.01074    2.161      2.165      -0.827      -0.791
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)
1         76.50100    0.01074    2.161      2.168      0.603      0.614
          (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)    (STRAIN)

```

Lanjutan Lampiran 17 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

TIME = 0.03						
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 (STRAIN)	0.01593	550.000 -1.091E-05	703.700 8.903E-06	72.790 -1.091E-05	694.463 8.613E-06
1	21.49900 (STRAIN)	0.01616	8.966 1.646E-05	8.968 1.646E-05	-1301.319 -1.372E-05	-1177.474 -1.372E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.01616	8.966 3.863E-05	9.135 3.967E-05	0.434 -1.372E-05	0.730 -1.372E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.01411	3.841 4.002E-05	3.851 4.013E-05	-2.055 -2.074E-05	-1.962 -2.074E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.01411	3.841 4.863E-05	3.861 4.908E-05	0.731 -2.074E-05	0.759 -2.074E-05
TIME = 0.1						
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 (STRAIN)	0.02198	550.000 -2.607E-05	561.976 2.256E-05	83.925 -2.607E-05	544.794 2.081E-05
1	21.49900 (STRAIN)	0.02230	19.922 4.085E-05	19.933 4.085E-05	-991.167 -3.457E-05	-875.663 -3.457E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.02230	19.921 8.901E-05	20.432 9.215E-05	-0.220 -3.458E-05	0.673 -3.458E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.01824	6.496 7.228E-05	6.525 7.258E-05	-4.382 -3.983E-05	-4.139 -3.983E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.01824	6.496 8.922E-05	6.551 9.044E-05	0.711 -3.983E-05	0.782 -3.983E-05
TIME = 0.3						
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 (STRAIN)	0.02801	550.000 -4.933E-05	505.125 4.959E-05	153.633 -4.933E-05	492.484 4.603E-05
1	21.49900 (STRAIN)	0.02832	37.611 8.391E-05	37.678 8.393E-05	-715.346 -7.148E-05	-613.758 -7.148E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.02832	37.608 1.722E-04	38.764 1.793E-04	-2.104 -7.149E-05	0.158 -7.149E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.02160	9.285 1.078E-04	9.346 1.084E-04	-7.187 -6.196E-05	-6.690 -6.196E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02160	9.285 1.343E-04	9.398 1.369E-04	0.485 -6.196E-05	0.630 -6.196E-05
TIME = 1						
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 (STRAIN)	0.03394	550.000 -7.281E-05	388.825 8.983E-05	162.758 -7.281E-05	372.273 7.792E-05

Lanjutan Lampiran 17 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

1	21.49900 (STRAIN)	0.03410	63.420 1.531E-04	63.709 1.533E-04	-469.401 -1.280E-04	-388.161 -1.280E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03410	63.418 2.943E-04	65.460 3.068E-04	-5.400 -1.280E-04	-0.435 -1.280E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02425	11.946 1.420E-04	12.051 1.431E-04	-9.993 -8.405E-05	-9.143 -8.405E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02425	11.946 1.779E-04	12.138 1.822E-04	0.201 -8.405E-05	0.450 -8.405E-05
TIME = 3						
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 (STRAIN)	0.03838	550.000 -5.521E-05	454.637 1.343E-04	292.415 -5.521E-05	441.832 1.193E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03709	80.648 2.043E-04	81.206 2.048E-04	-350.871 -1.654E-04	-282.781 -1.654E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03709	80.641 3.748E-04	83.145 3.902E-04	-7.390 -1.654E-04	-0.310 -1.654E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02547	13.274 1.587E-04	13.405 1.601E-04	-11.339 -9.493E-05	-10.270 -9.493E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02547	13.274 1.991E-04	13.514 2.044E-04	0.094 -9.494E-05	0.409 -9.494E-05
TIME = 10						
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 (STRAIN)	0.03903	550.000 -5.220E-05	443.402 1.399E-04	292.415 -5.220E-05	431.231 1.244E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03762	83.943 2.146E-04	84.564 2.153E-04	-330.831 -1.723E-04	-265.191 -1.723E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03762	83.935 3.900E-04	86.512 4.059E-04	-7.716 -1.724E-04	-0.217 -1.724E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02567	13.504 1.615E-04	13.640 1.629E-04	-11.563 -9.678E-05	-10.454 -9.678E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02567	13.504 2.026E-04	13.752 2.082E-04	0.082 -9.678E-05	0.408 -9.678E-05
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 (STRAIN)	0.03903	550.000 -5.219E-05	443.369 1.399E-04	292.415 -5.219E-05	431.202 1.245E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03762	83.952 2.146E-04	84.573 2.153E-04	-330.775 -1.724E-04	-265.142 -1.724E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03762	83.945 3.901E-04	86.521 4.059E-04	-7.717 -1.724E-04	-0.216 -1.724E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02568	13.505 1.616E-04	13.641 1.630E-04	-11.563 -9.678E-05	-10.454 -9.678E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02568	13.504 2.026E-04	13.753 2.082E-04	0.081 -9.678E-05	0.408 -9.678E-05

Lanjutan Lampiran 17 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

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 (STRAIN)	0.03903	550.000 -5.219E-05	443.369 1.399E-04	292.415 -5.219E-05	431.202 1.245E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03762	83.952 2.146E-04	84.573 2.153E-04	-330.775 -1.724E-04	-265.142 -1.724E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03762	83.945 3.901E-04	86.521 4.059E-04	-7.717 -1.724E-04	-0.216 -1.724E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02568	13.505 1.616E-04	13.641 1.630E-04	-11.563 -9.678E-05	-10.454 -9.678E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02568	13.504 2.026E-04	13.753 2.082E-04	0.081 -9.678E-05	0.408 -9.678E-05
TIME = 0.001						
2	0.00000 (STRAIN)	0.00609	550.000 -7.041E-07	1254.860 5.516E-07	69.904 -7.041E-07	1245.319 5.415E-07
2	21.49900 (STRAIN)	0.00610	0.855 8.981E-07	0.855 8.981E-07	-2102.911 -7.368E-07	-1939.794 -7.368E-07
2	21.50100 (STRAIN)	0.00610	0.855 3.147E-06	0.856 3.150E-06	0.222 -7.369E-07	0.242 -7.369E-07
2	76.49900 (STRAIN)	0.00588	0.628 4.922E-06	0.628 4.922E-06	-0.025 -1.811E-06	-0.023 -1.811E-06
2	76.50100 (STRAIN)	0.00588	0.628 5.487E-06	0.628 5.489E-06	0.301 -1.810E-06	0.302 -1.811E-06
TIME = 0.003						
2	0.00000 (STRAIN)	0.00832	550.000 -1.766E-06	1065.050 1.395E-06	69.904 -1.766E-06	1055.708 1.365E-06
2	21.49900 (STRAIN)	0.00836	1.775 2.351E-06	1.775 2.351E-06	-1845.196 -1.952E-06	-1682.500 -1.952E-06
2	21.50100 (STRAIN)	0.00836	1.775 6.926E-06	1.777 6.934E-06	0.329 -1.952E-06	0.389 -1.952E-06
2	76.49900 (STRAIN)	0.00790	1.128 9.798E-06	1.128 9.800E-06	-0.226 -4.157E-06	-0.218 -4.157E-06
2	76.50100 (STRAIN)	0.00790	1.128 1.131E-05	1.128 1.132E-05	0.435 -4.157E-06	0.438 -4.157E-06
TIME = 0.01						
2	0.00000 (STRAIN)	0.01168	550.000 -4.731E-06	876.062 3.780E-06	69.904 -4.731E-06	867.186 3.686E-06
2	21.49900 (STRAIN)	0.01178	4.167 6.668E-06	4.167 6.668E-06	-1582.781 -5.619E-06	-1421.229 -5.619E-06
2	21.50100 (STRAIN)	0.01178	4.167 1.718E-05	4.172 1.721E-05	0.452 -5.619E-06	0.651 -5.619E-06
2	76.49900 (STRAIN)	0.01076	2.186 2.113E-05	2.187 2.113E-05	-0.843 -1.009E-05	-0.819 -1.009E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01076	2.186 2.517E-05	2.187 2.520E-05	0.606 -1.009E-05	0.616 -1.009E-05
TIME = 0.03						
2	0.00000 (STRAIN)	0.01614	550.000 -1.197E-05	778.965 9.857E-06	84.075 -1.197E-05	765.007 9.419E-06
2	21.49900 (STRAIN)	0.01628	9.103 1.649E-05	9.103 1.649E-05	-1320.605 -1.414E-05	-1161.591 -1.414E-05

Lanjutan Lampiran 17 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

2	21.50100 (STRAIN)	0.01628	9.103 3.904E-05	9.117 3.913E-05	0.435 -1.415E-05	1.018 -1.415E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.01417	3.897 4.075E-05	3.899 4.077E-05	-2.092 -2.097E-05	-2.028 -2.097E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01417	3.897 4.956E-05	3.900 4.963E-05	0.735 -2.097E-05	0.763 -2.097E-05
TIME = 0.1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02216	550.000 -2.658E-05	568.285 2.267E-05	84.075 -2.658E-05	556.509 2.148E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02258	20.232 4.067E-05	20.233 4.067E-05	-1005.175 -3.582E-05	-852.598 -3.582E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02258	20.232 8.975E-05	20.268 8.997E-05	-0.232 -3.582E-05	1.586 -3.582E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.01838	6.633 7.412E-05	6.637 7.416E-05	-4.483 -4.043E-05	-4.312 -4.043E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01838	6.633 9.159E-05	6.641 9.178E-05	0.715 -4.043E-05	0.787 -4.043E-05
TIME = 0.3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02872	550.000 -5.445E-05	557.283 5.560E-05	166.229 -5.445E-05	535.455 4.946E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02884	37.984 8.240E-05	37.988 8.240E-05	-721.563 -7.436E-05	-580.843 -7.436E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02884	37.982 1.720E-04	38.042 1.724E-04	-2.170 -7.437E-05	2.504 -7.437E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.02183	9.552 1.115E-04	9.562 1.116E-04	-7.396 -6.319E-05	-7.041 -6.319E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02183	9.552 1.391E-04	9.570 1.395E-04	0.485 -6.319E-05	0.635 -6.319E-05
TIME = 1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03471	550.000 -7.757E-05	404.555 9.389E-05	166.229 -7.757E-05	388.388 8.226E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.03494	62.994 1.462E-04	63.001 1.462E-04	-466.798 -1.333E-04	-345.418 -1.333E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03493	62.989 2.875E-04	63.041 2.878E-04	-5.596 -1.334E-04	4.789 -1.333E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02458	12.387 1.482E-04	12.403 1.483E-04	-10.353 -8.617E-05	-9.731 -8.617E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02458	12.386 1.859E-04	12.417 1.865E-04	0.192 -8.617E-05	0.456 -8.617E-05
TIME = 3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03786	550.000 -8.168E-05	336.631 1.174E-04	166.229 -8.168E-05	323.671 1.022E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03809	78.889 1.906E-04	78.895 1.906E-04	-344.451 -1.721E-04	-236.924 -1.721E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03808	78.880 3.591E-04	78.905 3.593E-04	-7.690 -1.721E-04	7.299 -1.721E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02586	13.819 1.663E-04	13.840 1.665E-04	-11.791 -9.760E-05	-10.999 -9.760E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02586	13.818 2.089E-04	13.857 2.098E-04	0.079 -9.760E-05	0.416 -9.760E-05
TIME = 10						
2	0.00000 (STRAIN)	0.04005	550.000 -6.687E-05	448.894 1.539E-04	275.410 -6.687E-05	423.576 1.217E-04

Lanjutan Lampiran 17 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

2	21.49900 (STRAIN)	0.03864	81.846 1.993E-04	81.851 1.993E-04	-323.886 -1.793E-04	-219.061 -1.793E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03864	81.836 3.722E-04	81.856 3.723E-04	-8.036 -1.793E-04	7.888 -1.793E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02608	14.068 1.694E-04	14.090 1.696E-04	-12.032 -9.955E-05	-11.207 -9.955E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02608	14.067 2.128E-04	14.108 2.137E-04	0.065 -9.955E-05	0.416 -9.955E-05
TIME = 30						
2	0.00000 (STRAIN)	0.04005	550.000 -6.687E-05	448.858 1.539E-04	275.410 -6.687E-05	423.547 1.217E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03864	81.855 1.993E-04	81.860 1.993E-04	-323.828 -1.793E-04	-219.011 -1.793E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03864	81.845 3.722E-04	81.865 3.723E-04	-8.037 -1.793E-04	7.889 -1.793E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02608	14.069 1.694E-04	14.090 1.697E-04	-12.032 -9.955E-05	-11.208 -9.955E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02608	14.068 2.128E-04	14.108 2.137E-04	0.065 -9.955E-05	0.416 -9.955E-05
TIME = 100						
2	0.00000 (STRAIN)	0.04005	550.000 -6.687E-05	448.858 1.539E-04	275.410 -6.687E-05	423.547 1.217E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03864	81.855 1.993E-04	81.860 1.993E-04	-323.828 -1.793E-04	-219.011 -1.793E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03864	81.845 3.722E-04	81.865 3.723E-04	-8.037 -1.793E-04	7.889 -1.793E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02608	14.069 1.694E-04	14.090 1.697E-04	-12.032 -9.955E-05	-11.208 -9.955E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02608	14.068 2.128E-04	14.108 2.137E-04	0.065 -9.955E-05	0.416 -9.955E-05
TIME = 0.001						
3	0.00000 (STRAIN)	0.00605	0.000 -6.816E-07	1194.200 5.302E-07	50.739 -6.816E-07	1183.651 5.190E-07
3	21.49900 (STRAIN)	0.00606	0.805 8.690E-07	0.804 8.690E-07	-2046.592 -7.221E-07	-1865.017 -7.221E-07
3	21.50100 (STRAIN)	0.00606	0.804 2.979E-06	0.804 2.979E-06	0.201 -7.222E-07	0.224 -7.222E-07
3	76.49900 (STRAIN)	0.00585	0.579 4.593E-06	0.579 4.593E-06	-0.033 -1.719E-06	-0.031 -1.719E-06
3	76.50100 (STRAIN)	0.00585	0.579 5.142E-06	0.579 5.142E-06	0.272 -1.719E-06	0.273 -1.719E-06
TIME = 0.003						
3	0.00000 (STRAIN)	0.00798	0.000 -1.772E-06	1044.844 1.386E-06	50.739 -1.772E-06	1034.440 1.353E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.00801	1.724 2.336E-06	1.724 2.336E-06	-1843.120 -1.962E-06	-1661.922 -1.962E-06
3	21.50100 (STRAIN)	0.00801	1.724 6.769E-06	1.724 6.769E-06	0.301 -1.962E-06	0.370 -1.962E-06
3	76.49900 (STRAIN)	0.00757	1.079 9.594E-06	1.079 9.594E-06	-0.257 -4.178E-06	-0.250 -4.178E-06
3	76.50100 (STRAIN)	0.00757	1.079 1.115E-05	1.079 1.115E-05	0.392 -4.178E-06	0.395 -4.178E-06
TIME = 0.01						
3	0.00000 (STRAIN)	0.01157	0.000 -4.782E-06	861.019 3.773E-06	50.739 -4.782E-06	851.091 3.668E-06

Lanjutan Lampiran 17 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

3	21.49900 (STRAIN)	0.01166	4.185 6.649E-06	4.185 6.649E-06	-1587.756 -5.676E-06	-1407.630 -5.676E-06
3	21.50100 (STRAIN)	0.01166	4.185 1.721E-05	4.185 1.721E-05	0.454 -5.677E-06	0.682 -5.677E-06
3	76.49900 (STRAIN)	0.01062	2.220 2.162E-05	2.220 2.162E-05	-0.885 -1.038E-05	-0.863 -1.038E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01062	2.220 2.581E-05	2.220 2.581E-05	0.598 -1.038E-05	0.608 -1.038E-05
TIME = 0.03						
3	0.00000 (STRAIN)	0.01612	0.000 -1.076E-05	667.676 8.614E-06	50.739 -1.076E-05	658.614 8.329E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.01639	9.087 1.623E-05	9.087 1.623E-05	-1310.728 -1.417E-05	-1133.008 -1.417E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.01639	9.087 3.879E-05	9.087 3.879E-05	0.456 -1.417E-05	1.123 -1.417E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.01426	3.953 4.125E-05	3.953 4.125E-05	-2.103 -2.115E-05	-2.044 -2.115E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01426	3.953 5.015E-05	3.953 5.015E-05	0.756 -2.115E-05	0.784 -2.115E-05
TIME = 0.1						
3	0.00000 (STRAIN)	0.02243	0.000 -2.869E-05	633.508 2.510E-05	104.747 -2.869E-05	615.333 2.325E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.02267	20.040 3.974E-05	20.040 3.974E-05	-993.076 -3.583E-05	-821.578 -3.583E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.02267	20.038 8.845E-05	20.038 8.845E-05	-0.215 -3.583E-05	1.871 -3.583E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.01845	6.664 7.439E-05	6.664 7.439E-05	-4.481 -4.046E-05	-4.324 -4.046E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01845	6.663 9.191E-05	6.663 9.191E-05	0.730 -4.046E-05	0.802 -4.046E-05
TIME = 0.3						
3	0.00000 (STRAIN)	0.02833	0.000 -5.088E-05	454.642 4.759E-05	104.747 -5.088E-05	439.981 4.347E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.02893	37.387 7.975E-05	37.387 7.975E-05	-709.335 -7.436E-05	-549.607 -7.436E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.02893	37.381 1.682E-04	37.381 1.682E-04	-2.148 -7.437E-05	3.227 -7.437E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.02189	9.601 1.121E-04	9.601 1.121E-04	-7.420 -6.335E-05	-7.092 -6.335E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02189	9.600 1.398E-04	9.600 1.398E-04	0.493 -6.335E-05	0.644 -6.335E-05
TIME = 1						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03526	0.000 -8.092E-05	444.814 1.037E-04	188.192 -8.092E-05	419.328 8.537E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.03505	61.316 1.391E-04	61.316 1.391E-04	-454.576 -1.331E-04	-314.836 -1.331E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03505	61.304 2.772E-04	61.304 2.772E-04	-5.565 -1.331E-04	6.456 -1.331E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02466	12.468 1.493E-04	12.468 1.493E-04	-10.410 -8.651E-05	-9.831 -8.651E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02466	12.467 1.872E-04	12.467 1.872E-04	0.196 -8.651E-05	0.463 -8.651E-05

Lanjutan Lampiran 17 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Konvensional

TIME = 3						
3	0.00000	0.03861	0.000	373.168	188.192	351.967
	(STRAIN)		-8.499E-05	1.311E-04	-8.499E-05	1.063E-04
3	21.49900	0.03820	76.115	76.115	-332.911	-207.913
	(STRAIN)		1.789E-04	1.789E-04	-1.714E-04	-1.714E-04
3	21.50100	0.03820	76.098	76.098	-7.653	9.807
	(STRAIN)		3.425E-04	3.425E-04	-1.715E-04	-1.715E-04
3	76.49900	0.02594	13.920	13.920	-11.866	-11.126
	(STRAIN)		1.677E-04	1.677E-04	-9.805E-05	-9.805E-05
3	76.50100	0.02594	13.919	13.919	0.081	0.423
	(STRAIN)		2.107E-04	2.107E-04	-9.805E-05	-9.805E-05
TIME = 10						
3	0.00000	0.03921	0.000	361.431	188.192	341.018
	(STRAIN)		-8.433E-05	1.361E-04	-8.433E-05	1.101E-04
3	21.49900	0.03875	78.826	78.826	-312.551	-190.470
	(STRAIN)		1.866E-04	1.866E-04	-1.786E-04	-1.786E-04
3	21.50100	0.03875	78.808	78.808	-7.999	10.576
	(STRAIN)		3.541E-04	3.541E-04	-1.786E-04	-1.786E-04
3	76.49900	0.02616	14.172	14.172	-12.110	-11.340
	(STRAIN)		1.708E-04	1.708E-04	-1.000E-04	-1.000E-04
3	76.50100	0.02616	14.172	14.172	0.067	0.423
	(STRAIN)		2.146E-04	2.146E-04	-1.000E-04	-1.000E-04
TIME = 30						
3	0.00000	0.03921	0.000	361.399	188.192	340.987
	(STRAIN)		-8.433E-05	1.361E-04	-8.433E-05	1.101E-04
3	21.49900	0.03875	78.834	78.834	-312.494	-190.422
	(STRAIN)		1.867E-04	1.867E-04	-1.786E-04	-1.786E-04
3	21.50100	0.03875	78.816	78.816	-8.000	10.578
	(STRAIN)		3.542E-04	3.542E-04	-1.786E-04	-1.786E-04
3	76.49900	0.02616	14.173	14.173	-12.111	-11.340
	(STRAIN)		1.708E-04	1.708E-04	-1.000E-04	-1.000E-04
3	76.50100	0.02616	14.172	14.172	0.067	0.423
	(STRAIN)		2.146E-04	2.146E-04	-1.000E-04	-1.000E-04
TIME = 100						
3	0.00000	0.03921	0.000	361.399	188.192	340.987
	(STRAIN)		-8.433E-05	1.361E-04	-8.433E-05	1.101E-04
3	21.49900	0.03875	78.834	78.834	-312.494	-190.422
	(STRAIN)		1.867E-04	1.867E-04	-1.786E-04	-1.786E-04
3	21.50100	0.03875	78.816	78.816	-8.000	10.578
	(STRAIN)		3.542E-04	3.542E-04	-1.786E-04	-1.786E-04
3	76.49900	0.02616	14.173	14.173	-12.111	-11.340
	(STRAIN)		1.708E-04	1.708E-04	-1.000E-04	-1.000E-04
3	76.50100	0.02616	14.172	14.172	0.067	0.423
	(STRAIN)		2.146E-04	2.146E-04	-1.000E-04	-1.000E-04

Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

```

INPUT FILE NAME -D:\DUA TAHAP 0,001 19 APRIL 26.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -DUA TAHAP

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 2.066E+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:
4.031E-10 1.208E-09 4.015E-09 1.195E-08 3.869E-08 1.070E-07 2.736E-07
4.443E-07 4.839E-07 4.841E-07 4.841E-07

```

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

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	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	1173.417	65.833	1168.178
	(STRAIN)		-6.592E-07	5.146E-07	-6.592E-07	5.091E-07
1	21.49900	0.00604	0.854	0.854	-2087.747	-1959.083
	(STRAIN)		8.990E-07	8.990E-07	-7.241E-07	-7.241E-07
1	21.50100	0.00604	0.854	0.858	0.223	0.236
	(STRAIN)		3.144E-06	3.168E-06	-7.244E-07	-7.244E-07
1	76.49900	0.00582	0.632	0.632	-0.024	-0.020
	(STRAIN)		4.941E-06	4.944E-06	-1.820E-06	-1.820E-06
1	76.50100	0.00582	0.632	0.632	0.303	0.305
	(STRAIN)		5.504E-06	5.518E-06	-1.819E-06	-1.820E-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	0.00832	550.000	974.931	65.833	970.049
	(STRAIN)		-1.616E-06	1.272E-06	-1.616E-06	1.256E-06
1	21.49900	0.00838	1.755	1.755	-1814.480	-1686.453
	(STRAIN)		2.333E-06	2.333E-06	-1.898E-06	-1.898E-06
1	21.50100	0.00838	1.755	1.769	0.329	0.363
	(STRAIN)		6.854E-06	6.942E-06	-1.898E-06	-1.898E-06
1	76.49900	0.00793	1.124	1.125	-0.215	-0.204
	(STRAIN)		9.698E-06	9.709E-06	-4.104E-06	-4.104E-06
1	76.50100	0.00793	1.124	1.126	0.440	0.443
	(STRAIN)		1.117E-05	1.122E-05	-4.104E-06	-4.104E-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	0.01163	550.000	872.821	72.790	862.381
	(STRAIN)		-4.685E-06	3.761E-06	-4.685E-06	3.651E-06
1	21.49900	0.01171	4.080	4.080	-1553.394	-1427.015
	(STRAIN)		6.616E-06	6.616E-06	-5.443E-06	-5.443E-06
1	21.50100	0.01171	4.079	4.134	0.440	0.545
	(STRAIN)		1.689E-05	1.722E-05	-5.443E-06	-5.443E-06
1	76.49900	0.01071	2.149	2.153	-0.821	-0.785
	(STRAIN)		2.068E-05	2.072E-05	-9.917E-06	-9.917E-06
1	76.50100	0.01071	2.149	2.156	0.601	0.612
	(STRAIN)		2.461E-05	2.478E-05	-9.916E-06	-9.916E-06

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

TIME = 0.03						
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 (STRAIN)	0.01589	550.000 -1.077E-05	695.734 8.794E-06	72.790 -1.077E-05	686.624 8.508E-06
1	21.49900 (STRAIN)	0.01611	8.898 1.640E-05	8.899 1.640E-05	-1296.017 -1.366E-05	-1173.111 -1.366E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.01611	8.897 3.839E-05	9.065 3.942E-05	0.415 -1.366E-05	0.709 -1.366E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.01407	3.820 3.980E-05	3.831 3.991E-05	-2.043 -2.062E-05	-1.950 -2.062E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.01407	3.820 4.836E-05	3.840 4.881E-05	0.728 -2.062E-05	0.756 -2.062E-05
TIME = 0.1						
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 (STRAIN)	0.02192	550.000 -2.575E-05	556.329 2.231E-05	83.925 -2.575E-05	539.353 2.058E-05
1	21.49900 (STRAIN)	0.02224	19.767 4.069E-05	19.778 4.069E-05	-987.142 -3.442E-05	-872.479 -3.442E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.02224	19.766 8.845E-05	20.274 9.157E-05	-0.258 -3.443E-05	0.627 -3.443E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.01820	6.465 7.192E-05	6.494 7.222E-05	-4.360 -3.963E-05	-4.119 -3.963E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.01820	6.464 8.878E-05	6.519 8.999E-05	0.708 -3.963E-05	0.779 -3.963E-05
TIME = 0.3						
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 (STRAIN)	0.02794	550.000 -4.873E-05	501.314 4.912E-05	153.633 -4.873E-05	488.796 4.560E-05
1	21.49900 (STRAIN)	0.02824	37.318 8.357E-05	37.384 8.359E-05	-712.489 -7.117E-05	-611.582 -7.117E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.02824	37.314 1.711E-04	38.466 1.782E-04	-2.170 -7.118E-05	0.074 -7.118E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.02155	9.244 1.073E-04	9.304 1.079E-04	-7.156 -6.168E-05	-6.663 -6.168E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02155	9.243 1.338E-04	9.356 1.363E-04	0.482 -6.168E-05	0.626 -6.168E-05
TIME = 1						
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 (STRAIN)	0.03386	550.000 -7.196E-05	386.700 8.915E-05	162.758 -7.196E-05	370.272 7.733E-05

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

1	21.49900 (STRAIN)	0.03401	62.936 1.525E-04	63.224 1.526E-04	-467.658 -1.274E-04	-386.880 -1.274E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03401	62.934 2.925E-04	64.974 3.050E-04	-5.500 -1.275E-04	-0.573 -1.275E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02420	11.897 1.415E-04	12.002 1.426E-04	-9.958 -8.373E-05	-9.115 -8.373E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02420	11.897 1.773E-04	12.088 1.815E-04	0.197 -8.373E-05	0.443 -8.373E-05
TIME = 3						
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 (STRAIN)	0.03827	550.000 -5.420E-05	453.071 1.335E-04	292.414 -5.420E-05	440.372 1.186E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03699	80.049 2.034E-04	80.607 2.039E-04	-349.673 -1.647E-04	-281.919 -1.647E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03699	80.043 3.726E-04	82.548 3.879E-04	-7.511 -1.647E-04	-0.481 -1.647E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02542	13.223 1.582E-04	13.353 1.595E-04	-11.305 -9.460E-05	-10.244 -9.460E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02542	13.222 1.984E-04	13.461 2.037E-04	0.088 -9.461E-05	0.400 -9.461E-05
TIME = 10						
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 (STRAIN)	0.03891	550.000 -5.120E-05	441.978 1.391E-04	292.414 -5.120E-05	429.894 1.237E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03752	83.324 2.138E-04	83.945 2.143E-04	-329.724 -1.717E-04	-264.399 -1.717E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03751	83.317 3.877E-04	85.896 4.035E-04	-7.841 -1.717E-04	-0.392 -1.717E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02562	13.453 1.610E-04	13.588 1.624E-04	-11.529 -9.645E-05	-10.427 -9.645E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02562	13.452 2.020E-04	13.699 2.075E-04	0.075 -9.645E-05	0.399 -9.645E-05
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 (STRAIN)	0.03892	550.000 -5.119E-05	441.940 1.391E-04	292.414 -5.119E-05	429.872 1.237E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03752	83.334 2.138E-04	83.955 2.144E-04	-329.668 -1.717E-04	-264.350 -1.717E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03752	83.326 3.878E-04	85.906 4.036E-04	-7.841 -1.717E-04	-0.392 -1.717E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02562	13.453 1.610E-04	13.588 1.624E-04	-11.529 -9.645E-05	-10.428 -9.645E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02562	13.453 2.020E-04	13.700 2.075E-04	0.075 -9.646E-05	0.399 -9.645E-05

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

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	0.03892	550.000	441.940	292.414	429.872
	(STRAIN)		-5.119E-05	1.391E-04	-5.119E-05	1.237E-04
1	21.49900	0.03752	83.334	83.955	-329.668	-264.350
	(STRAIN)		2.138E-04	2.144E-04	-1.717E-04	-1.717E-04
1	21.50100	0.03752	83.326	85.906	-7.841	-0.392
	(STRAIN)		3.878E-04	4.036E-04	-1.717E-04	-1.717E-04
1	76.49900	0.02562	13.453	13.588	-11.529	-10.428
	(STRAIN)		1.610E-04	1.624E-04	-9.645E-05	-9.645E-05
1	76.50100	0.02562	13.453	13.700	0.075	0.399
	(STRAIN)		2.020E-04	2.075E-04	-9.646E-05	-9.645E-05
TIME = 0.001						
2	0.00000	0.00607	550.000	1238.612	69.904	1229.199
	(STRAIN)		-6.943E-07	5.442E-07	-6.943E-07	5.343E-07
2	21.49900	0.00608	0.850	0.850	-2095.594	-1934.384
	(STRAIN)		8.953E-07	8.953E-07	-7.339E-07	-7.339E-07
2	21.50100	0.00608	0.850	0.850	0.220	0.240
	(STRAIN)		3.130E-06	3.132E-06	-7.340E-07	-7.340E-07
2	76.49900	0.00586	0.625	0.625	-0.025	-0.022
	(STRAIN)		4.893E-06	4.893E-06	-1.799E-06	-1.799E-06
2	76.50100	0.00586	0.625	0.625	0.299	0.301
	(STRAIN)		5.454E-06	5.456E-06	-1.799E-06	-1.799E-06
TIME = 0.003						
2	0.00000	0.00830	550.000	1051.608	69.904	1042.386
	(STRAIN)		-1.742E-06	1.377E-06	-1.742E-06	1.347E-06
2	21.49900	0.00834	1.763	1.763	-1838.547	-1677.753
	(STRAIN)		2.343E-06	2.343E-06	-1.944E-06	-1.944E-06
2	21.50100	0.00834	1.763	1.765	0.324	0.384
	(STRAIN)		6.886E-06	6.894E-06	-1.944E-06	-1.944E-06
2	76.49900	0.00789	1.122	1.122	-0.224	-0.216
	(STRAIN)		9.742E-06	9.744E-06	-4.130E-06	-4.130E-06
2	76.50100	0.00789	1.122	1.123	0.433	0.436
	(STRAIN)		1.124E-05	1.125E-05	-4.130E-06	-4.130E-06
TIME = 0.01						
2	0.00000	0.01165	550.000	865.362	69.904	856.621
	(STRAIN)		-4.667E-06	3.731E-06	-4.667E-06	3.639E-06
2	21.49900	0.01175	4.137	4.137	-1576.879	-1417.214
	(STRAIN)		6.646E-06	6.646E-06	-5.595E-06	-5.595E-06
2	21.50100	0.01175	4.136	4.141	0.442	0.639
	(STRAIN)		1.708E-05	1.710E-05	-5.595E-06	-5.595E-06
2	76.49900	0.01073	2.174	2.175	-0.837	-0.813
	(STRAIN)		2.100E-05	2.101E-05	-1.003E-05	-1.003E-05
2	76.50100	0.01073	2.174	2.175	0.603	0.613
	(STRAIN)		2.502E-05	2.504E-05	-1.003E-05	-1.003E-05
TIME = 0.03						
2	0.00000	0.01610	550.000	770.111	84.075	756.343
	(STRAIN)		-1.181E-05	9.736E-06	-1.181E-05	9.304E-06
2	21.49900	0.01623	9.036	9.036	-1315.817	-1158.654
	(STRAIN)		1.643E-05	1.643E-05	-1.408E-05	-1.408E-05
2	21.50100	0.01623	9.035	9.049	0.416	0.992
	(STRAIN)		3.881E-05	3.889E-05	-1.409E-05	-1.409E-05

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

2	76.49900 (STRAIN)	0.01414	3.876 4.052E-05	3.878 4.054E-05	-2.079 -2.085E-05	-2.015 -2.085E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01414	3.876 4.928E-05	3.879 4.935E-05	0.732 -2.085E-05	0.759 -2.085E-05
TIME = 0.1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02210	550.000 -2.625E-05	562.557 2.242E-05	84.075 -2.625E-05	550.925 2.124E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02251	20.083 4.056E-05	20.084 4.056E-05	-1001.707 -3.567E-05	-850.891 -3.567E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02251	20.083 8.924E-05	20.120 8.946E-05	-0.272 -3.567E-05	1.524 -3.567E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.01833	6.600 7.375E-05	6.605 7.379E-05	-4.459 -4.022E-05	-4.290 -4.022E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01833	6.600 9.113E-05	6.608 9.132E-05	0.712 -4.022E-05	0.783 -4.022E-05
TIME = 0.3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02816	550.000 -4.911E-05	491.427 4.872E-05	143.825 -4.911E-05	478.846 4.518E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02876	37.714 8.218E-05	37.718 8.218E-05	-719.310 -7.405E-05	-580.172 -7.405E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02876	37.712 1.711E-04	37.773 1.715E-04	-2.239 -7.406E-05	2.380 -7.406E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.02178	9.509 1.110E-04	9.518 1.111E-04	-7.363 -6.291E-05	-7.011 -6.291E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02178	9.508 1.385E-04	9.526 1.389E-04	0.482 -6.291E-05	0.631 -6.291E-05
TIME = 1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03463	550.000 -7.667E-05	402.322 9.318E-05	166.229 -7.667E-05	386.266 8.163E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.03484	62.582 1.459E-04	62.590 1.459E-04	-465.654 -1.328E-04	-345.567 -1.328E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03484	62.578 2.862E-04	62.632 2.865E-04	-5.703 -1.328E-04	4.568 -1.328E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02453	12.335 1.476E-04	12.351 1.478E-04	-10.316 -8.583E-05	-9.699 -8.583E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02453	12.334 1.851E-04	12.365 1.858E-04	0.187 -8.583E-05	0.449 -8.583E-05
TIME = 3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03777	550.000 -8.076E-05	335.215 1.166E-04	166.229 -8.076E-05	322.320 1.016E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03798	78.413 1.902E-04	78.419 1.902E-04	-343.803 -1.715E-04	-237.369 -1.715E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03798	78.403 3.576E-04	78.431 3.578E-04	-7.819 -1.715E-04	7.016 -1.715E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02580	13.764 1.657E-04	13.785 1.659E-04	-11.754 -9.725E-05	-10.968 -9.725E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02580	13.763 2.082E-04	13.802 2.090E-04	0.073 -9.725E-05	0.407 -9.725E-05
TIME = 10						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03993	550.000 -6.584E-05	447.420 1.530E-04	275.410 -6.584E-05	422.204 1.209E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03853	81.360 1.990E-04	81.366 1.990E-04	-323.315 -1.787E-04	-219.546 -1.787E-04

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

2	21.50100 (STRAIN)	0.03853	81.350 3.707E-04	81.373 3.708E-04	-8.168 -1.787E-04	7.593 -1.787E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02602	14.013 1.688E-04	14.034 1.690E-04	-11.995 -9.920E-05	-11.176 -9.920E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02602	14.012 2.121E-04	14.052 2.130E-04	0.059 -9.920E-05	0.407 -9.920E-05
TIME = 30						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03993	550.000 -6.583E-05	447.387 1.530E-04	275.410 -6.583E-05	422.172 1.210E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03853	81.369 1.990E-04	81.374 1.990E-04	-323.258 -1.787E-04	-219.496 -1.787E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03853	81.359 3.707E-04	81.381 3.708E-04	-8.169 -1.787E-04	7.595 -1.787E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02602	14.013 1.688E-04	14.035 1.690E-04	-11.995 -9.920E-05	-11.177 -9.920E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02602	14.013 2.121E-04	14.053 2.130E-04	0.059 -9.920E-05	0.407 -9.920E-05
TIME = 100						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03993	550.000 -6.583E-05	447.387 1.530E-04	275.410 -6.583E-05	422.172 1.210E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03853	81.369 1.990E-04	81.374 1.990E-04	-323.258 -1.787E-04	-219.496 -1.787E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03853	81.359 3.707E-04	81.381 3.708E-04	-8.169 -1.787E-04	7.595 -1.787E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02602	14.013 1.688E-04	14.035 1.690E-04	-11.995 -9.920E-05	-11.177 -9.920E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02602	14.013 2.121E-04	14.053 2.130E-04	0.059 -9.920E-05	0.407 -9.920E-05
TIME = 0.001						
3	0.00000 (STRAIN)	0.00604	0.000 -6.721E-07	1178.530 5.230E-07	50.739 -6.721E-07	1168.125 5.120E-07
3	21.49900 (STRAIN)	0.00605	0.800 8.665E-07	0.800 8.665E-07	-2039.754 -7.193E-07	-1860.487 -7.193E-07
3	21.50100 (STRAIN)	0.00605	0.800 2.964E-06	0.800 2.964E-06	0.199 -7.194E-07	0.222 -7.194E-07
3	76.49900 (STRAIN)	0.00585	0.577 4.569E-06	0.577 4.569E-06	-0.032 -1.708E-06	-0.030 -1.708E-06
3	76.50100 (STRAIN)	0.00585	0.577 5.114E-06	0.271 5.114E-06	0.272 -1.708E-06	0.272 -1.708E-06
TIME = 0.003						
3	0.00000 (STRAIN)	0.00796	0.000 -1.747E-06	1031.045 1.367E-06	50.739 -1.747E-06	1020.824 1.334E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.00799	1.712 2.328E-06	1.712 2.328E-06	-1836.432 -1.954E-06	-1657.530 -1.954E-06
3	21.50100 (STRAIN)	0.00799	1.712 6.728E-06	1.712 6.728E-06	0.297 -1.954E-06	0.365 -1.954E-06
3	76.49900 (STRAIN)	0.00755	1.073 9.533E-06	1.073 9.533E-06	-0.255 -4.149E-06	-0.248 -4.149E-06
3	76.50100 (STRAIN)	0.00755	1.073 1.108E-05	1.073 1.108E-05	0.390 -4.149E-06	0.393 -4.149E-06
TIME = 0.01						
3	0.00000 (STRAIN)	0.01154	0.000 -4.718E-06	850.296 3.724E-06	50.739 -4.718E-06	840.516 3.621E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.01163	4.155 6.630E-06	4.155 6.630E-06	-1582.304 -5.653E-06	-1404.466 -5.653E-06

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

3	21.50100 (STRAIN)	0.01163	4.154 1.711E-05	4.154 1.711E-05	0.444 -5.654E-06	0.669 -5.654E-06
3	76.49900 (STRAIN)	0.01059	2.207 2.149E-05	2.207 2.149E-05	-0.879 -1.032E-05	-0.857 -1.032E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01059	2.207 2.565E-05	2.207 2.565E-05	0.595 -1.032E-05	0.605 -1.032E-05
TIME = 0.03						
3	0.00000 (STRAIN)	0.01608	0.000 -1.063E-05	659.928 8.509E-06	50.739 -1.063E-05	650.975 8.228E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.01634	9.022 1.619E-05	9.022 1.619E-05	-1306.374 -1.411E-05	-1130.904 -1.411E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.01634	9.021 3.857E-05	9.021 3.857E-05	0.436 -1.411E-05	1.095 -1.411E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.01423	3.932 4.103E-05	3.932 4.103E-05	-2.090 -2.103E-05	-2.032 -2.103E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01423	3.932 4.987E-05	3.932 4.987E-05	0.753 -2.103E-05	0.780 -2.103E-05
TIME = 0.1						
3	0.00000 (STRAIN)	0.02237	0.000 -2.833E-05	627.223 2.482E-05	104.747 -2.833E-05	609.247 2.299E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.02260	19.898 3.965E-05	19.898 3.965E-05	-989.970 -3.568E-05	-820.627 -3.568E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.02260	19.897 8.798E-05	19.897 8.798E-05	-0.256 -3.569E-05	1.803 -3.569E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.01840	6.631 7.402E-05	6.631 7.402E-05	-4.458 -4.025E-05	-4.303 -4.025E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01840	6.631 9.145E-05	6.631 9.145E-05	0.727 -4.025E-05	0.799 -4.025E-05
TIME = 0.3						
3	0.00000 (STRAIN)	0.02826	0.000 -5.028E-05	450.847 4.712E-05	104.747 -5.028E-05	436.333 4.304E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.02885	37.134 7.960E-05	37.134 7.960E-05	-707.438 -7.406E-05	-549.676 -7.406E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.02885	37.129 1.674E-04	37.129 1.674E-04	-2.219 -7.407E-05	3.090 -7.407E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.02184	9.557 1.116E-04	9.557 1.116E-04	-7.387 -6.306E-05	-7.062 -6.305E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02184	9.556 1.392E-04	9.556 1.392E-04	0.490 -6.305E-05	0.640 -6.305E-05
TIME = 1						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03517	0.000 -7.997E-05	442.447 1.029E-04	188.192 -7.997E-05	417.110 8.471E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.03495	60.949 1.389E-04	60.949 1.389E-04	-453.755 -1.326E-04	-315.657 -1.326E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03495	60.938 2.761E-04	60.938 2.761E-04	-5.673 -1.326E-04	6.206 -1.326E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02460	12.415 1.487E-04	12.415 1.487E-04	-10.372 -8.617E-05	-9.798 -8.617E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02460	12.415 1.865E-04	12.415 1.865E-04	0.191 -8.617E-05	0.456 -8.617E-05
TIME = 3						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03851	0.000 -8.403E-05	371.678 1.303E-04	188.192 -8.403E-05	350.566 1.056E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03810	75.707 1.789E-04	75.707 1.789E-04	-332.546 -1.709E-04	-208.958 -1.709E-04

Lanjutan Lampiran 18 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Dua Tahap

3	21.50100 (STRAIN)	0.03810	75.691 3.414E-04	75.691 3.414E-04	-7.783 -1.709E-04	9.480 -1.709E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02589	13.864 1.671E-04	13.864 1.671E-04	-11.828 -9.769E-05	-11.094 -9.769E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02589	13.863 2.099E-04	13.863 2.099E-04	0.075 -9.769E-05	0.414 -9.769E-05
TIME = 10						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03911	0.000 -8.338E-05	360.081 1.353E-04	188.192 -8.338E-05	339.741 1.095E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03865	78.415 1.866E-04	78.415 1.866E-04	-312.255 -1.780E-04	-191.539 -1.780E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03865	78.397 3.530E-04	78.397 3.530E-04	-8.132 -1.780E-04	10.234 -1.780E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02611	14.116 1.702E-04	14.116 1.702E-04	-12.072 -9.966E-05	-11.308 -9.966E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02611	14.116 2.139E-04	14.116 2.139E-04	0.060 -9.966E-05	0.413 -9.966E-05
TIME = 30						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03912	0.000 -8.337E-05	360.048 1.354E-04	188.192 -8.337E-05	339.711 1.095E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03865	78.422 1.866E-04	78.422 1.866E-04	-312.198 -1.780E-04	-191.491 -1.780E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03865	78.405 3.530E-04	78.405 3.530E-04	-8.133 -1.780E-04	10.237 -1.780E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02611	14.117 1.702E-04	14.117 1.702E-04	-12.073 -9.966E-05	-11.309 -9.966E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02611	14.116 2.139E-04	14.116 2.139E-04	0.060 -9.966E-05	0.413 -9.966E-05
TIME = 100						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03912	0.000 -8.337E-05	360.048 1.354E-04	188.192 -8.337E-05	339.711 1.095E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03865	78.422 1.866E-04	78.422 1.866E-04	-312.198 -1.780E-04	-191.491 -1.780E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03865	78.405 3.530E-04	78.405 3.530E-04	-8.133 -1.780E-04	10.237 -1.780E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02611	14.117 1.702E-04	14.117 1.702E-04	-12.073 -9.966E-05	-11.309 -9.966E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02611	14.116 2.139E-04	14.116 2.139E-04	0.060 -9.966E-05	0.413 -9.966E-05

Lampiran 19 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

```

INPUT FILE NAME  -D:\TIGA TAHAP 0,001 19 APRIL 26.DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -TIGA TAHAP

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  0.45
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  2.130E+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:
3.910E-10  1.172E-09  3.895E-09  1.159E-08  3.753E-08  1.038E-07  2.654E-07
4.310E-07  4.695E-07  4.696E-07  4.696E-07

```

Lanjutan Lampiran 19 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

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	VERTICAL DISP.	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE P. STRESS (HORIZONTAL P. STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.00602	550.000	1164.812	65.834	1159.686
1	21.49900 (STRAIN)	0.00604	0.851	0.851	-2083.906	-1955.847
1	21.50100 (STRAIN)	0.00604	0.851	0.855	0.222	0.235
1	76.49900 (STRAIN)	0.00582	0.631	0.631	-0.024	-0.020
1	76.50100 (STRAIN)	0.00582	0.631	0.631	0.303	0.305

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 (STRAIN)	0.00831	550.000	967.482	65.833	962.660
1	21.49900 (STRAIN)	0.00836	1.748	1.748	-1810.192	-1682.761
1	21.50100 (STRAIN)	0.00836	1.748	1.762	0.326	0.360
1	76.49900 (STRAIN)	0.00792	1.121	1.122	-0.214	-0.202
1	76.50100 (STRAIN)	0.00792	1.121	1.123	0.439	0.442

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 (STRAIN)	0.01161	550.000	866.312	72.790	855.960
1	21.49900 (STRAIN)	0.01169	4.061	4.061	-1549.496	-1423.706
1	21.50100 (STRAIN)	0.01169	4.061	4.115	0.435	0.539
1	76.49900 (STRAIN)	0.01069	2.142	2.145	-0.817	-0.782
1	76.50100 (STRAIN)	0.01069	2.142	2.149	0.599	0.610

Lanjutan Lampiran 19 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

TIME = 0.03						
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 (STRAIN)	0.01586	550.000 -1.069E-05	690.907 8.729E-06	72.790 -1.069E-05	681.881 8.445E-06
1	21.49900 (STRAIN)	0.01608	8.856 1.636E-05	8.857 1.636E-05	-1292.798 -1.363E-05	-1170.460 -1.363E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.01608	8.856 3.824E-05	9.022 3.926E-05	0.403 -1.363E-05	0.696 -1.363E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.01405	3.808 3.967E-05	3.818 3.977E-05	-2.035 -2.055E-05	-1.943 -2.055E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.01405	3.808 4.820E-05	3.827 4.864E-05	0.726 -2.055E-05	0.754 -2.055E-05
TIME = 0.1						
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 (STRAIN)	0.02188	550.000 -2.555E-05	552.906 2.215E-05	83.925 -2.555E-05	536.051 2.044E-05
1	21.49900 (STRAIN)	0.02220	19.674 4.059E-05	19.685 4.059E-05	-984.704 -3.433E-05	-870.546 -3.433E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.02220	19.673 8.811E-05	20.179 9.122E-05	-0.281 -3.434E-05	0.600 -3.434E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.01817	6.446 7.171E-05	6.474 7.201E-05	-4.347 -3.951E-05	-4.106 -3.951E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.01817	6.445 8.852E-05	6.499 8.972E-05	0.706 -3.951E-05	0.777 -3.951E-05
TIME = 0.3						
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 (STRAIN)	0.02789	550.000 -4.836E-05	498.983 4.883E-05	153.633 -4.836E-05	486.560 4.533E-05
1	21.49900 (STRAIN)	0.02819	37.142 8.337E-05	37.208 8.338E-05	-710.764 -7.099E-05	-610.265 -7.099E-05
1	21.50100 (STRAIN)	0.02819	37.138 1.705E-04	38.287 1.775E-04	-2.208 -7.099E-05	0.025 -7.099E-05
1	76.49900 (STRAIN)	0.02152	9.219 1.070E-04	9.279 1.077E-04	-7.137 -6.151E-05	-6.647 -6.151E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02152	9.218 1.334E-04	9.330 1.359E-04	0.481 -6.151E-05	0.623 -6.151E-05
TIME = 1						
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 (STRAIN)	0.03381	550.000 -7.144E-05	385.399 8.873E-05	162.758 -7.144E-05	369.042 7.697E-05

Lanjutan Lampiran 19 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

1	21.49900 (STRAIN)	0.03395	62.646 1.521E-04	62.934 1.522E-04	-466.605 -1.271E-04	-386.104 -1.271E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03395	62.644 2.914E-04	64.682 3.039E-04	-5.560 -1.271E-04	-0.655 -1.271E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02417	11.868 1.412E-04	11.972 1.422E-04	-9.937 -8.354E-05	-9.098 -8.354E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02417	11.868 1.769E-04	12.058 1.811E-04	0.194 -8.354E-05	0.439 -8.354E-05
TIME = 3						
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 (STRAIN)	0.03820	550.000 -5.358E-05	452.120 1.330E-04	292.415 -5.358E-05	439.449 1.182E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03693	79.691 2.029E-04	80.248 2.034E-04	-348.947 -1.643E-04	-281.397 -1.643E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03693	79.684 3.712E-04	82.191 3.866E-04	-7.583 -1.643E-04	-0.582 -1.643E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02538	13.192 1.578E-04	13.322 1.592E-04	-11.284 -9.441E-05	-10.228 -9.441E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02538	13.192 1.980E-04	13.429 2.033E-04	0.084 -9.441E-05	0.395 -9.441E-05
TIME = 10						
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 (STRAIN)	0.03885	550.000 -5.058E-05	441.096 1.386E-04	292.414 -5.058E-05	429.063 1.233E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03745	82.953 2.132E-04	83.574 2.138E-04	-329.052 -1.712E-04	-263.919 -1.712E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03745	82.946 3.863E-04	85.527 4.021E-04	-7.914 -1.712E-04	-0.497 -1.712E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02559	13.421 1.607E-04	13.556 1.620E-04	-11.508 -9.625E-05	-10.412 -9.625E-05
1	76.50100 (STRAIN)	0.02559	13.421 2.016E-04	13.667 2.070E-04	0.071 -9.625E-05	0.394 -9.625E-05
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 (STRAIN)	0.03885	550.000 -5.057E-05	441.073 1.386E-04	292.415 -5.057E-05	429.027 1.233E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03745	82.963 2.132E-04	83.584 2.138E-04	-328.996 -1.713E-04	-263.870 -1.713E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03745	82.955 3.863E-04	85.537 4.022E-04	-7.915 -1.713E-04	-0.497 -1.713E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02559	13.422 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 19 *Output* KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

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 (STRAIN)	0.03885	550.000 -5.057E-05	441.073 1.386E-04	292.415 -5.057E-05	429.027 1.233E-04
1	21.49900 (STRAIN)	0.03745	82.963 2.132E-04	83.584 2.138E-04	-328.996 -1.713E-04	-263.870 -1.713E-04
1	21.50100 (STRAIN)	0.03745	82.955 3.863E-04	85.537 4.022E-04	-7.915 -1.713E-04	-0.497 -1.713E-04
1	76.49900 (STRAIN)	0.02559	13.422 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
TIME = 0.001						
2	0.00000 (STRAIN)	0.00606	550.000 -6.887E-07	1229.268 5.400E-07	69.904 -6.887E-07	1219.969 5.301E-07
2	21.49900 (STRAIN)	0.00607	0.847 8.939E-07	0.847 8.939E-07	-2091.797 -7.324E-07	-1931.735 -7.324E-07
2	21.50100 (STRAIN)	0.00607	0.847 3.121E-06	0.848 3.123E-06	0.219 -7.325E-07	0.239 -7.325E-07
2	76.49900 (STRAIN)	0.00586	0.623 4.880E-06	0.623 4.881E-06	-0.024 -1.793E-06	-0.022 -1.793E-06
2	76.50100 (STRAIN)	0.00586	0.623 5.439E-06	0.623 5.441E-06	0.299 -1.792E-06	0.300 -1.793E-06
TIME = 0.003						
2	0.00000 (STRAIN)	0.00829	550.000 -1.727E-06	1043.465 1.365E-06	69.904 -1.727E-06	1034.361 1.336E-06
2	21.49900 (STRAIN)	0.00832	1.756 2.339E-06	1.756 2.339E-06	-1834.508 -1.939E-06	-1674.856 -1.939E-06
2	21.50100 (STRAIN)	0.00832	1.756 6.862E-06	1.758 6.870E-06	0.322 -1.939E-06	0.381 -1.939E-06
2	76.49900 (STRAIN)	0.00787	1.119 9.708E-06	1.119 9.710E-06	-0.223 -4.114E-06	-0.215 -4.114E-06
2	76.50100 (STRAIN)	0.00787	1.119 1.120E-05	1.119 1.121E-05	0.432 -4.114E-06	0.435 -4.114E-06
TIME = 0.01						
2	0.00000 (STRAIN)	0.01163	550.000 -4.628E-06	858.909 3.702E-06	69.904 -4.628E-06	850.234 3.610E-06
2	21.49900 (STRAIN)	0.01173	4.118 6.633E-06	4.118 6.633E-06	-1573.293 -5.580E-06	-1414.760 -5.580E-06
2	21.50100 (STRAIN)	0.01173	4.118 1.701E-05	4.123 1.704E-05	0.436 -5.581E-06	0.631 -5.581E-06
2	76.49900 (STRAIN)	0.01071	2.167 2.093E-05	2.167 2.093E-05	-0.833 -9.987E-06	-0.809 -9.987E-06
2	76.50100 (STRAIN)	0.01071	2.167 2.493E-05	2.168 2.495E-05	0.602 -9.987E-06	0.612 -9.987E-06
TIME = 0.03						
2	0.00000 (STRAIN)	0.01607	550.000 -1.172E-05	764.765 9.663E-06	84.075 -1.172E-05	751.094 9.234E-06
2	21.49900 (STRAIN)	0.01620	8.995 1.640E-05	8.995 1.640E-05	-1312.912 -1.405E-05	-1156.861 -1.405E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.01620	8.995 3.867E-05	9.009 3.875E-05	0.404 -1.405E-05	0.976 -1.405E-05

Lanjutan Lampiran 19 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

2	76.49900 (STRAIN)	0.01412	3.863 4.039E-05	3.865 4.040E-05	-2.071 -2.077E-05	-2.008 -2.077E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01412	3.863 4.911E-05	3.866 4.918E-05	0.730 -2.077E-05	0.757 -2.077E-05
TIME = 0.1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02206	550.000 -2.605E-05	559.086 2.227E-05	84.075 -2.605E-05	547.536 2.109E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02247	19.994 4.048E-05	19.995 4.048E-05	-999.603 -3.558E-05	-849.842 -3.558E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02247	19.994 8.893E-05	20.031 8.915E-05	-0.296 -3.558E-05	1.487 -3.558E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.01831	6.580 7.352E-05	6.585 7.357E-05	-4.445 -4.010E-05	-4.277 -4.010E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.01831	6.580 9.085E-05	6.589 9.104E-05	0.710 -4.010E-05	0.781 -4.010E-05
TIME = 0.3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.02812	550.000 -4.874E-05	489.109 4.843E-05	143.825 -4.874E-05	476.602 4.491E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.02871	37.552 8.206E-05	37.556 8.206E-05	-717.944 -7.386E-05	-579.756 -7.386E-05
2	21.50100 (STRAIN)	0.02871	37.550 1.705E-04	37.612 1.709E-04	-2.281 -7.387E-05	2.306 -7.387E-05
2	76.49900 (STRAIN)	0.02175	9.482 1.107E-04	9.492 1.108E-04	-7.343 -6.273E-05	-6.994 -6.273E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02175	9.482 1.381E-04	9.500 1.385E-04	0.480 -6.273E-05	0.628 -6.273E-05
TIME = 1						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03458	550.000 -7.612E-05	400.950 9.274E-05	166.229 -7.612E-05	384.966 8.124E-05
2	21.49900 (STRAIN)	0.03478	62.335 1.457E-04	62.343 1.457E-04	-464.960 -1.325E-04	-345.650 -1.325E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03478	62.331 2.854E-04	62.387 2.857E-04	-5.767 -1.325E-04	4.436 -1.325E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02450	12.303 1.472E-04	12.320 1.474E-04	-10.293 -8.563E-05	-9.680 -8.563E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02450	12.303 1.847E-04	12.334 1.854E-04	0.185 -8.563E-05	0.445 -8.563E-05
TIME = 3						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03771	550.000 -8.019E-05	334.341 1.162E-04	166.229 -8.019E-05	321.485 1.012E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03792	78.127 1.900E-04	78.133 1.900E-04	-343.407 -1.711E-04	-237.632 -1.711E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03792	78.117 3.567E-04	78.147 3.569E-04	-7.895 -1.711E-04	6.846 -1.711E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02577	13.731 1.654E-04	13.751 1.656E-04	-11.732 -9.704E-05	-10.949 -9.704E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02577	13.730 2.077E-04	13.768 2.086E-04	0.069 -9.704E-05	0.402 -9.704E-05
TIME = 10						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03935	550.000 -6.341E-05	417.669 1.405E-04	257.415 -6.341E-05	400.276 1.184E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03847	81.068 1.987E-04	81.074 1.987E-04	-322.967 -1.783E-04	-219.832 -1.783E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03847	81.059 3.697E-04	81.083 3.699E-04	-8.246 -1.783E-04	7.416 -1.783E-04

Lanjutan Lampiran 19 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

2	76.49900 (STRAIN)	0.02599	13.979 1.685E-04	14.001 1.687E-04	-11.972 -9.899E-05	-11.158 -9.899E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02599	13.979 2.116E-04	14.018 2.125E-04	0.055 -9.899E-05	0.401 -9.899E-05
TIME = 30						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03936	550.000 -6.340E-05	417.636 1.405E-04	257.414 -6.340E-05	400.248 1.184E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03847	81.077 1.988E-04	81.083 1.988E-04	-322.909 -1.783E-04	-219.783 -1.783E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03847	81.067 3.698E-04	81.091 3.699E-04	-8.247 -1.783E-04	7.418 -1.783E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02599	13.980 1.685E-04	14.001 1.687E-04	-11.973 -9.899E-05	-11.158 -9.899E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02599	13.979 2.116E-04	14.019 2.125E-04	0.055 -9.899E-05	0.401 -9.899E-05
TIME = 100						
2	0.00000 (STRAIN)	0.03936	550.000 -6.340E-05	417.636 1.405E-04	257.414 -6.340E-05	400.248 1.184E-04
2	21.49900 (STRAIN)	0.03847	81.077 1.988E-04	81.083 1.988E-04	-322.909 -1.783E-04	-219.783 -1.783E-04
2	21.50100 (STRAIN)	0.03847	81.067 3.698E-04	81.091 3.699E-04	-8.247 -1.783E-04	7.418 -1.783E-04
2	76.49900 (STRAIN)	0.02599	13.980 1.685E-04	14.001 1.687E-04	-11.973 -9.899E-05	-11.158 -9.899E-05
2	76.50100 (STRAIN)	0.02599	13.979 2.116E-04	14.019 2.125E-04	0.055 -9.899E-05	0.401 -9.899E-05
TIME = 0.001						
3	0.00000 (STRAIN)	0.00603	0.000 -6.663E-07	1168.861 5.186E-07	50.739 -6.663E-07	1158.530 5.077E-07
3	21.49900 (STRAIN)	0.00604	0.797 8.648E-07	0.797 8.648E-07	-2035.320 -7.176E-07	-1857.435 -7.176E-07
3	21.50100 (STRAIN)	0.00604	0.796 2.954E-06	0.796 2.954E-06	0.198 -7.176E-07	0.221 -7.176E-07
3	76.49900 (STRAIN)	0.00583	0.575 4.552E-06	0.575 4.552E-06	-0.032 -1.701E-06	-0.030 -1.701E-06
3	76.50100 (STRAIN)	0.00583	0.575 5.095E-06	0.575 5.095E-06	0.270 -1.701E-06	0.271 -1.701E-06
TIME = 0.003						
3	0.00000 (STRAIN)	0.00795	0.000 -1.732E-06	1022.788 1.356E-06	50.739 -1.732E-06	1012.594 1.323E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.00798	1.705 2.324E-06	1.705 2.324E-06	-1832.383 -1.949E-06	-1654.864 -1.949E-06
3	21.50100 (STRAIN)	0.00798	1.705 6.704E-06	1.705 6.704E-06	0.295 -1.949E-06	0.362 -1.949E-06
3	76.49900 (STRAIN)	0.00754	1.069 9.496E-06	1.069 9.496E-06	-0.253 -4.131E-06	-0.246 -4.131E-06
3	76.50100 (STRAIN)	0.00754	1.069 1.104E-05	1.069 1.104E-05	0.389 -4.131E-06	0.392 -4.131E-06
TIME = 0.01						
3	0.00000 (STRAIN)	0.01152	0.000 -4.679E-06	843.842 3.694E-06	50.739 -4.679E-06	834.124 3.592E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.01161	4.136 6.618E-06	4.136 6.618E-06	-1578.998 -5.639E-06	-1402.531 -5.639E-06

Lanjutan Lampiran 19 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

3	21.50100 (STRAIN)	0.01161	4.136 1.705E-05	4.136 1.705E-05	0.438 -5.640E-06	0.661 -5.640E-06
3	76.49900 (STRAIN)	0.01057	2.199 2.141E-05	2.199 2.141E-05	-0.875 -1.028E-05	-0.854 -1.028E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01057	2.199 2.555E-05	2.199 2.555E-05	0.593 -1.028E-05	0.603 -1.028E-05
TIME = 0.03						
3	0.00000 (STRAIN)	0.01605	0.000 -1.054E-05	655.229 8.445E-06	50.739 -1.054E-05	646.363 8.166E-06
3	21.49900 (STRAIN)	0.01631	8.982 1.616E-05	8.982 1.616E-05	-1303.726 -1.408E-05	-1129.607 -1.408E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.01631	8.982 3.844E-05	8.982 3.844E-05	0.424 -1.408E-05	1.078 -1.408E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.01420	3.919 4.089E-05	3.919 4.089E-05	-2.083 -2.096E-05	-2.025 -2.096E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01420	3.919 4.971E-05	3.919 4.971E-05	0.751 -2.096E-05	0.778 -2.096E-05
TIME = 0.1						
3	0.00000 (STRAIN)	0.02234	0.000 -2.811E-05	623.408 2.465E-05	104.747 -2.811E-05	605.559 2.284E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.02256	19.813 3.959E-05	19.813 3.959E-05	-988.081 -3.559E-05	-820.032 -3.559E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.02256	19.812 8.769E-05	19.812 8.769E-05	-0.280 -3.560E-05	1.763 -3.560E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.01838	6.611 7.380E-05	6.611 7.380E-05	-4.444 -4.012E-05	-4.289 -4.012E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.01838	6.611 9.117E-05	6.611 9.117E-05	0.725 -4.012E-05	0.796 -4.012E-05
TIME = 0.3						
3	0.00000 (STRAIN)	0.02822	0.000 -4.992E-05	448.542 4.684E-05	104.747 -4.992E-05	434.113 4.278E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.02880	36.983 7.951E-05	36.983 7.951E-05	-706.287 -7.388E-05	-549.705 -7.388E-05
3	21.50100 (STRAIN)	0.02880	36.978 1.669E-04	36.978 1.669E-04	-2.260 -7.389E-05	3.009 -7.389E-05
3	76.49900 (STRAIN)	0.02181	9.530 1.113E-04	9.530 1.113E-04	-7.367 -6.288E-05	-7.044 -6.288E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02181	9.530 1.388E-04	9.530 1.388E-04	0.488 -6.288E-05	0.637 -6.288E-05
TIME = 1						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03511	0.000 -7.940E-05	440.994 1.025E-04	188.192 -7.940E-05	415.749 8.431E-05
3	21.49900 (STRAIN)	0.03489	60.729 1.389E-04	60.729 1.389E-04	-453.254 -1.323E-04	-316.143 -1.323E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03489	60.718 2.755E-04	60.718 2.755E-04	-5.737 -1.323E-04	6.057 -1.323E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02457	12.384 1.483E-04	12.384 1.483E-04	-10.349 -8.596E-05	-9.778 -8.596E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02457	12.383 1.861E-04	12.383 1.861E-04	0.189 -8.596E-05	0.452 -8.596E-05
TIME = 3						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03845	0.000 -8.343E-05	370.758 1.298E-04	188.192 -8.343E-05	349.698 1.052E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03804	75.463 1.788E-04	75.463 1.788E-04	-332.321 -1.705E-04	-209.581 -1.705E-04

Lanjutan Lampiran 19 Output KENPAVE Desain Perkerasan Metode Tiga Tahap

3	21.50100 (STRAIN)	0.03804	75.447 3.407E-04	75.447 3.407E-04	-7.860 -1.705E-04	9.284 -1.705E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02585	13.830 1.667E-04	13.830 1.667E-04	-11.806 -9.748E-05	-11.075 -9.748E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02585	13.830 2.094E-04	13.830 2.094E-04	0.071 -9.748E-05	0.408 -9.748E-05
TIME = 10						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03906	0.000 -8.278E-05	359.243 1.349E-04	188.192 -8.278E-05	338.949 1.090E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03859	78.168 1.865E-04	78.168 1.865E-04	-312.071 -1.776E-04	-192.178 -1.776E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03859	78.151 3.523E-04	78.151 3.523E-04	-8.211 -1.776E-04	10.030 -1.776E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02607	14.082 1.699E-04	14.082 1.699E-04	-12.050 -9.944E-05	-11.289 -9.944E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02607	14.082 2.134E-04	14.082 2.134E-04	0.056 -9.944E-05	0.408 -9.944E-05
TIME = 30						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03906	0.000 -8.278E-05	359.210 1.349E-04	188.192 -8.278E-05	338.921 1.091E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03859	78.175 1.866E-04	78.175 1.866E-04	-312.015 -1.776E-04	-192.129 -1.776E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03859	78.158 3.524E-04	78.158 3.524E-04	-8.212 -1.776E-04	10.032 -1.776E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02607	14.083 1.699E-04	14.083 1.699E-04	-12.050 -9.945E-05	-11.290 -9.945E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02607	14.082 2.134E-04	14.082 2.134E-04	0.056 -9.945E-05	0.408 -9.945E-05
TIME = 100						
3	0.00000 (STRAIN)	0.03906	0.000 -8.278E-05	359.210 1.349E-04	188.192 -8.278E-05	338.921 1.091E-04
3	21.49900 (STRAIN)	0.03859	78.175 1.866E-04	78.175 1.866E-04	-312.015 -1.776E-04	-192.129 -1.776E-04
3	21.50100 (STRAIN)	0.03859	78.158 3.524E-04	78.158 3.524E-04	-8.212 -1.776E-04	10.032 -1.776E-04
3	76.49900 (STRAIN)	0.02607	14.083 1.699E-04	14.083 1.699E-04	-12.050 -9.945E-05	-11.290 -9.945E-05
3	76.50100 (STRAIN)	0.02607	14.082 2.134E-04	14.082 2.134E-04	0.056 -9.945E-05	0.408 -9.945E-05

Lampiran 20 Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Konvensional

FATIGUE CRACKING							
Time (Sec)	Kedalaman	Horizontal Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	-7,27E-07	0,00000073	-7,37E-07	0,00000074	-7,22E-07	0,00000072
0,003	21,4990	-1,91E-06	0,00000191	-1,95E-06	0,00000195	-1,96E-06	0,00000196
0,01	21,4990	-5,47E-06	0,00000547	-5,62E-06	0,00000562	-5,68E-06	0,00000568
0,03	21,4990	-1,37E-05	0,00001372	-1,41E-05	0,00001414	-1,42E-05	0,00001417
0,1	21,4990	-3,46E-05	0,00003457	-3,58E-05	0,00003582	-3,58E-05	0,00003583
0,3	21,4990	-7,15E-05	0,00007148	-7,44E-05	0,00007436	-7,44E-05	0,00007436
1	21,4990	-1,28E-04	0,00012800	-1,33E-04	0,00013330	-1,33E-04	0,00013310
3	21,4990	-1,65E-04	0,00016540	-1,72E-04	0,00017210	-1,71E-04	0,00017140
10	21,4990	-1,72E-04	0,00017230	-1,79E-04	0,00017930	-1,79E-04	0,00017860
30	21,4990	-1,72E-04	0,00017240	-1,79E-04	0,00017930	-1,79E-04	0,00017860
100	21,4990	-1,72E-04	0,00017240	-1,79E-04	0,00017930	-1,79E-04	0,00017860

RUTTING							
Time (Sec)	Kedalaman	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	9,02E-07	0,00000090	8,98E-07	0,00000090	8,69E-07	0,00000087
0,003	21,4990	2,34E-06	0,00000234	2,35E-06	0,00000235	2,34E-06	0,00000234
0,01	21,4990	6,64E-06	0,00000664	6,67E-06	0,00000667	6,65E-06	0,00000665
0,03	21,4990	1,65E-05	0,00001646	1,65E-05	0,00001649	1,62E-05	0,00001623
0,1	21,4990	4,09E-05	0,00004085	4,07E-05	0,00004067	3,97E-05	0,00003974
0,3	21,4990	8,39E-05	0,00008391	8,24E-05	0,00008240	7,98E-05	0,00007975
1	21,4990	1,53E-04	0,00015310	1,46E-04	0,00014620	1,39E-04	0,00013910
3	21,4990	2,04E-04	0,00020430	1,91E-04	0,00019060	1,79E-04	0,00017890
10	21,4990	2,15E-04	0,00021455	1,99E-04	0,00019930	1,87E-04	0,00018660
30	21,4990	2,15E-04	0,00021455	1,99E-04	0,00019930	1,87E-04	0,00018670
100	21,4990	2,15E-04	0,00021455	1,99E-04	0,00019930	1,87E-04	0,00018670

PERMANENT DEFORMATION							
Time (Sec)	Kedalaman	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	76,5010	5,54E-06	0,00000554	5,49E-06	0,00000549	5,14E-06	0,00000514
0,003	76,5010	1,12E-05	0,00001124	1,13E-05	0,00001131	1,12E-05	0,00001115
0,01	76,5010	2,48E-05	0,00002476	2,52E-05	0,00002517	2,58E-05	0,00002581
0,03	76,5010	4,86E-05	0,00004863	4,96E-05	0,00004956	5,02E-05	0,00005015
0,1	76,5010	8,92E-05	0,00008922	9,16E-05	0,00009159	9,19E-05	0,00009191
0,3	76,5010	1,34E-04	0,00013430	1,39E-04	0,00013910	1,40E-04	0,00013980
1	76,5010	1,78E-04	0,00017790	1,86E-04	0,00018590	1,87E-04	0,00018720
3	76,5010	1,99E-04	0,00019910	2,09E-04	0,00020890	2,11E-04	0,00021070
10	76,5010	2,03E-04	0,00020260	2,13E-04	0,00021280	2,15E-04	0,00021460
30	76,5010	2,03E-04	0,00020260	2,13E-04	0,00021280	2,15E-04	0,00021460
100	76,5010	2,03E-04	0,00020260	2,13E-04	0,00021280	2,15E-04	0,00021460

Max	0	10	16,5	Dipakai	Simbol	Nilai	CESA 20 Tahun (N)	Cek
Fatigue cracking	0,0001724	0,0001793	0,0001786	0,0001793	Nf	207.129.910,32	13.314.126,90	Nf > N (YES)
Rutting	0,0002146	0,0001993	0,0001867	0,0002146	Nr	36.214.248,09	13.314.126,90	Nr > N (YES)
Permanent Deformation	0,0002026	0,0002128	0,0002146	0,0002146	Nd	36.176.488,18	13.314.126,90	Nd > N (YES)

Jenis Kendaraan	i (%)	LHR 2025	VDF 5 Normal	DD	DL	CESA 5
1	0,068	4228,856		0,50	1	0
2	0,068	1733,170		0,50	1	0
3	0,068	61,041		0,50	1	0
4	0,068	503,340		0,50	1	0
5a	0,068	16,011		0,50	1	0
5b	0,068	5,003	1,3	0,50	1	1187,051627
6a	0,068	120,081	0,4	0,50	1	8765,919709
6b	0,068	1689,141	0,4	0,50	1	123307,2706
7a	0,068	274,185	6	0,50	1	300232,75
7b	0,068	0,000		0,50	1	0
7c	0,068	12,008	8	0,50	1	17531,83942
8	0,068	4,003		0,50	1	0
TOTAL						451024,8313

Lanjutan Lampiran 20 Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Konvensional

<i>Fatigue cracking</i>				
	207.129.910 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
			+	
		451024,831	a	
a	=	459,243		
b^UR	=	32,034		
b	=	1,068		
UR	=	53,016	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

<i>Rutting</i>				
	36.214.248 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
			+	
		451024,831	a	
a	=	80,293		
b^UR	=	6,426		
b	=	1,068		
UR	=	28,449	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

<i>Permanent Deformation</i>				
	36.176.488 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
			+	
		451024,831	a	
a	=	80,210		
b^UR	=	6,420		
b	=	1,068		
UR	=	28,436	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

Lampiran 21 Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Dua Tahap

FATIGUE CRACKING							
Time (Sec)	Kedalaman	Horizontal Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	-7,24E-07	0,00000072	-7,34E-07	0,00000073	-7,19E-07	0,00000072
0,003	21,4990	-1,90E-06	0,00000190	-1,94E-06	0,00000194	-1,95E-06	0,00000195
0,01	21,4990	-5,44E-06	0,00000544	-5,60E-06	0,00000560	-5,65E-06	0,00000565
0,03	21,4990	-1,37E-05	0,00001366	-1,41E-05	0,00001408	-1,41E-05	0,00001411
0,1	21,4990	-3,44E-05	0,00003442	-3,57E-05	0,00003567	-3,57E-05	0,00003568
0,3	21,4990	-7,12E-05	0,00007117	-7,41E-05	0,00007405	-7,41E-05	0,00007406
1	21,4990	-1,27E-04	0,00012740	-1,33E-04	0,00013280	-1,33E-04	0,00013260
3	21,4990	-1,65E-04	0,00016470	-1,72E-04	0,00017150	-1,71E-04	0,00017090
10	21,4990	-1,72E-04	0,00017170	-1,79E-04	0,00017870	-1,78E-04	0,00017800
30	21,4990	-1,72E-04	0,00017170	-1,79E-04	0,00017870	-1,78E-04	0,00017800
100	21,4990	-1,72E-04	0,00017170	-1,79E-04	0,00017870	-1,78E-04	0,00017800

RUTTING							
Time (Sec)	Kedalaman	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	8,99E-07	0,00000090	8,95E-07	0,00000090	8,67E-07	0,00000087
0,003	21,4990	2,33E-06	0,00000233	2,34E-06	0,00000234	2,33E-06	0,00000233
0,01	21,4990	6,62E-06	0,00000662	6,65E-06	0,00000665	6,63E-06	0,00000663
0,03	21,4990	1,64E-05	0,00001640	1,64E-05	0,00001643	1,62E-05	0,00001619
0,1	21,4990	4,07E-05	0,00004069	4,06E-05	0,00004056	3,97E-05	0,00003965
0,3	21,4990	8,36E-05	0,00008357	8,22E-05	0,00008218	7,96E-05	0,00007960
1	21,4990	1,53E-04	0,00015250	1,46E-04	0,00014590	1,39E-04	0,00013890
3	21,4990	2,03E-04	0,00020340	1,90E-04	0,00019020	1,79E-04	0,00017890
10	21,4990	2,14E-04	0,00021380	1,99E-04	0,00019900	1,87E-04	0,00018660
30	21,4990	2,14E-04	0,00021380	1,99E-04	0,00019900	1,87E-04	0,00018660
100	21,4990	2,14E-04	0,00021380	1,99E-04	0,00019900	1,87E-04	0,00018660

PERMANENT DEFORMATION							
Time (Sec)	Kedalaman	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	76,5010	5,50E-06	0,00000550	5,45E-06	0,00000545	5,11E-06	0,00000511
0,003	76,5010	1,12E-05	0,00001117	1,12E-05	0,00001124	1,11E-05	0,00001108
0,01	76,5010	2,46E-05	0,00002461	2,50E-05	0,00002502	2,57E-05	0,00002565
0,03	76,5010	4,84E-05	0,00004836	4,93E-05	0,00004928	4,99E-05	0,00004987
0,1	76,5010	8,88E-05	0,00008878	9,11E-05	0,00009113	9,15E-05	0,00009145
0,3	76,5010	1,34E-04	0,00013380	1,39E-04	0,00013850	1,39E-04	0,00013920
1	76,5010	1,77E-04	0,00017730	1,85E-04	0,00018510	1,87E-04	0,00018650
3	76,5010	1,98E-04	0,00019840	2,08E-04	0,00020820	2,10E-04	0,00020990
10	76,5010	2,02E-04	0,00020200	2,12E-04	0,00021210	2,14E-04	0,00021390
30	76,5010	2,02E-04	0,00020200	2,12E-04	0,00021210	2,14E-04	0,00021390
100	76,5010	2,02E-04	0,00020200	2,12E-04	0,00021210	2,14E-04	0,00021390

Max	0	10	16,5	Dipakai	Simbol	Nilai	CESA 20 Tahun (N)	Cek
Fatigue cracking	0,0001717	0,0001787	0,0001780	0,0001787	Nf	209.870.193,11	13.314.126,90	Nf > N (YES)
Rutting	0,0002138	0,0001990	0,0001866	0,0002138	Nr	36.786.475,02	13.314.126,90	Nr > N (YES)
Permanent Deformation	0,000202	0,0002121	0,0002139	0,0002139	Nd	36.709.542,23	13.314.126,90	Nd > N (YES)

Jenis Kendaraan	i (%)	LHR 2025	VDF 5 Normal	DD	DL	CESA 5
1	0,068	4228,856		0,50	1	0
2	0,068	1733,170		0,50	1	0
3	0,068	61,041		0,50	1	0
4	0,068	503,340		0,50	1	0
5a	0,068	16,011		0,50	1	0
5b	0,068	5,003	1,3	0,50	1	1187,051627
6a	0,068	120,081	0,4	0,50	1	8765,919709
6b	0,068	1689,141	0,4	0,50	1	123307,2706
7a	0,068	274,185	6	0,50	1	300232,75
7b	0,068	0,000		0,50	1	0
7c	0,068	12,008	8	0,50	1	17531,83942
8	0,068	4,003		0,50	1	0
TOTAL						451024,8313

Lanjutan Lampiran 21 Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Dua Tahap

<i>Fatigue cracking</i>				
	209.870.193 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
		451024,831	a	
a	=	465,318		
b^UR	=	32,445		
b	=	1,068		
UR	=	53,211	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

<i>Rutting</i>				
	36.786.475 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
		451024,831	a	
a	=	81,562		
b^UR	=	6,512		
b	=	1,068		
UR	=	28,652	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

<i>Permanent Deformation</i>				
	36.709.542 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
		451024,831	a	
a	=	81,391		
b^UR	=	6,500		
b	=	1,068		
UR	=	28,625	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

Lampiran 22 Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Tiga Tahap

FATIGUE CRACKING							
Time (Sec)	Kedalaman	Horizontal Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	-7,23E-07	0,00000072	-7,32E-07	0,00000073	-7,18E-07	0,00000072
0,003	21,4990	-1,89E-06	0,00000189	-1,94E-06	0,00000194	-1,95E-06	0,00000195
0,01	21,4990	-5,43E-06	0,00000543	-5,58E-06	0,00000558	-5,64E-06	0,00000564
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	0,00003433	-3,56E-05	0,00003558	-3,56E-05	0,00003559
0,3	21,4990	-7,10E-05	0,00007099	-7,39E-05	0,00007386	-7,39E-05	0,00007388
1	21,4990	-1,27E-04	0,00012710	-1,33E-04	0,00013250	-1,32E-04	0,00013230
3	21,4990	-1,64E-04	0,00016430	-1,71E-04	0,00017110	-1,71E-04	0,00017050
10	21,4990	-1,71E-04	0,00017120	-1,78E-04	0,00017830	-1,78E-04	0,00017760
30	21,4990	-1,71E-04	0,00017130	-1,78E-04	0,00017830	-1,78E-04	0,00017760
100	21,4990	-1,71E-04	0,00017130	-1,78E-04	0,00017830	-1,78E-04	0,00017760

RUTTING							
Time (Sec)	Kedalaman	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	21,4990	8,98E-07	0,00000090	8,94E-07	0,00000089	8,65E-07	0,00000086
0,003	21,4990	2,33E-06	0,00000233	2,34E-06	0,00000234	2,32E-06	0,00000232
0,01	21,4990	6,60E-06	0,00000660	6,63E-06	0,00000663	6,62E-06	0,00000662
0,03	21,4990	1,64E-05	0,00001636	1,64E-05	0,00001640	1,62E-05	0,00001616
0,1	21,4990	4,06E-05	0,00004059	4,05E-05	0,00004048	3,96E-05	0,00003959
0,3	21,4990	8,34E-05	0,00008337	8,21E-05	0,00008206	7,95E-05	0,00007951
1	21,4990	1,52E-04	0,00015210	1,46E-04	0,00014570	1,39E-04	0,00013890
3	21,4990	2,03E-04	0,00020290	1,90E-04	0,00019000	1,79E-04	0,00017880
10	21,4990	2,13E-04	0,00021320	1,99E-04	0,00019870	1,87E-04	0,00018650
30	21,4990	2,13E-04	0,00021320	1,99E-04	0,00019880	1,87E-04	0,00018660
100	21,4990	2,13E-04	0,00021320	1,99E-04	0,00019880	1,87E-04	0,00018660

PERMANENT DEFORMATION							
Time (Sec)	Kedalaman	Vertical Strain					
		0		10		16,5	
0,001	76,5010	5,49E-06	0,00000549	5,44E-06	0,00000544	5,10E-06	0,00000510
0,003	76,5010	1,11E-05	0,00001113	1,12E-05	0,00001120	1,10E-05	0,00001104
0,01	76,5010	2,45E-05	0,00002452	2,49E-05	0,00002493	2,56E-05	0,00002555
0,03	76,5010	4,82E-05	0,00004820	4,91E-05	0,00004911	4,97E-05	0,00004971
0,1	76,5010	8,85E-05	0,00008852	9,09E-05	0,00009085	9,12E-05	0,00009117
0,3	76,5010	1,33E-04	0,00013340	1,38E-04	0,00013810	1,39E-04	0,00013880
1	76,5010	1,77E-04	0,00017690	1,85E-04	0,00018470	1,86E-04	0,00018610
3	76,5010	1,98E-04	0,00019800	2,08E-04	0,00020770	2,09E-04	0,00020940
10	76,5010	2,02E-04	0,00020160	2,12E-04	0,00021160	2,13E-04	0,00021340
30	76,5010	2,02E-04	0,00020160	2,12E-04	0,00021160	2,13E-04	0,00021340
100	76,5010	2,02E-04	0,00020160	2,12E-04	0,00021160	2,13E-04	0,00021340

Max	0	10	16,5	Dipakai	Simbol	Nilai	CESA 20 Tahun (N)	Cek
Fatigue cracking	0,0001713	0,0001783	0,0001776	0,0001783	Nf	211.722.354,94	13.314.126,90	Nf > N (YES)
Rutting	0,0002132	0,0001988	0,0001866	0,0002132	Nr	37.252.236,84	13.314.126,90	Nr > N (YES)
Permanent Deformation	0,0002016	0,0002116	0,0002134	0,0002134	Nd	37.096.185,54	13.314.126,90	Nd > N (YES)

Jenis Kendaraan	i (%)	LHR 2025	VDF 5 Normal	DD	DL	CESA 5
1	0,068	4228,856		0,50	1	0
2	0,068	1733,170		0,50	1	0
3	0,068	61,041		0,50	1	0
4	0,068	503,340		0,50	1	0
5a	0,068	16,011		0,50	1	0
5b	0,068	5,003	1,3	0,50	1	1187,051627
6a	0,068	120,081	0,4	0,50	1	8765,919709
6b	0,068	1689,141	0,4	0,50	1	123307,2706
7a	0,068	274,185	6	0,50	1	300232,75
7b	0,068	0,000		0,50	1	0
7c	0,068	12,008	8	0,50	1	17531,83942
8	0,068	4,003		0,50	1	0
TOTAL						451024,8313

Lanjutan Lampiran 22 Hasil Analisis Jumlah Repetisi Beban dan Perkiraan Umur Layan Perkerasan untuk Metode Pencampuran Tiga Tahap

<i>Fatigue cracking</i>				
	211.722.355 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
		451024,831	a	
a	=	469,425		
b^UR	=	32,722		
b	=	1,068		
UR	=	53,341	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

<i>Rutting</i>				
	37.252.237 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
		451024,831	a	
a	=	82,595		
b^UR	=	6,581		
b	=	1,068		
UR	=	28,815	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

<i>Permanent Deformation</i>				
	37.096.186 =	1187,052	a	5b
		8765,920	a	6a
		123307,271	a	6b
		300232,750	a	7a
		17531,839	a	7c
		451024,831	a	
a	=	82,249		
b^UR	=	6,558		
b	=	1,068		
UR	=	28,761	Tahun	
	CEK	Struktur OK		

Lampiran 23 Hasil Analisis Statistik *One-Way* MANOVA

Multivariate Tests ^a							
Effect		Value	F	Hypothesis df	Error df	Sig.	Partial Eta Squared
Intercept	Pillai's Trace	1.000	4.116E+10 ^b	6.000	1.000	<.001	1.000
	Wilks' Lambda	.000	4.117E+10 ^b	6.000	1.000	<.001	1.000
	Hotelling's Trace	2.470E+11	4.117E+10 ^b	6.000	1.000	<.001	1.000
	Roy's Largest Root	2.470E+11	4.117E+10 ^b	6.000	1.000	<.001	1.000
Metode_Pencampuran	Pillai's Trace	1.913	7.370	12.000	4.000	.034	.957
	Wilks' Lambda	.000	26.634 ^b	12.000	2.000	.037	.994
	Hotelling's Trace	2235.763	.000	12.000	.000	.	.999
	Roy's Largest Root	2225.148	741.716 ^c	6.000	2.000	.001	1.000

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	3.986	2	6	.079
	Based on Median	1.140	2	6	.381
	Based on Median and with adjusted df	1.140	2	3.164	.424
	Based on trimmed mean	3.693	2	6	.090
VFWA	Based on Mean	3.982	2	6	.079
	Based on Median	1.086	2	6	.396
	Based on Median and with adjusted df	1.086	2	3.236	.436
	Based on trimmed mean	3.676	2	6	.091
VMA	Based on Mean	3.988	2	6	.079
	Based on Median	1.130	2	6	.383
	Based on Median and with adjusted df	1.130	2	3.171	.426
	Based on trimmed mean	3.692	2	6	.090
Density	Based on Mean	3.944	2	6	.081
	Based on Median	1.215	2	6	.360
	Based on Median and with adjusted df	1.215	2	3.151	.406
	Based on trimmed mean	3.674	2	6	.091
Stabilitas	Based on Mean	1.353	2	6	.327
	Based on Median	.983	2	6	.427
	Based on Median and with adjusted df	.983	2	3.691	.455
	Based on trimmed mean	1.330	2	6	.332
Flow	Based on Mean	.457	2	6	.653
	Based on Median	.143	2	6	.870
	Based on Median and with adjusted df	.143	2	5.158	.870
	Based on trimmed mean	.431	2	6	.669

Lanjutan Lampiran 23 Hasil Analisis Statistik *One-Way* MANOVA

MQ	Based on Mean	.255	2	6	.783
	Based on Median	.204	2	6	.821
	Based on Median and with adjusted df	.204	2	5.616	.821
	Based on trimmed mean	.252	2	6	.785
ITS	Based on Mean	.122	2	6	.887
	Based on Median	.005	2	6	.995
	Based on Median and with adjusted df	.005	2	5.023	.995
	Based on trimmed mean	.106	2	6	.901
CL	Based on Mean	5.835	2	6	.039
	Based on Median	3.530	2	6	.097
	Based on Median and with adjusted df	3.530	2	2.001	.221
	Based on trimmed mean	5.678	2	6	.041
Stabilitas_30 Menit	Based on Mean	1.353	2	6	.327
	Based on Median	.983	2	6	.427
	Based on Median and with adjusted df	.983	2	3.691	.455
	Based on trimmed mean	1.330	2	6	.332
Stabilitas_24 Jam	Based on Mean	.502	2	6	.629
	Based on Median	.217	2	6	.811
	Based on Median and with adjusted df	.217	2	5.122	.812
	Based on trimmed mean	.479	2	6	.641
ITS_30 Menit	Based on Mean	.122	2	6	.887
	Based on Median	.005	2	6	.995
	Based on Median and with adjusted df	.005	2	5.023	.995
	Based on trimmed mean	.106	2	6	.901
ITS_24 Jam	Based on Mean	.202	2	6	.822
	Based on Median	.125	2	6	.884
	Based on Median and with adjusted df	.125	2	5.963	.884
	Based on trimmed mean	.197	2	6	.827
Draindown	Based on Mean	9.178	2	6	.015
	Based on Median	2.214	2	6	.190
	Based on Median and with adjusted df	2.214	2	2.021	.310
	Based on trimmed mean	8.387	2	6	.018

Tests the null hypothesis that the error variance of the dependent variable is equal across groups.

a. Design: Intercept + Metode_Pencampuran

Lanjutan Lampiran 23 Hasil 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
Corrected Model	VITM	.356 ^a	2	.178	1.990	.217	.399
	VFWA	7.231 ^b	2	3.615	1.965	.221	.396
	VMA	.261 ^c	2	.130	1.992	.217	.399
	Density	.000 ^d	2	9.911E-5	1.910	.228	.389
	Stabilitas	9085.996 ^e	2	4542.998	8.067	.020	.729
	Flow	.352 ^f	2	.176	37.235	<.001	.925
	MQ	10061.685 ^g	2	5030.842	26.542	.001	.898
	ITS	13720.039 ^h	2	6860.019	11.700	.008	.796
	CL	2.643 ⁱ	2	1.322	.176	.843	.055
	Stabilitas_30 Menit	9085.996 ^e	2	4542.998	8.067	.020	.729
	Stabilitas_24 Jam	11181.710 ^j	2	5590.855	27.153	<.001	.901
	ITS_30 Menit	13720.039 ^h	2	6860.019	11.700	.008	.796
	ITS_24 Jam	13069.551 ^k	2	6534.776	17.853	.003	.856
	Draindown	.000 ^l	2	.000	.100	.906	.032
Intercept	VITM	140.257	1	140.257	1568.346	<.001	.996
	VFWA	54439.778	1	54439.778	29588.001	<.001	1.000
	VMA	2834.143	1	2834.143	43269.794	<.001	1.000
	Density	45.248	1	45.248	872017.987	<.001	1.000
	Stabilitas	8977432.165	1	8977432.165	15940.584	<.001	1.000
	Flow	78.322	1	78.322	16585.941	<.001	1.000
	MQ	1046378.283	1	1046378.283	5520.602	<.001	.999
	ITS	5824583.225	1	5824583.225	9934.412	<.001	.999
	CL	680.671	1	680.671	90.566	<.001	.938
	Stabilitas_30 Menit	8977432.165	1	8977432.165	15940.584	<.001	1.000
	Stabilitas_24 Jam	8422641.013	1	8422641.013	40905.527	<.001	1.000
	ITS_30 Menit	5824583.225	1	5824583.225	9934.412	<.001	.999
	ITS_24 Jam	4625516.225	1	4625516.225	12636.810	<.001	1.000
	Draindown	.142	1	.142	137.620	<.001	.958
Metode_Pencampuran	VITM	.356	2	.178	1.990	.217	.399
	VFWA	7.231	2	3.615	1.965	.221	.396
	VMA	.261	2	.130	1.992	.217	.399
	Density	.000	2	9.911E-5	1.910	.228	.389
	Stabilitas	9085.996	2	4542.998	8.067	.020	.729
	Flow	.352	2	.176	37.235	<.001	.925
	MQ	10061.685	2	5030.842	26.542	.001	.898
	ITS	13720.039	2	6860.019	11.700	.008	.796
	CL	2.643	2	1.322	.176	.843	.055
	Stabilitas_30 Menit	9085.996	2	4542.998	8.067	.020	.729
	Stabilitas_24 Jam	11181.710	2	5590.855	27.153	<.001	.901
	ITS_30 Menit	13720.039	2	6860.019	11.700	.008	.796
	ITS_24 Jam	13069.551	2	6534.776	17.853	.003	.856
	Draindown	.000	2	.000	.100	.906	.032
Error	VITM	.537	6	.089			
	VFWA	11.040	6	1.840			
	VMA	.393	6	.065			
	Density	.000	6	5.189E-5			
	Stabilitas	3379.085	6	563.181			
	Flow	.028	6	.005			
	MQ	1137.244	6	189.541			
	ITS	3517.823	6	586.304			
	CL	45.094	6	7.516			

Lanjutan Lampiran 23 Hasil Analisis Statistik *One-Way* MANOVA

	Stabilitas_30 Menit	3379.085	6	563.181			
	Stabilitas_24 Jam	1235.428	6	205.905			
	ITS_30 Menit	3517.823	6	586.304			
	ITS_24 Jam	2196.211	6	366.035			
	Draindown	.006	6	.001			
Total	VITM	141.149	9				
	VFWA	54458.048	9				
	VMA	2834.797	9				
	Density	45.249	9				
	Stabilitas	8989897.247	9				
	Flow	78.703	9				
	MQ	1057577.212	9				
	ITS	5841821.086	9				
	CL	728.408	9				
	Stabilitas_30 Menit	8989897.247	9				
	Stabilitas_24 Jam	8435058.151	9				
	ITS_30 Menit	5841821.086	9				
	ITS_24 Jam	4640781.987	9				
	Draindown	.148	9				
Corrected Total	VITM	.893	8				
	VFWA	18.270	8				
	VMA	.654	8				
	Density	.001	8				
	Stabilitas	12465.081	8				
	Flow	.380	8				
	MQ	11198.928	8				
	ITS	17237.861	8				
	CL	47.738	8				
	Stabilitas_30 Menit	12465.081	8				
	Stabilitas_24 Jam	12417.138	8				
	ITS_30 Menit	17237.861	8				
	ITS_24 Jam	15265.762	8				
	Draindown	.006	8				

a. R Squared = .399 (Adjusted R Squared = .198)

b. R Squared = .396 (Adjusted R Squared = .194)

c. R Squared = .399 (Adjusted R Squared = .199)

d. R Squared = .389 (Adjusted R Squared = .185)

e. R Squared = .729 (Adjusted R Squared = .639)

f. R Squared = .925 (Adjusted R Squared = .901)

g. R Squared = .898 (Adjusted R Squared = .865)

h. R Squared = .796 (Adjusted R Squared = .728)

i. R Squared = .055 (Adjusted R Squared = -.260)

j. R Squared = .901 (Adjusted R Squared = .867)

k. R Squared = .856 (Adjusted R Squared = .808)

l. R Squared = .032 (Adjusted R Squared = -.290)