

TUGAS AKHIR

VERIFIKASI EVALUASI KINERJA PERKERASAN LENTUR PADA RUAS JALAN YOGYAKARTA- PAKEM MENGGUNAKAN PROGRAM WINJULEA DAN KENPAVE (*VERIFICATION OF FLEXIBLE PAVEMENT PERFORMANCE EVALUATION ON THE YOGYAKARTA-PAKEM ROAD USING WINJULEA AND KENPAVE*)

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



**Yuda Prabowo
21511243**

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

TUGAS AKHIR

VERIFIKASI EVALUASI KINERJA PERKERASAN LENTUR PADA RUAS JALAN YOGYAKARTA- PAKEM MENGGUNAKAN PROGRAM WINJULEA DAN KENPAVE (*VERIFICATION OF FLEXIBLE PAVEMENT PERFORMANCE EVALUATION ON THE YOGYAKARTA-PAKEM ROAD USING WINJULEA AND KENPAVE*)

Disusun Oleh

Yuda Prabowo
21511243

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

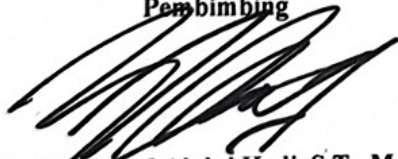
Diuji pada tanggal 27 Oktober 2025

Oleh Dewan Penguji

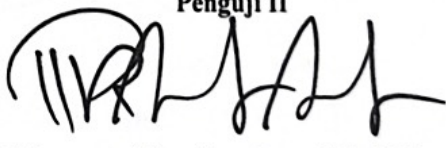
Pembimbing

Penguji I

Penguji II

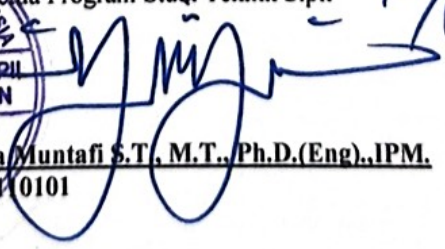

Ir. Muhammad Abdul Hadi, S.T., M.T.
NIK : 215111307


Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK : 185111304


Pravogo Afang Pravitno, S.T., M.Sc.
NIK : 205111303



Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil


Ir. Yulia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng), IPM.
NIK : 093110101

13/11/2025

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, **27** Oktober 2025

Yang membuat pernyataan

A handwritten signature in black ink is written over a yellow revenue stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text '10000', 'METERAI TEMPEL', and the alphanumeric code 'DF60FANX089762616'.

Yuda Prabowo

(21511243)

DEDIKASI

This final project is dedicated to myself, as a testament to the journey filled with perseverance, determination, and hard work. Thank you for every step I've taken, for facing the challenges head-on, and for never giving up on my dreams.

To my dearest Mama and Papa, whose unwavering love, prayers, and support have been my greatest strength. This achievement is a reflection of your sacrifices and the endless affection you've given me. You are the reason I continue to move forward with courage and hope.

To Mbak Angga and Mas Ricky, whose care, encouragement, and laughter have lightened my path. You are the companions who've made this journey more meaningful, and your presence has been a gift I will forever treasure.

May this final project stand as a humble tribute to the love, support, and inspiration I've received from each of you. Thank you for being an integral part of my success.

*For my beloved family
Yuda Prabowo, S.ST., S.T.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dan penyusunan laporan dengan judul “Verifikasi Evaluasi Kinerja Perkerasan Lentur Pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem Menggunakan Program WinJULEA dan KENPAVE”. Tujuan tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi strata satu Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

Dengan selesainya penyusunan laporan ini, tentu saja tidak lepas dari pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Penulis juga mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing tugas Akhir yang telah memberi nasihat, bimbingan, serta dorongan kepada penulis selama proses penyusunan Tugas Akhir.
2. Bapak Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji sidang tugas akhir penulis
3. Bapak Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc., selaku Dosen Penguji sidang tugas akhir penulis
4. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, ST., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM. selaku Ketua Jurusan Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.
5. Ibunda Sri Rahayu dan Ayahanda Miswan yang senantiasa mendoakan, memberikan kasih sayang dan semangat kepada penulis.
6. Mbak Angga dan Mas Ricky yang selalu memberikan motivasi dan semangat kepada penulis.
7. Dinas PUPESDM Provinsi Yogyakarta yang telah membantu penulis dalam memberikan data dan penjelasan mengenai data lapangan.

8. Seluruh pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan laporan tugas akhir yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Laporan ini telah diselesaikan, penulis sadar bahwa masih ada kekurangan dalam penyusunan laporan ini. Kritikan dan saran yang membangun dari pembaca dapat membantu penulis agar bisa lebih baik dalam penyusunan laporan dikemudian hari. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Yogyakarta, Oktober 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xvi
ABSTRAK	xviii
<i>ABSTRACT</i>	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	6
1.4 Manfaat	6
1.5 Batasan Masalah	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan Metode Bina Marga 2024	8
2.2 Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan Aplikasi WinJULEA	10
2.3 Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan Aplikasi KENPAVE	11
2.4 Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu	12
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024	15
3.1.1 Umur Rencana	15
3.1.2 Pemilihan Jenis Perkerasan	16
3.1.3 Lalu Lintas	17
	vii

3.1.4 Faktor Lajur Rencana	18
3.1.5 Jenis Kendaraan	19
3.1.6 Faktor Ekuivalen Beban (<i>Vehicle Damage Factor</i>)	20
3.1.7 Beban Sumbu Standar Kumulatif	21
3.1.8 Bagan Desain Tebal Perkerasan Lentur	22
3.2 Aplikasi WinJULEA	31
3.2.1 <i>Input Layers</i>	32
3.2.2 <i>Input Loads</i>	34
3.2.3 <i>Input Evaluation Points</i>	36
3.2.4 <i>Input Calculation Depth</i>	36
3.2.5 <i>Result At Calculations Points</i>	36
3.3 Aplikasi KENPAVE	39
3.3.1 Menu Utama Aplikasi KENPAVE	40
3.3.2 Program KENLAYER	41
BAB IV METODE PENELITIAN	48
4.1 Metode Penelitian	48
4.2 Lokasi Penelitian	48
4.3 Pengumpulan Data	49
4.4 Tahapan Penelitian	50
4.5 Analisis Data	51
4.5.1 Tahap Metode Bina Marga 2024	53
4.5.2 Tahap Analisis Menggunakan WinJULEA	53
4.5.3 Tahap Analisis Menggunakan KENPAVE	54
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	56
5.1 Data Penelitian	56
5.1.1 Struktur dan Tebal Perkerasan <i>Existing</i>	57
5.1.2 Data Lalu Lintas	59
5.2 Analisis Perkerasan Menggunakan Metode Bina Marga 2024	60
5.2.1 Penentuan Umur Rencana	60
5.2.2 Perhitungan Data Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR)	60
5.2.3 Penentuan Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas	62

5.2.4 Menentukan Faktor Ekuivalen Beban (VDF)	65
5.2.5 Analisis Perhitungan <i>Cumulative Equivalent Single Axle Load</i> (CESAL)	66
5.3 Evaluasi Perkerasan <i>Existing</i>	74
5.3.1 Evaluasi Perkerasan <i>Existing</i> Menggunakan Aplikasi WinJULEA	74
5.3.2 Evaluasi Perkerasan <i>Existing</i> Menggunakan Aplikasi KENPAVE	87
5.4 Penentuan Tebal Perkerasan Alternatif	99
5.5 Evaluasi Perkerasan Alternatif	102
5.5.1 Evaluasi Perkerasan Alternatif Menggunakan Aplikasi WinJULEA	102
5.5.2 Evaluasi Perkerasan Alternatif Menggunakan Aplikasi KENPAVE	111
5.6 Perbandingan Hasil Evaluasi Perkerasan Menggunakan Aplikasi WinJULEA dan Aplikasi KENPAVE	120
5.7 Pembahasan	127
5.7.1 Pembahasan Perkerasan <i>Existing</i>	127
5.7.2 Pembahasan Perkerasan Alternatif	130
5.7.3 Pembahasan Penggunaan Aplikasi WinJULEA dan Aplikasi KENPAVE	132
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	135
6.1 Kesimpulan	135
6.2 Saran	136
DAFTAR PUSTAKA	137
LAMPIRAN	144

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini	13
Tabel 3.1 Pemilihan Umur Rencana	16
Tabel 3.2 Pemilihan Jenis Perkerasan	16
Tabel 3.3 Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i)	18
Tabel 3.4 Faktor Distribusi Lajur (DL)	19
Tabel 3.5 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan	19
Tabel 3.6 VDF Daerah Istimewa Yogyakarta	21
Tabel 3.7 Bagan Desain-3(1) Desain Perkerasan Lentur dengan 150 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	23
Tabel 3.8 Bagan Desain-3(2) Desain Perkerasan Lentur dengan 200 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	24
Tabel 3.9 Bagan Desain-3(3) Desain Perkerasan Lentur dengan 250 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	25
Tabel 3.10 Bagan Desain-3(4) Desain Perkerasan Lentur dengan 300 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	26
Tabel 3.11 Bagan Desain-3A Desain Perkerasan Lentur–Aspal dengan Lapis Fondasi Agregat (Aspal Pen 60/70 dan PG70)	27
Tabel 3.12 Bagan Desain-3B Penyesuaian tebal lapis timbunan pilihan berbutir kasar atau LFA kelas C atau stabilisasi semen (hanya untuk bagan desain-3A) beban rencana 20 tahun > 5 juta ESA5	28
Tabel 3.13 Bagan Desain-4 Desain perkerasan lentur dengan HRS	28
Tabel 3.14 Bagan Desain-5 Perkerasan Berbutir dengan Laburan	29
Tabel 3.15 Bagan Desain-6 Perkerasan dengan Stabilisasi Tanah Semen (<i>Soil Cement</i>) (untuk area dengan sumber agregat atau kerikil terbatas)	29
Tabel 3.16 Bagan Desain-7 Perkerasan dengan <i>Improve Subgrade</i> Stabilisasi Semen (untuk area dengan sumber agregat atau kerikil terbatas)	30
Tabel 3.17 Nilai Modulus Elastisitas Bina Marga 2024	33
Tabel 3.18 Nilai <i>Poisson's Ratio</i> Bina Marga 2024	34

Tabel 4.1 Data Kondisi Ruas Jalan Kaliurang–Pakem KM 14,5 – 16	49
Tabel 5.1 Data Lalu Lintas Tahun 2024	59
Tabel 5.2 Rekapitulasi Perhitungan LHR 2024	62
Tabel 5.3 Rekapitulasi Perhitungan LHR 2025 dan LHR 2028	68
Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan CESAL4 dan CESAL5	72
Tabel 5.5 Data Material Lapisan <i>Existing</i>	76
Tabel 5.6 <i>Output</i> Analisis WinJULEA untuk Ketebalan <i>Existing</i>	80
Tabel 5.7 Rekapitulasi Data untuk Perhitungan Prediksi Umur Pelayanan	85
Tabel 5.8 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Jalan <i>Existing</i>	86
Tabel 5.9 <i>Input</i> Data pada Menu General	89
Tabel 5.10 <i>Output</i> Analisis KENPAVE untuk Ketebalan <i>Existing</i>	95
Tabel 5.11 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Jalan	99
Tabel 5.12 Data Material Lapisan Alternatif 1 dan Alternatif 2	103
Tabel 5.13 <i>Output</i> Analisis WinJULEA untuk Alternatif 1	105
Tabel 5.14 <i>Output</i> Analisis WinJULEA untuk Alternatif 2	106
Tabel 5.15 Hasil Perhitungan Nilai Nf Perkerasan Alternatif Berdasarkan <i>Output</i> WinJULEA	107
Tabel 5.16 Hasil Perhitungan Nilai Nr Perkerasan Alternatif Berdasarkan <i>Output</i> WinJULEA	108
Tabel 5.17 Hasil Perhitungan Nilai Nd Perkerasan Alternatif Berdasarkan <i>Output</i> WinJULEA	109
Tabel 5.18 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Alternatif	111
Tabel 5.19 <i>Output</i> Analisis KENPAVE untuk Ketebalan Alternatif 1	114
Tabel 5.20 <i>Output</i> Analisis KENPAVE untuk Ketebalan Alternatif 2	114
Tabel 5.21 Hasil Perhitungan Nilai Nf Perkerasan Alternatif Berdasarkan <i>Output</i> KENPAVE	115
Tabel 5.22 Hasil Perhitungan Nilai Nr Perkerasan Alternatif Berdasarkan <i>Output</i> KENPAVE	116
Tabel 5.23 Hasil Perhitungan Nilai Nd Perkerasan Alternatif Berdasarkan <i>Output</i> KENPAVE	117
Tabel 5.24 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Jalan	118

Tabel 5.25 Perbandingan Hasil Regangan Berdasarkan WinJULEA dan KENPAVE untuk Perkerasan <i>Existing</i>	122
Tabel 5.26 Perbandingan Hasil Regangan Berdasarkan WinJULEA dan KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 1	123
Tabel 5.27 Perbandingan Hasil Regangan Berdasarkan WinJULEA dan KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 2	123

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Tampilan Awal Aplikasi WinJULEA	32
Gambar 3.2 Tampilan Utama Aplikasi KENPAVE	40
Gambar 3.3 Tampilan Awal LAYERINP	43
Gambar 3.4 Tampilan Awal <i>Menu General</i>	43
Gambar 3.5 Tampilan Awal <i>Menu Zcoord</i>	45
Gambar 3.6 Tampilan Awal <i>Menu Layer</i>	46
Gambar 3.7 Tampilan Awal <i>Menu Interface</i>	46
Gambar 3.8 Tampilan Awal <i>Menu Moduli</i>	47
Gambar 3.9 Tampilan Awal <i>Menu Load</i>	47
Gambar 4.1 Lokasi Penelitian	48
Gambar 4.2 Diagram Alir Penelitian	51
Gambar 5.1 Tebal Lapisan Perkerasan <i>Existing</i>	57
Gambar 5.2 Konfigurasi Beban Sumbu Standar	77
Gambar 5.3 <i>Plan View of Multiple Wheels</i>	78
Gambar 5.4 Titik Tinjauan Berdasarkan Konfigurasi Beban Sumbu Standar	79
Gambar 5.5 Data <i>Input</i> WinJULEA untuk Perkerasan <i>Existing</i>	79
Gambar 5.6 Tampilan Menu General	88
Gambar 5.7 Tampilan <i>Menu Zcoord</i>	90
Gambar 5.8 Tampilan <i>Menu Layer</i>	90
Gambar 5.9 Tampilan <i>Menu Moduli</i>	91
Gambar 5.10 Tampilan <i>Menu Load</i>	92
Gambar 5.11 Tampilan Menu untuk Memasukkan Titik Evaluasi	93
Gambar 5.12 Tampilan Menjalankan Proses Simulasi KENLAYER	93
Gambar 5.13 Grafik Pemodelan pada Aplikasi KENPAVE	94
Gambar 5.14 Tebal Lapisan Perkerasan Alternatif	101
Gambar 5.15 Data <i>Input</i> WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 1	104
Gambar 5.16 Data <i>Input</i> WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 2	105

Gambar 5.17 Grafik Perbandingan WinJULEA dan KENPAVE pada Perkerasan <i>Existing</i>	124
Gambar 5.18 Grafik Perbandingan WinJULEA dan KENPAVE pada Perkerasan Alternatif 1	125
Gambar 5.19 Grafik Perbandingan WinJULEA dan KENPAVE pada Perkerasan Alternatif 2	126

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Output</i> WinJULEA untuk Perkerasan <i>Existing</i>	145
Lampiran 2 <i>Output</i> WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 1	149
Lampiran 3 <i>Output</i> WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 2	154
Lampiran 4 <i>Output</i> KENPAVE untuk Perkerasan <i>Existing</i>	159
Lampiran 5 <i>Output</i> KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 1	162
Lampiran 6 <i>Output</i> KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 2	168

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	= Luas area kontak
CR	= <i>Contact radius</i>
DD	= Faktor distribusi arah
DL	= Faktor distribusi lajur
E	= Modulus elastisitas young
i	= Faktor laju pertumbuhan lalu lintas tahunan
K	= Faktor jam desain
Nd	= Jumlah repetisi beban lalu lintas sampai timbul kerusakan <i>permanent deformation</i>
Nf	= Jumlah repetisi beban lalu lintas sampai timbul kerusakan retak Lelah (<i>fatigue cracking</i>)
Nr	= Jumlah repetisi beban lalu lintas sampai timbul kerusakan <i>rutting</i>
p	= Tekanan ban
R	= Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif
t	= Selisih tahun
UR	= Umur rencana
W	= Beban roda
ϵ_t	= Regangan tarik horizontal
ϵ_v	= Regangan tekan vertikal
ν	= <i>Poisson's ratio</i>
σ	= Tegangan
2/2-TT	= Tipe jalan 2 lajur 2 arah Tak Terbagi
AASHTO	= American Association of State Highway and Transportation Officials
AC-BC	= <i>Asphalt Concrete-Binder Course</i>
AC-WC	= <i>Asphalt Concrete-Wearing Course</i>
Austroads	= Association of Australian and New Zealand Road Transport and Traffic Authorities
BOK	= Biaya Operasional Kendaraan

CESA	= <i>Cumulative Equivalent Standard Axle</i>
CESAL	= <i>Cumulative Equivalent Standard Axle Load</i>
CESAL4	= <i>Cumulative Equivalent Standard Axle Load Pangkat 4</i>
CESAL5	= <i>Cumulative Equivalent Standard Axle Load Pangkat 5</i>
CTB	= <i>Cement Treated Based</i>
ESA	= <i>Equivalent Standard Axle</i>
ESAL	= <i>Equivalent Single Axle Load</i>
KENPAVE	= Kentucky Flexible Pavement Design System
LHR	= Lalu Lintas Harian Rata-rata
LHRT	= Lalu Lintas Harian Rata-rata Tahunan
LPA	= Lapisan Pondasi Agregat
MDPJ	= Manual Desain Perkerasan Jalan
MEPDG	= Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
PCASE	= Pavement–Transportation Computer Assisted Structural Engineering
PCI	= <i>Pavement Condition Index</i>
PKJI	= Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia
PUPESDM	= Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral
SADT	= <i>Single Axle Dual Tier</i>
SAL	= <i>Standard Axle Load</i>
SDI	= <i>Surface Distress Index</i>
SI	= <i>Standard International</i>
SKh	= Spesifikasi Khusus
VDF	= <i>Vehicle Damage Factor</i>
WIM	= <i>Weigh-In-Motion</i>
WinJULEA	= Jacob Uzan Layered Elastic Analysis

ABSTRAK

Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 merupakan jalur utama menuju kawasan wisata Kaliurang yang mengalami peningkatan volume lalu lintas yang signifikan. Peningkatan ini mempengaruhi kondisi perkerasan jalan, menyebabkan potensi kerusakan seperti *fatigue cracking*, *rutting*, dan deformasi permanen. Evaluasi kinerja perkerasan jalan diperlukan untuk menjaga kualitas infrastruktur dan keselamatan pengguna jalan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja perkerasan pada ruas tersebut menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE serta membandingkan kondisi perkerasan *existing* dengan desain alternatif perkerasan yang lebih optimal.

Penelitian ini menggunakan pendekatan mekanistik-elastis dengan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE untuk menganalisis distribusi tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan. Metode yang digunakan mengacu pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024, dengan fokus pada perhitungan *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL). Data yang digunakan meliputi ketebalan lapisan perkerasan, sifat material, dan data lalu lintas yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PUPESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perkerasan *existing* memiliki umur layanan yang rendah, dengan prediksi kerusakan akibat *fatigue cracking* sebesar 34 tahun, *rutting* 3 tahun, dan deformasi permanen 1 tahun. Sebaliknya, desain alternatif perkerasan yang menggunakan material dan ketebalan lapisan yang lebih baik menunjukkan peningkatan signifikan, dengan umur pelayanan untuk *fatigue cracking* mencapai 122 tahun, *rutting* 21 tahun, dan deformasi permanen 51 tahun. Penelitian ini merekomendasikan penerapan desain alternatif 1 untuk meningkatkan ketahanan dan memperpanjang umur pelayanan jalan di Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem.

Kata Kunci: MDPJ 2024, WinJULEA, KENPAVE, kinerja perkerasan, umur pelayanan.

ABSTRACT

The Yogyakarta–Pakem Road, KM 14.5 – 16, serves as a primary route leading to the Kaliurang tourist area, which has experienced a significant increase in traffic volume. This increase has affected the road's pavement condition, leading to potential damage such as fatigue cracking, rutting, and permanent deformation. Pavement performance evaluation is necessary to maintain infrastructure quality and ensure the safety of road users. This study aims to evaluate the pavement performance on this section using WinJULEA and KENPAVE applications and to compare the existing pavement condition with an alternative design for improved pavement.

This research uses a mechanistic-elastic approach with WinJULEA and KENPAVE applications to analyze the distribution of stress and strain in the pavement layers. The method follows the 2024 Pavement Design Manual (MDPJ), focusing on the calculation of Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESAL). The data used include pavement layer thickness, material properties, and traffic data obtained from the Public Works, Housing, and Energy Resources Agency (PUPESDM) of the Special Region of Yogyakarta.

The analysis results show that the existing pavement has a short service life, with predicted damage due to fatigue cracking of 34 years, rutting of 3 years, and permanent deformation of 1 year. In contrast, the alternative pavement design, which uses better materials and increased layer thickness, shows significant improvements, with service life predictions for fatigue cracking reaching 122 years, rutting 21 years, and permanent deformation 51 years. This study recommends the implementation of alternative design 1 to enhance durability and extend the service life of the pavement on the Yogyakarta–Pakem Road.

Keywords: MDPJ 2024, WinJULEA, KENPAVE, pavement performance, service life.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pariwisata merupakan salah satu sektor penting dalam pembangunan sebuah wilayah, termasuk di Kabupaten Sleman. Berdasarkan data Dinas Pariwisata Kabupaten Sleman (2024), jumlah kunjungan wisatawan pada tahun 2023 meningkat sebesar 10,14% untuk wisatawan nusantara dan 174,94% untuk wisatawan mancanegara dibandingkan tahun 2022. Peningkatan jumlah kunjungan wisatawan tersebut berdampak pada meningkatnya arus lalu lintas pada jalan-jalan utama menuju kawasan wisata. Salah satu akses utama menuju kawasan wisata adalah Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem (Jalan Kaliurang), yang berfungsi sebagai jalan kolektor primer. Jalur ini tidak hanya menjadi penghubung antarwilayah tetapi juga merupakan jalur vital menuju kawasan wisata Kaliurang dan sekitarnya yang memiliki intensitas kunjungan tinggi.

Sebagai destinasi wisata unggulan di Sleman, kawasan Kaliurang tidak hanya dikenal karena panorama alamnya, tetapi juga karena aktivitas ekonomi masyarakat di sepanjang jalur menuju kawasan wisata tersebut. Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem menjadi tulang punggung pergerakan wisatawan dan pelaku usaha lokal yang menjual produk oleh-oleh serta kuliner khas daerah. Kondisi ini menjadikan jalur tersebut memiliki tingkat aktivitas yang padat, khususnya pada akhir pekan dan masa libur panjang. Lonjakan kendaraan pribadi, bus pariwisata, dan kendaraan logistik pariwisata memberikan tekanan tambahan pada lapisan perkerasan jalan, terutama di beberapa segmen yang menanjak dan berbelok.

Berdasarkan data dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PUPESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta, menunjukkan bahwa Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) pada Ruas Jalan Kaliurang meningkat dari 82,383 kendaraan/hari pada tahun 2022 menjadi 149,643 kendaraan/hari pada tahun 2023. Kenaikan jumlah kendaraan ini akan mempengaruhi kondisi aspal (Ariyanto, dkk., 2021). Kenaikan tersebut pun menggambarkan adanya lonjakan

beban lalu lintas yang signifikan terhadap struktur perkerasan jalan, sehingga menimbulkan tekanan berulang pada lapisan perkerasan yang akan mengakibatkan timbul kerusakan berupa retak buaya, alur (*rutting*), lendutan berlebih, serta lubang (*potholes*), yang menurunkan tingkat kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan.

Kerusakan perkerasan jalan tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga pada aspek ekonomi dan sosial. Kerusakan jalan meningkatkan biaya operasional kendaraan (BOK), memperpanjang waktu tempuh, menurunkan efisiensi distribusi barang dan jasa, serta berpotensi menghambat pertumbuhan ekonomi lokal, khususnya sektor pariwisata di kawasan Kaliurang. Oleh karena itu, evaluasi kinerja perkerasan menjadi langkah penting untuk mendukung keberlanjutan infrastruktur transportasi (Kurniawan dan Hadi, 2024).

Evaluasi kinerja perkerasan dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan. Penelitian terdahulu umumnya menggunakan metode pendekatan visual dan/atau empiris, seperti pada penelitian Aptarila, dkk. (2020) dengan menggunakan metode *Surface Distress Index* (SDI) untuk menilai kondisi kerusakan jalan, sementara Budiarnaya, dkk. (2021) menerapkan metode *Pavement Condition Index* (PCI) dengan pemberian skor kondisi jalan (0-100). Metode-metode tersebut lebih menekankan pada survei visual kondisi permukaan jalan sehingga terbatas dalam memberikan gambaran struktural perkerasan. Menurut Huang (1993), metode survei visual bersifat deskriptif, artinya hanya mencatat kerusakan yang tampak di permukaan tanpa menganalisis respons lapisan perkerasan terhadap beban lalu lintas.

Sebagai perkembangan terbaru, Direktorat Jenderal Bina Marga melalui Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 memperkenalkan pendekatan mekanistik-empiris. Metode ini tidak hanya mempertimbangkan kondisi visual, tetapi juga mengintegrasikan beban lalu lintas (CESAL), umur rencana, serta daya dukung tanah dasar untuk mengevaluasi dan merencanakan ketebalan perkerasan. Sugema dan Maulana (2024) menekankan bahwa penerapan MDPJ 2024 sebagai standar nasional menjadi penting untuk menghasilkan perhitungan yang lebih akurat dan sesuai kondisi aktual jalan di Indonesia. Dengan demikian, MDPJ 2024 memberikan keunggulan dibanding metode visual murni seperti SDI dan PCI.

Selain itu, aplikasi berbasis mekanistik-elastis seperti WinJULEA dan KENPAVE memungkinkan analisis struktural yang lebih mendalam. WinJULEA merupakan aplikasi yang dikembangkan di Amerika Serikat untuk menganalisis lapisan perkerasan lentur menggunakan *multi-layer elastic theory*. Perangkat ini dapat menghitung nilai tegangan, regangan serta defleksi yang diakibatkan oleh beban kendaraan (Putri, dkk., 2022). Analisis perkerasan menggunakan aplikasi WinJULEA telah digunakan dalam beberapa penelitian sebelumnya seperti Rojas dan Sandoval (2020), Alaye, dkk. (2023) serta Hernandez, dkk. (2024) dengan hasil yang menunjukkan bahwa WinJULEA dapat memprediksi jenis kerusakan seperti *fatigue cracking* dan *rutting*. Sementara itu, aplikasi KENPAVE dikembangkan oleh Prof. Dr. Yang H. Huang, P. E. juga berbasis teori elastisitas berlapis dan memiliki dua modul utama: KENLAYER untuk perkerasan lentur dan KENSLAB untuk perkerasan kaku. Hasil analisis yang diperoleh dari aplikasi KENPAVE merupakan nilai regangan dan tegangan desain yang telah banyak dilakukan dan sudah tervalidasi oleh beberapa peneliti sebelumnya seperti Rahmawati, dkk. (2021), Hadi (2023), Priambudi (2024). Analisis menggunakan aplikasi ini dilakukan sebagai upaya melakukan pendekatan agar mendapatkan respons struktur jalan terhadap beban lalu lintas. Analisis ini sangat penting dalam memprediksi jenis dan tingkat kerusakan.

Dengan adanya beragam metode tersebut, tampak bahwa masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan. Metode visual relatif sederhana namun tidak komprehensif, Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024 lebih sesuai standar nasional namun masih bersifat mekanistik-empiris, sedangkan WinJULEA dan KENPAVE mampu memberikan analisis struktural yang detail namun membutuhkan data teknis yang lengkap. Hingga saat ini, sebagian besar penelitian di Indonesia masih berfokus pada penggunaan metode visual atau hanya satu aplikasi mekanistik-elastis saja.

Pada saat ini, belum ditemukannya penelitian yang secara langsung melakukan analisis evaluasi perkerasan dengan menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024, WinJULEA, dan KENPAVE sekaligus. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan dalam pendekatan

karena mengombinasikan standar nasional dengan dua aplikasi mekanistik-elastis. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kondisi perkerasan, baik dari sisi regulasi nasional maupun analisis struktural.

Segmen KM 14,5 – 16 pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem dipilih sebagai lokasi penelitian karena area tersebut merupakan jalur utama yang paling sering dilalui wisatawan menuju kawasan wisata Kaliurang. Pada segmen ini juga terdapat pusat oleh-oleh dan titik pemberhentian kendaraan wisatawan, sehingga aktivitas lalu lintasnya tinggi dan terjadi perlambatan kendaraan pada waktu-waktu tertentu. Berdasarkan hasil observasi lapangan, ditemukan beberapa kerusakan perkerasan seperti retak halus dan lubang kecil di beberapa titik, yang mengindikasikan penurunan kinerja struktural akibat beban lalu lintas berulang serta kontur jalan yang menanjak. Dengan karakteristik tersebut, segmen KM 14,5 – 16 dinilai representatif untuk dijadikan lokasi analisis karena dapat menggambarkan pengaruh peningkatan aktivitas pariwisata terhadap kinerja perkerasan jalan.

Penelitian ini memiliki kepentingan yang signifikan dalam konteks pengelolaan infrastruktur jalan, terutama di daerah yang mengalami peningkatan kunjungan wisata. Evaluasi kinerja perkerasan jalan menjadi penting untuk memastikan keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan serta menjaga kualitas infrastruktur. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja perkerasan jalan di ruas Jalan Kaliurang, khususnya pada segmen KM 14,5 – 16, guna mengidentifikasi kerusakan yang terjadi akibat peningkatan lalu lintas. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan berbagai metode evaluasi, termasuk Metode Bina Marga dan aplikasi WinJULEA serta KENPAVE, untuk mendapatkan hasil yang akurat dan komprehensif mengenai kondisi perkerasan jalan sehingga dapat meningkatkan kualitas dan daya tahan perkerasan jalan.

Manfaat dari penelitian ini pun memberikan informasi yang berguna bagi pemangku kebijakan dan instansi terkait dalam pengambilan keputusan mengenai perawatan dan pengembangan infrastruktur jalan di daerah wisata. Selain itu, penelitian ini dapat berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik sipil, khususnya dalam evaluasi kinerja perkerasan jalan dan penggunaan

teknologi dalam analisis infrastruktur. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengelolaan infrastruktur jalan serta mendukung pengembangan pariwisata yang berkelanjutan di Kabupaten Sleman.

Dengan demikian, penelitian mengenai evaluasi kinerja perkerasan pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem menjadi sangat penting mengingat perannya sebagai jalur strategis menuju kawasan wisata dengan volume lalu lintas yang tinggi. Pendekatan yang mengintegrasikan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024, WinJULEA, dan KENPAVE diharapkan dapat menghasilkan informasi yang komprehensif serta memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan ilmu teknik sipil. Selain itu, hasil penelitian juga akan memberikan masukan praktis bagi instansi terkait dalam menyusun strategi pemeliharaan yang efektif, efisien, dan berkelanjutan demi mendukung kelancaran aksesibilitas serta pertumbuhan sektor pariwisata di Kabupaten Sleman. Penelitian ini juga berpotensi memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai kondisi aktual infrastruktur jalan di kawasan wisata yang padat aktivitas. Dengan adanya hasil kajian ini, diharapkan perencanaan dan pemeliharaan jalan di masa mendatang dapat dilakukan secara lebih terarah dan berkesinambungan sesuai kebutuhan wilayah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pemaparan pada latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja struktural perkerasan lentur di Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024, aplikasi WinJULEA dan aplikasi KENPAVE?
2. Bagaimana perbandingan nilai kondisi jalan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024, aplikasi WinJULEA dan aplikasi KENPAVE?
3. Bagaimana upaya penanganan perbaikan dan pemeliharaan yang dapat disarankan berdasarkan hasil evaluasi kondisi jalan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024, aplikasi WinJULEA dan aplikasi KENPAVE?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang diperoleh dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kondisi struktural perkerasan lentur *existing* pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 berdasarkan data ketebalan dan lalu lintas aktual dengan bantuan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE.
2. Menentukan prediksi umur pelayanan perkerasan *existing* berdasarkan hasil analisis mekanistik-elastis dari aplikasi WinJULEA dan KENPAVE.
3. Merancang alternatif ketebalan perkerasan baru menggunakan metode MDPJ Bina Marga 2024 agar dapat mencapai umur pelayanan minimal 20 tahun sesuai standar perencanaan nasional.
4. Menganalisis kembali alternatif desain perkerasan menggunakan WinJULEA dan KENPAVE untuk memperoleh nilai umur pelayanan baru serta membandingkannya dengan kondisi *existing*.
5. Memberikan rekomendasi teknis terkait peningkatan ketebalan atau perbaikan struktur perkerasan agar umur pelayanan jalan lebih optimal dan sesuai standar perencanaan.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi dan alternatif metode dalam melakukan evaluasi perkerasan jalan.
2. Memberikan wawasan dan informasi terbaru mengenai metode analisis perkerasan menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024.
3. Mengidentifikasi nilai kondisi dan tingkat kelayakan perkerasan lentur berdasarkan Tingkat dan kondisi kerusakan yang terjadi pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16.
4. Penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi bagi pembaca dan penelitian selanjutnya mengenai perencanaan dan pemeliharaan jalan.

5. Memberikan masukan atau saran kepada perencana atau instansi terkait dalam pengambilan keputusan dalam pengelolaan, perbaikan dan pemeliharaan kondisi jalan.

1.5 Batasan Masalah

Dalam pelaksanaan penelitian ini, diberikan batasan masalah agar penelitian dapat terfokus. Batasan masalah tersebut diantaranya sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian terbatas pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 dengan jenis perkerasan yang dianalisis adalah perkerasan lentur.
2. Metode dalam penilaian kondisi kerusakan jalan yang digunakan dalam penelitian ini ialah Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024, analisis menggunakan aplikasi WinJULEA dan aplikasi KENPAVE.
3. Penggunaan Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i) mengacu pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2024, bukan data lapangan. Pemilihan ini dilakukan untuk menjaga keseragaman dengan pedoman yang ada, meskipun data lapangan dapat memberikan hasil yang lebih spesifik. Nilai i dari Bina Marga 2024 dianggap cukup representatif untuk analisis perencanaan jangka panjang.
4. Data primer dan data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan melalui survei lapangan serta data Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan dan Energi Sumber Daya mineral daerah Istimewa Yogyakarta (DPUPESDM).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan Metode Bina Marga 2024

Kinerja perkerasan merupakan fungsi dari kemampuan relatif dari perkerasan untuk melayani lalu lintas dalam suatu periode tertentu (Highway Research Board, 1962). Kinerja perkerasan jalan dapat mengalami penurunan yang diakibatkan oleh beberapa faktor di antaranya beban kendaraan yang melintas (Hadi dan Fauziah, 2022). Evaluasi kinerja perkerasan jalan memberikan informasi mengenai besarnya penurunan fungsi jalan. Oleh karena itu, evaluasi kinerja perkerasan menjadi hal penting sebagai upaya preservasi dan pemeliharaan perkerasan jalan (Pasiak, dkk., 2020). Hasil dari evaluasi kinerja perkerasan jalan dapat menjadi dasar untuk menentukan pemilihan teknik dalam melakukan pemeliharaan atau rehabilitasi agar jalan tetap dapat melayani lalu lintas secara optimal dalam periode yang direncanakan.

Evaluasi kinerja perkerasan jalan dapat dilakukan dengan beberapa metode salah satunya yaitu metode Bina Marga. Metode Bina Marga merupakan metode dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jalan dengan menggunakan pendekatan mekanistik-empiris, yang artinya metode ini dilakukan berdasarkan pendekatan karakteristik material dan kaidah teoritis. Metode Bina Marga dikeluarkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR, di mana metode ini sudah mengalami pembaruan sejak edisi pertama pada tahun 2013 dan saat ini menjadi Metode Bina Marga Tahun 2024 yang merupakan pembaruan dari Metode Bina Marga Tahun 2017.

Metode Bina Marga 2024 sejak diterbitkan pada tanggal 14 Mei 2024 ini sudah mulai banyak digunakan sebagai bahan penelitian, seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Hadi (2024). penelitian ini menggunakan data sekunder pada Ruas Jalan Prambanan–Piyungan tahun 2023 yang didapatkan dari Dinas PUPESDM Provinsi D.I. Yogyakarta berupa volume lalu lintas, jenis kendaraan dan beban lalu lintas. Pada penelitian ini desain lebih berfokus pada bagan desain

dengan penggunaan CTB dan aspal Pen 60/70. Selain menggunakan Metode Bina Marga 2017 dan 2024, penelitian ini pun melakukan analisis dengan menggunakan aplikasi KENPAVE, yang dimulai dengan menentukan properti material perkerasan, ketebalan lapisan, nilai modulus elastisitas, dan *poisson's ratio* untuk setiap lapisan berdasarkan data yang terdapat pada MDPJ 2017 dan/atau MDPJ 2024. Setelah itu dilakukan juga penentuan nilai ESAL (*equivalent standard axle load*) dan beban sumbu yang dihitung menggunakan analisis MDPJ 2017 dan MDPJ 2024. Keseluruhan data tersebut dimasukkan ke dalam aplikasi KENPAVE dan diperoleh hasil dengan menunjukkan perbedaan nilai akhir ESA 5 dengan Metode MDPJ 2017 dan MDPJ 2024 sebesar 38,14%. Selain itu, hasil analisis penelitian ini memperlihatkan perbedaan antara MDPJ 2017 dan MDPJ 2024, yaitu nilai VDF dan nilai ketebalan. Dari hasil penelitian dijelaskan bahwa MDPJ 2024 memberikan hasil kinerja yang lebih unggul dibandingkan dengan MDPJ 2017, di mana perbedaan ini dapat terlihat dengan presentasi selisih nilai prediksi kerentanan kerusakan sebesar 5,5%.

Penelitian menggunakan Metode Bina Marga pun dilakukan oleh Yanti (2024). Penelitian ini bertujuan untuk mencari metode paling tepat sebagai upaya keberhasilan suatu proyek dalam memenuhi persyaratan teknis dan mendapatkan biaya yang ekonomis. Dalam penelitian ini digunakan data primer berupa kondisi saat ini pada proyek dan data sekunder berupa data LHR, data tanah, data curah hujan, data pertumbuhan lalu lintas yang selanjutnya dianalisis menggunakan Metode Bina Marga 2024 serta Metode AASHTO 1993. Dalam penelitian ini tidak hanya mendapatkan ketebalan lapisan perkerasan kaku yang dibutuhkan, tetapi peneliti memberikan perhitungan rincian anggaran (RAB) untuk pelaksanaan dengan ketebalan lapisan perkerasan kaku hasil analisis. Dari hasil analisis menggunakan Metode Bina Marga 2024 didapatkan tebal lapis perkerasan kaku dengan umur rencana 40 tahun sebesar 300 mm dengan fondasi bawah berupa beton kurus (*lean mix concrete*) setebal 150 mm dan lapis drainase setebal 150 mm serta biaya perencanaan pekerjaan perkerasan dan drainase sebesar Rp1.522.561.485.000,-. Sementara itu, hasil dari analisis Metode AASHTO 1993 menunjukkan tebal lapisan perkerasan kaku dengan umur rencana 40 tahun sebesar

340 mm dengan fondasi bawah berupa beton kurus (*lean mix concrete*) setebal 150 mm dan lapis drainase setebal 150 mm serta biaya perencanaan pekerjaan perkerasan dan drainase sebesar Rp1.657.881.500.000,-. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan adanya selisih tebal lapis perkerasan kaku antara Metode Bina Marga 2024 dan Metode AASHTO 1993 sebesar 40 mm serta selisih anggaran sebesar Rp135.320.015.803,-. Sehingga peneliti menyimpulkan bahwa Metode Bina Marga 2024 memiliki harga yang lebih ekonomis sebesar 8,89%.

Farhan, dkk. (2025) melakukan penelitian yang bertujuan untuk perancangan ulang terhadap struktur perkerasan kaku pada Ruas Jalan Yogyakarta–Bakulan sepanjang 5 kilometer yang menunjukkan tingkat kerusakan yang signifikan dengan prediksi sisa umur rata-rata berkisar 0 sampai 0,4 tahun. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan beban kendaraan dan konfigurasi sumbu sebagai evaluasi kelelahan (*fatigue*) dan erosi yang terjadi. Dari hasil penelitian ditunjukkan bahwa ketebalan pelat beton yang diperlukan adalah 280 mm, beton kurus setebal 150 mm dan lapisan fondasi kelas A setebal 200 mm. Desain tersebut dirancang untuk memenuhi kebutuhan kekuatan struktur dalam menahan beban lalu lintas aktual.

2.2 Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan Aplikasi WinJULEA

Dalam pengembangan suatu penelitian, sering kali diperlukan dukungan dari aplikasi tambahan untuk membantu pengelolaan hasil yang diperoleh. Penelitian ini memanfaatkan aplikasi WinJULEA, yang hingga saat ini belum banyak digunakan secara luas di Indonesia sebagai alat analisis dalam penelitian.

Dalam studi yang dilakukan oleh Putri, dkk. (2022), peneliti menggunakan WinJULEA, KENPAVE serta Circly 6.0 untuk menganalisis nilai lendutan, tegangan, dan regangan pada setiap lapisan perkerasan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa total *equivalent standard axle load* (ESAL) meningkat ketika kendaraan berat melintas di atas lapisan perkerasan. Jenis perkerasan yang diteliti mencakup perkerasan lentur, perkerasan kaku, dan perkerasan pra-cetak StormPav. Dari ketiga jenis perkerasan tersebut, perkerasan pra-cetak StormPav dianggap sebagai alternatif yang baik untuk digunakan pada jalan, karena proses

konstruksinya yang lebih cepat serta memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap kerusakan akibat beban berat.

Selanjutnya, Lu dan Hajj (2021) menyatakan bahwa penambalan pada perkerasan lentur merupakan metode yang sangat penting dalam pemeliharaan jalan. Meskipun penelitian mengenai permodelan telah banyak dilakukan, penerapannya dalam konteks pemeliharaan jalan guna meningkatkan keselamatan, kenyamanan berkendara, serta umur layanan perkerasan masih belum optimal. Penelitian tersebut bertujuan untuk memodelkan sifat viskoelastis dari perkerasan dan bahan penambal guna mengetahui pengaruh berbagai faktor perbaikan terhadap kinerja perkerasan lentur. Hasil pemodelan dengan aplikasi WinJULEA menunjukkan adanya perbedaan signifikan dalam nilai regangan antara bagian yang ditambal dan yang tidak ditambal. Temuan ini menegaskan pentingnya melakukan penambalan pada kerusakan perkerasan jalan untuk melindungi struktur maupun permukaan jalan dari kerusakan yang lebih serius.

2.3 Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan Aplikasi KENPAVE

Aplikasi KENPAVE adalah aplikasi yang dikembangkan oleh Prof. Dr. Yang H. Huang, P.E., yang menghasilkan analisis nilai regangan dan tegangan dari desain perkerasan. Hasil ini kemudian digunakan untuk memprediksi kerusakan seperti *fatigue cracking*, *rutting*, dan deformasi permanen selama masa pakai perkerasan (Hadi dan Fauziah, 2022). KENPAVE mampu menganalisis kerusakan pada permukaan jalan dan dapat digunakan hingga sembilan belas lapisan dengan berbagai kondisi muatan (Rind, dkk., 2019). Aplikasi ini terdiri dari dua bagian: KENSLAB untuk analisis perkerasan kaku dan KENLAYER untuk analisis perkerasan lentur (Marlina, dkk., 2023). Untuk menjalankan KENPAVE, diperlukan data mengenai material dan karakteristik perkerasan jalan, termasuk titik koordinat, *poisson's ratio* untuk setiap lapisan, ketebalan lapisan, modulus elastisitas, beban roda, dan tekanan ban.

Lia dan Mahardi (2022) melakukan evaluasi terhadap kinerja struktur perkerasan jalan lentur dengan menggunakan aplikasi KENPAVE. Dari hasil evaluasi, ditemukan bahwa struktur perkerasan yang menggunakan metode

AASHTO 1993 dan Bina Marga 2017 mengalami kerusakan berupa *fatigue cracking*. Di sisi lain, metode analisis komponen tidak menunjukkan adanya *fatigue cracking* selama masa rencana. Struktur perkerasan yang menggunakan metode AASHTO 1993 dan analisis komponen tidak mengalami *rutting*, sedangkan metode Bina Marga Tahun 2017 mengalami kerusakan tersebut. Semua metode perhitungan menunjukkan bahwa tidak ada deformasi permanen yang terjadi selama masa rencana.

Penelitian lain oleh Sasongko, dkk., (2021) mengeksplorasi alternatif perencanaan ketebalan perkerasan lentur dengan menggunakan aplikasi KENPAVE di Ruas Jalan Karangates–Jatikerto. Penelitian ini menerapkan metode Bina Marga tahun 2013 untuk fondasi atas dan bawah, serta pedoman PD-T-05-2005-B untuk menentukan lapisan permukaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perhitungan lama beban untuk masa rencana 20 tahun mencapai 38.157.248,61 ESAL, dengan ketebalan lapisan yang bervariasi. Segmen 1, 2, 3, 6, dan 7 tidak mampu menahan beban lalu lintas, sedangkan segmen 4, 5, 8, 9, dan 10 dapat menahan beban tersebut. Segmen yang tidak dapat menahan beban lalu lintas kemudian dianalisis lebih lanjut menggunakan KENPAVE, sehingga ketebalan lapisan pada segmen 1, 2, 3, 6, dan 7 ditingkatkan menjadi 50 cm.

Hadi (2023) melakukan identifikasi terhadap kerentanan kinerja perkerasan jalan akibat aktivitas *overload* kendaraan dengan studi kasus di ruas jalan batas Kabupaten Kampar–batas Kota Bangkinang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kendaraan yang *overload* dapat meningkatkan nilai CESA, yang berimplikasi pada penurunan umur perkerasan antara 40% hingga 100%. Rencana umur pakai perkerasan yang seharusnya 10 tahun diperkirakan akan mengalami penurunan sebesar 13,87% hingga 57,62%. Perbedaan dalam penelitian ini terletak pada metode perhitungan yang digunakan serta penerapan aplikasi KENPAVE untuk menghitung ketebalan lapisan perkerasan dan memperkirakan kerusakan.

2.4 Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu

Pada penelitian ini terdapat beberapa perbedaan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini

	Penelitian Terdahulu								Penelitian Saat Ini
Nama Peneliti	Lu dan Hajj	Lia dan Mahardi	Putri, dkk.	Roja, dkk.	Hadi	Hadi	Yanti	Farhan, dkk.	Prabowo
Tahun	2021	2022	2022	2023	2023	2024	2024	2025	2025
Judul Penelitian	Investigasi faktor perbaikan pemeliharaan perkerasan lentur menggunakan model elemen hingga	Evaluasi Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Aplikasi KENPAVE	Perkerasan Stormpav Menggunakan Beban Roda Yang Berbeda	Analisis Kinerja Perkerasan Aspal Di Qatar Menggunakan Pendekatan Mekanistik-Empiris	Identifikasi Kerentanan Kinerja Perkerasan Jalan Terhadap Aktivitas <i>Overload</i> Kendaraan Menggunakan Program KENPAVE	Eksplorasi Dampak Perubahan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017 Ke 2024 Menggunakan Program KENPAVE	Analisis Perbandingan Tebal Perkerasan Kaku Menggunakan Metode Bina Marga 2024 dan Metode AASHTO 1993 (Studi Kasus : Proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 1 STA 3+881–9+000)	Perancangan Tebal Perkerasan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 Studi Kasus Jalan Yogyakarta–Bakulan	Verifikasi Evaluasi Kinerja Perkerasan Lentur Pada Ruas Jalan Yogyakarta-Pakem Menggunakan Program WinJULEA dan KENPAVE
Lokasi Penelitian		Jalan Lintas Selatan Lot 6 Tulungagung	Jalan Raya Pan Borneo	Qatar	Ruas jalan batas Kabupaten Kampar–Batas Kota Bangkinang	Prambanan–Piyungan, Yogyakarta	Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 1 STA 3+881–9+000	Jalan Yogyakarta–Bakulan	Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5–16, Yogyakarta
Metode Penelitian	Pemodelan Menggunakan Aplikasi WinJULEA	Metode AASHTO 1993, MDPJ 2017 dan Aplikasi KENPAVE	Aplikasi WinJULEA dan Aplikasi KENPAVE	Aplikasi WinJULEA, Aplikasi CIRCLY, dan AASHTO	Aplikasi KENPAVE	MDPJ 2017, MDPJ 2024 dan Aplikasi KENPAVE	MDPJ 2024, dan AASHTO 1993	MDPJ 2024	MDPJ 2024, Aplikasi WinJULEA dan Aplikasi KENPAVE

Sumber : Lu dan Hajj (2021), Lia dan Mahardi (2022), Putri, dkk.(2022), Roja, dkk., (2023), Hadi (2023), Hadi (2024), Yanti (2024), Farhan, dkk., (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini

<div> <div></div> <div></div> </div>	Penelitian Terdahulu								Penelitian Saat Ini
	Nama Peneliti	Lu dan Hajj	Lia dan Mahardi	Putri, dkk.	Roja, dkk.	Hadi	Hadi	Yanti	Farhan, dkk.
Tahun	2021	2022	2022	2023	2023	2024	2024	2024	2025
Hasil Penelitian	Didapatkan hasilnya yaitu menunjukkan pentingnya penambalan menggunakan metode semi-permanen. Nilai regangan yang besar antara bagian yang ditambal dan bagian yang tidak ditambal, hal ini menunjukkan bahwa pentingnya menambal cacat pada perkerasan jalan untuk melindungi struktur dan permukaan perkerasan dari kerusakan yang lebih parah.	Metode ASSHTO 1993 dan Bina Marga 2017 mengalami retak lelah, Metode Analisa Komponen tidak mengalami retak lelah selama umur rencana. Metode ASSHTO 1993 dan metode Analisa Komponen tidak terjadi retak alur, sedangkan metode Bina Marga 2017 menunjukkan retak alur. Ketiga metode tidak terlihat ada deformasi permanen pada struktur jalan.	Didapatkan hasil yaitu total ESAL akan meningkat ketika terdapat kendaraan berat yang berada di atas lapisan perkerasan. Perkerasan StormPav merupakan alternatif yang Layak digunakan untuk perkerasan jalan, hal ini dikarenakan waktu yang lebih singkat dalam proses konstruksi dan tidak terjadi banyak kerusakan ketika memiliki beban yang lebih berat	Lapisan kaku lebih rentan retak saat aspal di bawahnya memiliki kekakuan yang jauh lebih rendah. Aspal campuran <i>Crumb Rubber</i> (CR) dapat mengurangi biaya material. Penggunaan campuran EME (<i>Enrobés à Module Elevé</i>) di lalu lintas padat akan lebih baik karena mengurangi ketebalan lapisan dan biaya. Ambang batas alur yang digunakan dalam MEPD terlalu ketat untuk iklim Qatar.	<i>Overload</i> kendaraan menyebabkan meningkatnya nilai CESA. Penurunan kinerja perkerasan dan memendeknya umur layan jalan akan terjadi jika aktivitas <i>overload</i> hingga 40%-100% pada jalan tersebut.	Hasil analisis penelitian ini menunjukkan perbedaan antara MDPJ 2017 dan MDPJ 2024 yaitu nilai VDF, dan nilai ketebalan. MDPJ 2024 memberikan hasil kinerja yang lebih unggul dibandingkan dengan MDPJ 2017, dimana perbedaan ini dapat terlihat dengan presentasi selisih nilai prediksi kerentanan kerusakan sebesar 5,5%	Adanya selisih tebal lapis perkerasan kaku antara Metode Bina Marga 2024 dan Metode AASHTO 1993 sebesar 40 mm dan selisih anggaran sebesar Rp. 135.320.015.80 3,-. Sehingga peneliti menyimpulkan bahwa Metode Bina Marga 2024 memiliki harga yang lebih ekonomis sebesar 8,89%.	Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa ketebalan pelat beton yang diperlukan adalah 280 mm, beton kurus setebal 150 mm dan lapisan fondasi kelas A setebal 200 mm. Desain tersebut dirancang untuk memenuhi kebutuhan kekuatan struktur dalam menahan beban lalu lintas aktual.	Didapatkan kondisi kinerja perkerasan jalan lentur pada Ruas Jalan Yogyakarta– Pakem KM 14,5–16 dengan menggunakan metode Bina Marga 2024, analisis setiap lapisan menggunakan Aplikasi WinJULEA dan Aplikasi KENPAVE.

Sumber : Lu dan Hajj (2021), Lia dan Mahardi (2022), Putri, dkk.(2022), Roja, dkk., (2023), Hadi (2023), Hadi (2024), Yanti (2024), Farhan, dkk., (2025)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024

Berdasarkan Surat Edaran No. 15/SE/Db/2024 yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, telah ditetapkan Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 (No. 03/M/BM/2024) atau yang lebih dikenal dengan sebutan Bina Marga 2024. Dokumen ini menjadi pedoman resmi dalam perencanaan teknis jalan di Indonesia, menggantikan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017 (Bina Marga 2017). Pembaruan ini dilakukan agar dapat menyesuaikan dengan berbagai pedoman teknis, spesifikasi terbaru, perkembangan teknologi, serta ketersediaan material konstruksi.

Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 mengacu pada metode AASHTO 1993 dan Austroads AGPT02-2017 dalam perhitungan ekuivalen beban sumbu, serta menggunakan pendekatan mekanistik-empiris dalam perancangan perkerasan lentur. Secara umum, perbedaan antara Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 tidak signifikan. Namun, pada edisi terbaru, beberapa aspek dijelaskan secara lebih detail, antara lain melalui pengintegrasian pendekatan mekanistik-empiris dengan analisis, penerapan survei modern, serta pemanfaatan Big Data untuk menghasilkan analisis yang lebih akurat. Dengan demikian, proses perencanaan dan pelaksanaan dapat dilakukan secara lebih optimal.

Perbedaan mendasar antara kedua edisi panduan tersebut meliputi pemilihan struktur perkerasan, klasifikasi jenis kendaraan, serta penentuan nilai *vehicle damage factor* (VDF) yang disesuaikan dengan kondisi lalu lintas terkini.

3.1.1 Umur Rencana

Umur rencana ialah periode waktu jalan berfungsi sejak pertama kali dibuka hingga membutuhkan perbaikan atau *overlay*. Pada dasarnya, umur rencana pada Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 memiliki kesamaan. Umur rencana dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Pemilihan Umur Rencana

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (Tahun)
Perkerasan Lentur	Lapisan aspal dan lapisan berbutir	20
	Lapisan Fondasi jalan	40
	Semua perkerasan untuk daerah yang tidak dimungkinkan pelapisan ulang (<i>overlay</i>), seperti: jalan perkotaan, <i>underpass</i> , jembatan, terowongan.	
	<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)	Minimum 10

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

3.1.2 Pemilihan Jenis Perkerasan

Dalam tahapan pemilihan jenis perkerasan, terdapat perbedaan pada aspek struktur perkerasan, khususnya terkait adanya penambahan lapisan, perbedaan bagan desain serta variasi jumlah ESA5 sepanjang umur rencana. Dalam pemilihan jenis perkerasan ini menggunakan ESA5 yang merupakan perhitungan beban lalu lintas yang dinyatakan dalam ekuivalen sumbu standar. ESA5 digunakan sebagai perencanaan perkerasan lentur yang berkaitan dengan faktor kelelahan beton aspal dalam desain dengan pendekatan mekanistik-empiris. Penentuan desain yang dipilih harus mengacu pada nilai *discounted lifecycle cost* terendah. Pemilihan jenis perkerasan ditunjukkan pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Pemilihan Jenis Perkerasan

Struktur Perkerasan	Bagan Desain	ESA5 (juta) dalam 20 tahun				
		0–1	1–4	4–10	>10–20	>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	-	-	-

Lanjutan Tabel 3.2 Pemilihan Jenis Perkerasan

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

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

3.1.3 Lalu Lintas

Dalam MDPJ 2024, konsep perhitungan lalu lintas rencana pada dasarnya serupa dengan edisi sebelumnya (MDPJ 2017). Data lalu lintas dibutuhkan untuk menentukan besarnya beban yang akan diterima oleh perkerasan selama umur rencana, yang kemudian diproyeksikan ke masa mendatang. Informasi lalu lintas yang diperlukan meliputi:

1. Volume lalu lintas

Data lalu lintas harian rata-rata didapatkan dari hasil survei lalu lintas kendaraan yang melewati suatu jalan atau dari data sekunder yang telah ada. Survei manual dapat dilakukan secara langsung di lapangan dengan durasi minimal 7 x 24 jam. Survei dilakukan dengan mengacu pada Pedoman Survei Pencacahan Lalu Lintas (Pd T-19-2004-B) atau menggunakan peralatan dengan pendekatan yang sama. Penentuan volume lalu lintas pada jam sibuk dan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHRT) mengacu pada Pedoman Kapasitas Jalan Indonesia (PKJI). Penentuan nilai LHRT berdasarkan data survei volume lalu lintas dengan mempertimbangkan faktor K.

2. Faktor laju pertumbuhan lalu lintas (i)

Faktor pertumbuhan lalu lintas dalam Metode Bina Marga 2024 memiliki kesamaan dengan Metode Bina Marga 2017. Penentuan faktor pertumbuhan

lalu lintas sebaiknya didasarkan pada data pertumbuhan lalu lintas (*historical growth data*) atau formulasi korelasi dengan faktor-faktor pertumbuhan lain yang relevan dan berlaku. Namun, apabila data tidak tersedia, maka dapat menggunakan acuan nilai faktor pertumbuhan lalu lintas sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Faktor Laju Pertumbuhan 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 Jendral Bina Marga (2024)

Pertumbuhan lalu lintas selama umur rencana dapat dihitung dengan Persamaan 3.1 berikut.

$$R = \frac{(1+0,01 \cdot i)^{UR} - 1}{0,01} \quad (3.1)$$

dengan :

R = Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif

i = Laju pertumbuhan lalu lintas tahunan (%)

UR = Umur rencana (tahun)

Pengaruh pengalihan lalu lintas (*traffic diversion*), dalam analisis harus memperhatikan faktor pengalihan lalu lintas yang didasarkan pada jaringan jalan dan harus memperhitungkan proyeksi peningkatan kapasitas ruas jalan saat ini (*existing*) dan pembangunan ruas jalan baru.

3.1.4 Faktor Lajur Rencana

Lajur rencana merupakan salah satu lajur pada ruas jalan yang difungsikan untuk menampung arus kendaraan berat/kendaraan niaga seperti truk dan bus. Beban lalu lintas pada lajur ini dihitung dalam bentuk kumulatif beban gandar standar (ESA), dengan mempertimbangkan faktor distribusi arah (DD) serta faktor distribusi lajur (DL). Umumnya, nilai faktor distribusi arah (DD) ditetapkan sebesar

0,5 (50%) pada jalan dua arah, kecuali pada kondisi tertentu di mana jumlah kendaraan berat lebih dominan di salah satu arah. Sementara itu, faktor distribusi lajur (DL) berfungsi untuk menyesuaikan beban kumulatif (CESAL) pada jalan dengan dua lajur atau lebih dalam satu arah. Apabila data faktor distribusi lajur tidak tersedia, maka dapat mengacu pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Faktor Distribusi Lajur (DL)

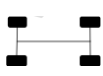
Jumlah Lajur setiap Arah	Kendaraan Niaga pada Lajur Desain (% terhadap Populasi Kendaraan Niaga)
1	100
2	80
3	60
4	50

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

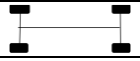
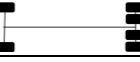
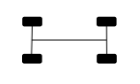
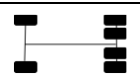
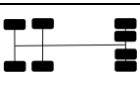
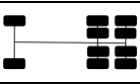
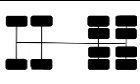
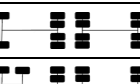
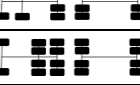
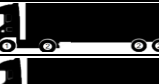
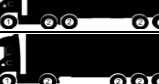
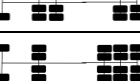
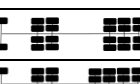
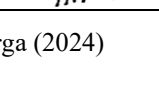
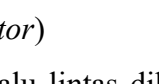
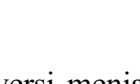
3.1.5 Jenis Kendaraan

Pada Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 untuk jenis kendaraan yang digunakan sama dengan MDPJ 2017 namun terdapat penambahan klasifikasi kendaraan, sehingga akan mempengaruhi kinerja perkerasan yang dilalui oleh kendaraan, sehingga akan mempengaruhi kinerja perkerasan yang dilalui oleh beban tersebut. Beban yang dihasilkan oleh kendaraan yang berbeda-beda akan mempengaruhi kondisi perkerasan jalan. Kendaraan dengan beban sumbu dan jenis kendaraan yang lebih besar akan menyebabkan kerusakan yang lebih parah. Dengan mempertimbangkan klasifikasi kendaraan, evaluasi perkerasan jalan dapat dilakukan dengan lebih akurat dan efektif sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan kenyamanan pengguna jalan. Sistem klasifikasi kendaraan terdapat pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3.5 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		
3	Kendaraan ringan – angkutan umum sedang	1.1	2		
4	Kendaraan ringan – <i>pick up</i> , <i>micro truck</i>	1.1	2		

Lanjutan Tabel 3.5 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok Sumbu	Skema Konfigurasi	
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	11.22	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		
7C4	Truk 7 sumbu-berat	1.22-2222	3		
8	Kendaraan tak bermotor				

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

3.1.6 Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*)

Dalam perancangan perkerasan jalan, beban lalu lintas dikonversi menjadi beban standar (ESA) dengan menggunakan faktor ekuivalen beban (*vehicle damage factor*). VDF dari suatu kendaraan diperoleh dari akumulasi nilai ESA pada seluruh kelompok sumbu kendaraan tersebut. Dengan adanya VDF, berbagai jenis kendaraan dengan konfigurasi dan beban sumbu yang berbeda dapat dihitung menjadi total beban ESA.

Nilai VDF memiliki peran penting dalam menilai tingkat kerusakan jalan, karena faktor ini mampu menggambarkan dampak kerusakan akibat beban kendaraan. Untuk menghasilkan desain yang tepat, diperlukan perhitungan beban lalu lintas yang akurat, sehingga survei beban gandar perlu dilakukan. Namun, apabila data tidak tersedia dan survei beban gandar tidak memungkinkan, nilai VDF dapat diambil dari referensi yang disesuaikan dengan kondisi ruas jalan yang ditinjau. Pada penelitian ini, untuk ruas Jalan Kaliurang–Pakem KM 14,5 – 16, Daerah Istimewa Yogyakarta, digunakan nilai VDF sebagaimana yang tercantum dalam Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6 VDF Daerah Istimewa Yogyakarta

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

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

3.1.7 Beban Sumbu Standar Kumulatif

Beban sumbu standar atau *cumulative standard axle load* (CESAL) merupakan total akumulasi beban sumbu lalu lintas rencana yang melewati lajur desain sepanjang masa umur rencana. Nilai ini digunakan untuk menggambarkan besarnya beban lalu lintas yang harus ditanggung oleh struktur perkerasan. Dengan kata lain, CESAL menjadi indikator utama dalam menentukan ketahanan dan kebutuhan struktur perkerasan terhadap beban lalu lintas jangka panjang. Perhitungan CESAL didasarkan pada Persamaan 3.2 sebagai berikut:

$$\text{CESAL} = \left(\sum \text{LHR}_{\text{JK}} \times \text{VDF}_{\text{JK}} \right) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \quad (3.2)$$

dengan :

$\sum \text{LHR}_{\text{JK}}$ = Lintas harian rata-rata tiap jenis kendaraan niaga (kendaraan per hari),

VDF_{JK} = Faktor ekuivalen beban (*vehicle damage factor*),
 DD = Faktor distribusi arah,
 DL = Faktor distribusi lajur,
 $CESAL$ = Kumulatif beban sumbu standar ekuivalen selama umur rencana,
 R = Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif.

3.1.8 Bagan Desain Tebal Perkerasan Lentur

Desain tebal perkerasan lentur adalah proses penting dalam perencanaan jalan untuk menentukan ketebalan lapisan perkerasan agar struktur jalan dapat bertahan selama umur rencana. Bagan desain tebal perkerasan lentur dalam Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024 berfungsi untuk merancang ketebalan lapisan perkerasan berdasarkan faktor teknis yang mempengaruhi kinerja struktur jalan.

Menurut MDP 2024, bagan ini mengacu pada beberapa parameter utama, yaitu *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL), Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR), jenis kendaraan, serta kualitas material yang digunakan dalam lapisan perkerasan. CESAL menggambarkan total beban lalu lintas yang diterima perkerasan jalan, yang dihitung dengan mengonversi volume lalu lintas menjadi beban kendaraan standar menggunakan *Vehicle Damage Factor* (VDF). LHR mengindikasikan jumlah kendaraan yang melintas per hari pada ruas jalan tersebut, sedangkan distribusi beban pada struktur perkerasan juga dipengaruhi oleh distribusi lajur (DL) dan distribusi arah (DD) kendaraan yang menggunakan lajur dan arah yang berbeda.

Bagan desain tebal perkerasan lentur ini memberikan alternatif desain berdasarkan kondisi lalu lintas yang diperkirakan selama umur rencana jalan. Melalui analisis regresi yang menghubungkan repetisi beban lalu lintas dengan ketebalan lapisan perkerasan yang diperlukan, bagan ini memastikan bahwa struktur perkerasan mampu menahan beban yang diterima selama umur rencana, sekaligus meminimalkan potensi kerusakan seperti *fatigue cracking* (retak lelah), *rutting* (alur pada permukaan jalan), dan *permanent deformation* (deformasi permanen pada lapisan tanah dasar). Bagan desain untuk perkerasan lentur yang disediakan MDP 2024 dapat dilihat pada Tabel 3.7 sampai Tabel 3.16 berikut.

Tabel 3.7 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 Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 3.8 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 Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 3.9 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	40	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 Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 3.10 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	40	50	50	40	50	50	50
AC BC	60	70	75	80	60	60	60	75
	-	-	-	-	70	-	-	-
AC Base ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	80	100	100
	-	-	-	-	-	-	-	-
CTB	300	300	300	300	300	300	300	300
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	150	150	150	150	150	150	150	150
Timbunan Pilihan Berbutir Kasar atau LFA Kelas C atau Stabilisasi Semen ⁽²⁾	200	200	200	200	200	200	200	200

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 3.11 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 Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 3.12 Bagan Desain-3B Penyesuaian tebal lapis timbunan pilihan berbutir kasar atau LFA kelas C atau stabilisasi semen (hanya untuk bagan desain-3A) beban rencana 20 tahun > 5 juta ESA5

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

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 3.13 Bagan Desain-4 Desain perkerasan lentur dengan HRS

Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (10^6 CESA5)	$\text{FF1} < 0,5$	$0,5 \leq \text{FF2} \leq 4,0$
Jenis permukaan	HRS atau Penetrasi Makadam	HRS ²
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 Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 3.14 Bagan Desain-5 Perkerasan Berbutir dengan Laburan

	STRUKTUR PERKERASAN		
	SD1	SD2	SD3
	Kumulatif Beban Rencana (ESA4x10 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 <i>subgrade</i> dengan CBR ≥ 5% ^{2,5}	100	110	140

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

**Tabel 3.15 Bagan Desain-6 Perkerasan dengan Stabilisasi Tanah Semen (*Soil Cement*)
(untuk area dengan sumber agregat atau kerikil terbatas)**

	STRUKTUR PERKERASAN ¹		
	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 Jendral Bina Marga (2024)

**Tabel 3.16 Bagan Desain-7 Perkerasan dengan *Improve Subgrade* Stabilisasi Semen
(untuk area dengan sumber agregat atau kerikil terbatas)**

	STRUKTUR PERKERASAN ¹		
	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 Jendral Bina Marga (2024)

3.2 Aplikasi WinJULEA

WinJULEA merupakan modul analisis elastis berlapis yang termasuk dalam perangkat lunak PCASE (*Pavement-Transportation Computer Assisted Structural Engineering*). Aplikasi ini dapat menghitung respons struktur perkerasan berupa tegangan, regangan, dan lendutan akibat beban kendaraan (U.S. Department of Transportation & U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2017). Selain itu, WinJULEA mampu melakukan evaluasi terhadap pengaruh beban ban lebar (*wide-base tire loading*) pada perkerasan (FPInnovations, 2020).

WinJULEA bekerja berdasarkan teori elastis *multilayer*, di mana struktur perkerasan dipandang sebagai beberapa lapisan elastis yang saling menahan. Setiap lapisan dianggap memiliki sifat elastis isotropik, dengan modul elastisitas dan *poisson's ratio* tertentu. Prinsip utama teori elastis *multilayer* adalah:

1. Tegangan dan regangan yang muncul di satu lapisan akan memengaruhi lapisan lain secara vertikal.
2. Lendutan permukaan dihitung dari interaksi semua lapisan di bawah titik beban.
3. Tegangan maksimum, regangan maksimum, dan lendutan permukaan menjadi dasar evaluasi performa perkerasan terhadap beban lalu lintas.

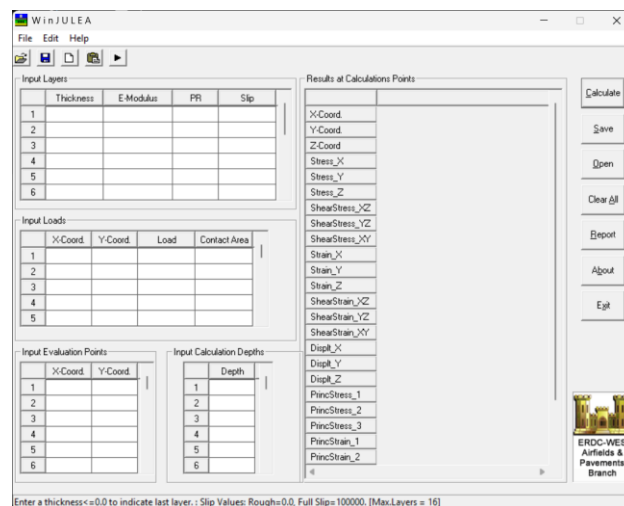
Metode ini memungkinkan perhitungan yang lebih realistis dibandingkan model sederhana satu lapisan, karena memperhitungkan distribusi tegangan dan regangan di seluruh lapisan perkerasan dan tanah dasar.

Dalam melakukan analisis menggunakan WinJULEA, terdapat beberapa parameter utama yang digunakan dalam proses analisisnya sehingga memungkinkan WinJULEA dapat menghitung respons struktural perkerasan secara detail dan spesifik sesuai kondisi nyata. Parameter utama tersebut meliputi:

1. *Layers* (Lapisan), untuk menentukan jumlah lapisan dan properti material setiap lapisan (modulus elastisitas, ketebalan, *poisson's ratio*)
2. *Loads* (beban), untuk menentukan besarnya beban kendaraan, distribusi, dan jenis ban (normal atau *wide-base*).
3. *Calculation depth* (kedalaman perhitungan), untuk menentukan kedalaman vertikal hingga mana tegangan, regangan, dan lendutan dihitung.

4. *Calculation points* (titik perhitungan), merupakan titik di dalam lapisan tempat hasil tegangan, regangan, dan lendutan dievaluasi.

Tampilan utama dari aplikasi WinJULEA dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut, yang memudahkan pengguna memasukkan parameter lapisan, beban dan titik perhitungan.



Gambar 3.1 Tampilan Awal Aplikasi WinJULEA

3.2.1 *Input Layers*

Dalam penggunaan aplikasi WinJULEA, ada beberapa parameter yang digunakan. Pada bagian pertama berkaitan dengan layer yang memiliki beberapa parameter yang digunakan, diantaranya.

1. Ketebalan Perkerasan

Setiap nilai ketebalan lapisan perkerasan harus dimasukkan ke dalam *input layer* saat melakukan analisis menggunakan aplikasi WINJULEA. Satuan ketebalan yang digunakan dapat berupa milimeter (mm) atau inci (*inch*), sedangkan untuk lapisan terakhir dapat dimasukkan dengan nilai nol atau negatif. Data ketebalan tersebut diperoleh dari instansi terkait, yaitu Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral Daerah Istimewa Yogyakarta (PUPESDM-DIY).

2. *Modulus Elasticities*

Modulus elasticities, yang juga dikenal sebagai *Modulus Young* (E), merupakan rasio antara tegangan dan regangan pada suatu material. Menurut

Ariawan, dkk. (2021) *Modulus elasticities* diperlukan untuk menghasilkan suatu regangan yang juga dipengaruhi oleh sifat bahan yang menerima tegangan tersebut. Hampir semua bahan yang digunakan untuk perkerasan merupakan bahan yang elastis, sehingga dapat kembali ke bentuk aslinya setelah diregangkan atau ditekan.

Dalam pelaksanaannya, setiap material memiliki batas tegangan dan regangan elastis. Sifat elastis suatu material menunjukkan kemampuannya untuk kembali ke bentuk dan ukuran asal setelah mengalami deformasi, bukan menunjukkan ketahanannya terhadap tegangan atau regangan. Nilai Modulus elastisitas pada setiap jenis bahan berbeda-beda, seperti pada Tabel 3.17 berikut.

Tabel 3.17 Nilai Modulus Elastisitas Bina Marga 2024

Jenis Bahan	Modulus Tipikal (MPa)
HRS WC	800
HRS BC	900
AC WC ((2 x 75 tumbukan)	1100
AC-WC (2 x 50 tumbukan)	1000
AC-BC (2 x 75 tumbukan)	1200
AC-Base (2 x 75 tumbukan)	1500
AC-WC PG70 (2 x 75 tumbukan)	1300
AC-BC PG70 (2 x 75 tumbukan)	1400
Bahan bersemen (CTB)	3.000 MPa (<i>pre cracking</i>)
Bahan bersemen (CTB)	500 MPa retak (<i>post cracking</i>)
Tanah dasar (disesuaikan musim)	10 x CBR

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

3. *Poisson's Ratio*

Poisson's Ratio adalah rasio yang menunjukkan perbedaan antara regangan horizontal (regangan Longitudinal) dan regangan vertikal (regangan lateral) yang disebabkan oleh beban sumbu sejajar dan regangan *axial*. Suatu material akan mengalami perubahan bentuk apabila diberikan gaya satu arah, ditarik ataupun ditekan. Material dengan bahan kaku akan memberikan nilai *poisson's ratio* lebih rendah, namun apabila material tersebut lebih lembut

atau lunak maka nilai *poisson's ratio* akan lebih besar. Nilai *poisson's ratio* yang digunakan dapat disesuaikan dengan aturan yang berlaku seperti pada Tabel 3.18 berikut

Tabel 3.18 Nilai *Poisson's Ratio* Bina Marga 2024

Jenis Bahan	Modulus Tipikal (MPa)
HRS WC	0,40
HRS BC	
AC WC ((2 x 75 tumbukan)	
AC-WC (2 x 50 tumbukan)	0,40
AC-BC (2 x 75 tumbukan)	
AC-Base (2 x 75 tumbukan)	
AC-WC PG70 (2 x 75 tumbukan)	
AC-BC PG70 (2 x 75 tumbukan)	
Bahan bersemen (CTB)	0,20
Bahan bersemen (CTB)	0,20 (mulus) 0,35 (retak)
Tanah dasar (d disesuaikan musim)	0,45 (Tanah Kohesif)
	0,35 (Tanah Non Kohesif)

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

4. *Slip*

Slip merupakan kondisi permukaan perkerasan jalan yang licin serta tidak memiliki gesekan yang cukup untuk menopang beban kendaraan sehingga mengganggu dan membahayakan keselamatan pengguna jalan dalam berkendara. Dalam menggunakan aplikasi WinJULEA, terdapat instruksi pada halaman utama yaitu untuk memasukkan nilai 0,0 apabila permukaan jalan kasar, tidak memiliki *slip*. Namun, apabila terdapat *full slip* maka nilai *slip* diisi dengan nilai 100000 dengan maksimal 16 *layers*.

3.2.2 *Input Loads*

Input Loads merupakan bagian penting dalam penggunaan program WinJULEA karena akan menentukan tegangan, regangan serta defleksi pada struktur perkerasan. *Input loads* adalah data gaya (beban) yang diberikan oleh roda kendaraan pada permukaan jalan, yang nantinya akan diterjemahkan oleh program

menjadi respons mekanis dari perkerasan. Pengaturan *input loads* yang tepat sangat penting untuk mendapatkan hasil analisis yang akurat dan representatif terhadap kondisi nyata. Beberapa komponen yang termasuk dalam *input loads* antara lain:

1. X-Coord

X-Coord menunjukkan posisi beban dalam arah horizontal X pada permukaan perkerasan. Satuan yang digunakan biasanya inci (in) atau milimeter (mm), tergantung sistem satuan yang digunakan dalam model. Posisi ini penting untuk menentukan titik masuk beban pada model perkerasan.

2. Y-Coord

Y-Coord menunjukkan posisi beban dalam arah horizontal Y. Sama seperti X-Coord, nilai ini juga ditulis dalam satuan inci atau mm. Kombinasi X-Coord dan Y-Coord menentukan lokasi pusat kontak roda terhadap permukaan jalan, sehingga mempengaruhi distribusi tegangan di bawah lapisan perkerasan.

3. Load

Load atau beban merupakan besar gaya vertikal yang diberikan oleh roda kendaraan pada perkerasan, biasanya dinyatakan dalam satuan Newton (N). Besarnya beban ini akan mempengaruhi tegangan normal dan regangan pada lapisan perkerasan, sehingga menjadi parameter utama dalam perhitungan kinerja struktural jalan.

4. Contact Area

Contact area adalah luas kontak antara ban kendaraan dan permukaan perkerasan. Nilai ini dihitung berdasarkan kombinasi beban roda dan tekanan kontak yang bekerja antara ban dan permukaan jalan. Satuan yang umum digunakan adalah in² atau m². *Contact area* mempengaruhi distribusi tekanan pada perkerasan; semakin besar area kontak, semakin tersebar gaya pada lapisan bawah, sehingga mengurangi risiko deformasi lokal.

Dengan memasukkan data *input loads* yang tepat, WinJULEA dapat menyimulasikan interaksi antara kendaraan dan perkerasan dengan lebih akurat, termasuk memprediksi deformasi, regangan, dan tegangan pada berbagai titik

pengukuran di dalam struktur jalan. Hal ini menjadi dasar penting dalam perancangan dan evaluasi ketahanan perkerasan terhadap beban lalu lintas.

3.2.3 *Input Evaluation Points*

Evaluation points adalah titik-titik struktur jalan yang ingin dianalisis akibat beban kendaraan. Nilai *evaluation points* didapatkan dari:

1. Kebutuhan desain (misalnya mengevaluasi tegangan di dasar lapisan aspal)
2. Posisi lapisan-lapisan jalan (tebal tiap lapisan)
3. Titik kritis (seperti antarmuka antar lapisan)

Sebelum dilakukan analisis, tentukan terlebih dahulu dimana titik yang ingin diketahui hasil tegangan atau regangannya. Biasanya terletak pada 3 titik yaitu didasar lapisan atas (untuk *fatigue*), di atas *subgrade* (untuk *rutting*), dan di permukaan (untuk defleksi total).

3.2.4 *Input Calculation Depth*

Pada *calculation depth*, nilainya bukan dimasukkan untuk titik evaluasi spesifik namun batas seberapa jauh struktur tersebut dianalisis. Nilai *calculation depth* ditentukan dalam satuan inci atau meter. *Calculation depth* merupakan hal yang penting dalam proses desain karena akan mempengaruhi hasil desain. apabila terlalu dangkal, maka tidak bisa dilihat regangan yang terjadi di dasar *subgrade*, hal ini penting untuk desain *rutting*. Jika terlalu dalam, dapat memperlambat komputasi tetapi masih tergolong aman secara akurasi.

3.2.5 *Result At Calculations Points*

Result at calculations points merupakan *output* utama yang dihasilkan dari program WinJULEA ini. *Output* pada program ini akan menunjukkan respons struktur perkerasan terhadap beban kendaraan pada titik-titik evaluasi yang sudah ditentukan. Terdapat beberapa nilai *output* yang dihasilkan oleh aplikasi WinJULEA, diantaranya yaitu.

1. Coord X, Y, dan Z

Titik koordinat ini menunjukkan posisi titik dalam arah horizontal (X dan Y), serta arah vertikal ke bawah dari permukaan (Z). Informasi koordinat ini digunakan untuk menandai lokasi titik evaluasi dalam model perkerasan.

2. *Stress X, Y, dan Z*

Nilai tegangan pada arah horizontal (X dan Y) dan vertikal (Z). Nilai *stress Z* digunakan secara khusus untuk mengevaluasi tekanan terhadap tanah dasar (*subgrade*), yang menjadi parameter penting dalam menilai kapasitas dukung perkerasan.

3. *Shear Stress XZ, YZ, dan XY*

Nilai tegangan geser pada bidang X-Z, Y-Z, dan X-Y. Tegangan geser ini digunakan untuk menganalisis kemungkinan terjadinya deformasi geser antar lapisan perkerasan dan untuk memprediksi kegagalan geser lokal.

4. *Strain X, Y, dan Z*

Nilai regangan pada arah X, Y, dan Z. *Strain Z* digunakan untuk evaluasi regangan vertikal yang berkaitan dengan potensi deformasi permanen atau *rutting*. Regangan menggambarkan perubahan panjang relatif terhadap panjang awal akibat gaya yang bekerja pada lapisan perkerasan.

5. *Shear Strain XZ, YZ, dan XY*

Nilai regangan geser pada bidang X-Z, Y-Z, dan X-Y. Data ini digunakan untuk menilai deformasi geser pada lapisan perkerasan dan interaksi antar lapisan akibat beban lalu lintas.

6. *Displacement X, Y, dan Z*

Perpindahan (defleksi) titik dalam arah X, Y, dan Z. Nilai ini menunjukkan seberapa jauh titik yang diamati bergeser akibat beban kendaraan, yang menjadi parameter penting dalam evaluasi kinerja struktural perkerasan.

7. *Principal Stresses (Princ Stress) 1, 2, dan 3*

Principal Stress (Princ Stress) 1, 2, dan 3 adalah tegangan utama yang dialami oleh material perkerasan pada titik tertentu, diperoleh dari kombinasi tegangan normal dan tegangan geser di titik tersebut. Tegangan ini diukur pada arah di mana tegangan geser bernilai nol.

- a. *Princ Stress 1 (σ_1)*: Tegangan utama maksimum yang menunjukkan besarnya tegangan tarik atau tekan terbesar. Digunakan untuk menilai risiko retak tarik (*tensile cracking*) dan potensi kegagalan material akibat beban berlebih.

- b. *Princ Stress 2* (σ_2): Tegangan utama menengah, berfungsi sebagai referensi distribusi tegangan dalam material. Digunakan untuk menganalisis perilaku *multi-axial* material dan redistribusi tegangan antar lapisan.
 - c. *Princ Stress 3* (σ_3): Tegangan utama minimum, biasanya tegangan tekan terbesar dalam kondisi kompresi. Digunakan untuk mengevaluasi potensi retak tekan atau deformasi permanen pada lapisan bawah perkerasan, serta kestabilan lapisan *subgrade*.
- 8. *Principal Strain (Princ Strain) 1, 2, dan 3*
 Nilai regangan utama maksimum, menengah, dan minimum. *Princ Strain 1* digunakan untuk evaluasi retak tarik (*top-down cracking*) pada lapisan permukaan, sedangkan *Princ Strain 3* digunakan untuk analisis retak tekan (*bottom-up cracking*) atau potensi deformasi pada lapisan bawah. *Princ Strain 2* mencerminkan regangan menengah yang digunakan sebagai referensi tambahan dalam menilai distribusi regangan secara keseluruhan. Analisis ketiga regangan utama ini sangat penting dalam memprediksi kegagalan struktural perkerasan dan merencanakan strategi pemeliharaan.
- 9. *Max Shear*
 Nilai tegangan geser maksimum yang digunakan untuk memeriksa kemungkinan kegagalan geser antar lapisan perkerasan, sehingga menjadi indikator penting dalam evaluasi stabilitas struktural.
- 10. *Octahedral Normal Stress (Oct Norm Stress)*
 Nilai tegangan *octahedral*, yaitu rata-rata dari tiga tegangan utama. Parameter ini digunakan dalam analisis tegangan *multi-axial* untuk mengevaluasi keamanan struktur perkerasan terhadap deformasi dan retak.
- 11. *Octahedral Shear Stress (Oct Shear Stress)*
 Tegangan geser *octahedral* yang digunakan dalam teori kegagalan, khususnya untuk menilai kemungkinan retak atau kegagalan material berdasarkan distribusi tegangan di seluruh lapisan.
 Nilai-nilai *output* tersebut digunakan sebagai informasi penting untuk menilai keamanan dan kinerja struktur perkerasan, menentukan titik lemah, serta

merancang tebal lapisan perkerasan sesuai standar yang berlaku, seperti AASHTO, Bina Marga, dan standar internasional lainnya. Analisis lengkap dari semua parameter ini memungkinkan perencanaan perkerasan yang lebih tepat, tahan lama, dan efisien terhadap beban lalu lintas.

3.3 Aplikasi KENPAVE

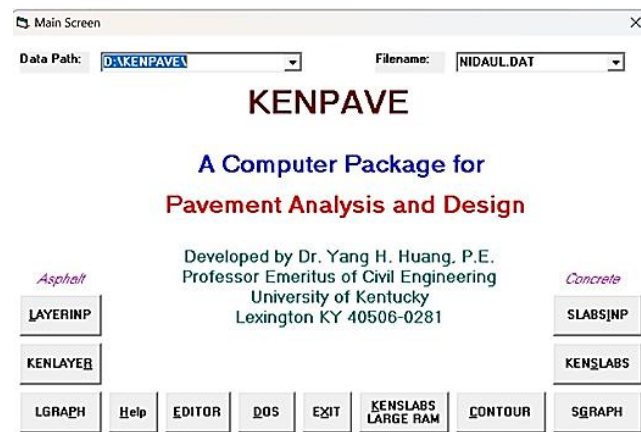
KENPAVE merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh Yang H. Huang, P.E., Professor Emeritus of Civil Engineering, University of Kentucky. Program ini dirancang untuk menganalisis baik perkerasan kaku (*rigid pavement*) maupun perkerasan lentur (*flexible pavement*) (Huang, 2004). Data yang diperlukan dalam proses analisis mencakup karakteristik struktur perkerasan serta sifat material dari setiap lapisan yang digunakan.

Aplikasi ini dilengkapi empat program pendukung, yaitu LAYERINP, KENLAYER, SLABSNP, dan KENSLAB. Setiap program memiliki fungsi yang berbeda sesuai dengan jenis perkerasan yang dianalisis. Modul LAYERINP dan KENLAYER digunakan untuk analisis perkerasan lentur dengan pendekatan teori lapis banyak, sedangkan SLABSNP dan KENSLAB digunakan untuk perkerasan kaku dengan metode elemen hingga. Melalui modul-modul tersebut, KENPAVE mampu melakukan perhitungan tegangan, regangan, dan lendutan, sekaligus mengevaluasi respons perkerasan terhadap beban lalu lintas (Huang, 2004).

Selain itu, KENPAVE banyak digunakan dalam penelitian maupun praktik rekayasa jalan karena kemampuannya memberikan analisis yang cukup detail terhadap kinerja perkerasan. Hasil analisis berupa tegangan, regangan, dan lendutan dapat dijadikan dasar untuk memprediksi potensi kerusakan seperti retak lelah (*fatigue cracking*), deformasi permanen (*permanent deformation*), maupun *rutting*. Dengan demikian, perangkat lunak ini tidak hanya bermanfaat dalam tahap perencanaan, tetapi juga dalam evaluasi kinerja perkerasan yang sudah beroperasi, sehingga mendukung upaya perbaikan dan pemeliharaan jalan secara lebih tepat sasaran. Hal ini menjadikan KENPAVE sebagai salah satu perangkat lunak yang cukup andal dan banyak dijadikan acuan dalam studi maupun implementasi di lapangan.

3.3.1 Menu Utama Aplikasi KENPAVE

Aplikasi KENPAVE memiliki banyak menu yang dapat digunakan dalam analisis desain perkerasan. Tampilan utama yang muncul pada aplikasi KENPAVE seperti Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Tampilan Utama Aplikasi KENPAVE

Terdapat 8 (delapan) menu yang dapat digunakan pada aplikasi KENPAVE. Berikut penjelasan menu-menu yang terdapat pada aplikasi KENPAVE.

1. *Data Path*

Data path merupakan informasi tempat penyimpanan data, yang secara otomatis terletak pada tempat penginstalan aplikasi KENPAVE.

2. *Filename*

Menu *filename* akan otomatis terisi, sehingga tidak perlu mengisi nama *file* yang baru. *File* akan tersimpan dengan ekstensi DAT. Menu ini memudahkan dalam menentukan atau mengedit nama *file* untuk data *input* dan *output*.

3. *Help*

Menu *Help* menyediakan akses ke panduan pengguna, dokumentasi dan sumber bantuan lainnya, termasuk petunjuk untuk menjalankan berbagai fitur dalam aplikasi serta pemecahan masalah umum dalam program.

4. *Editor*

Menu *Editor* tersedia untuk mengedit, memeriksa serta mencetak *file input* secara langsung. Dalam penggunaan LAYERINP dan SLABINP, disarankan

untuk menggunakan *Menu Editor*. *Menu Editor* dapat memudahkan memasukkan data dan mencegah kesalahan karena ketidakcocokan data.

5. LAYERINP dan SLABSINP

Sebelum KENLAYER dan KENSLAB dijalankan, perlu membuat *file* data dengan LAYERINP dan SLABSINP.

6. KENLAYER dan KENSLAB

KENLAYER dan KENSLAB adalah program utama yang digunakan untuk analisis perkerasan yang hanya dapat dijalankan setelah *file* data terisi. Setelah data terisi, program mulai memproses. Dalam proses tersebut, beberapa hasil akan terlihat di layar untuk memberi tahu pengguna jika program sedang berproses.

7. LGRAPH dan SGRAPH

LGRAPH dan SGRAPH digunakan untuk membuat grafik rencana, penampang perkerasan, serta memberikan informasi tentang *input* dan *output*.

8. *Contour*

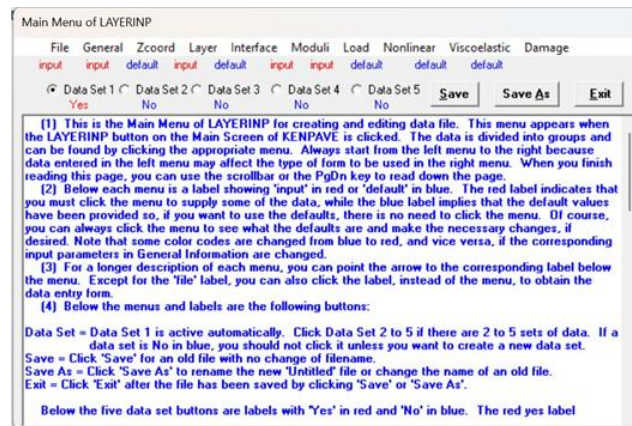
Menu *Contour* berfungsi untuk plot kontur tekanan dan momen dalam arah X atau Y. Pada pelat perkerasan hanya terjadi tekanan pada pelat yang diunggah dan ter-*plot*.

3.3.2 Program KENLAYER

Program KENLAYER merupakan salah satu modul utama dalam perangkat lunak KENPAVE yang secara khusus digunakan untuk menganalisis perkerasan lentur. Fungsi utama program ini adalah menghitung besarnya tegangan, regangan, serta lendutan yang terjadi pada tiap lapisan struktur perkerasan lentur. Proses analisis pada KENLAYER diawali dengan pengisian data karakteristik material dan struktur lapisan melalui menu LAYERINP, yang tersedia di dalam aplikasi KENPAVE sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3. Program ini mampu melakukan analisis dengan pendekatan teori lapis banyak sehingga hasilnya lebih representatif terhadap kondisi nyata perkerasan. Selain itu, KENLAYER dapat digunakan untuk memprediksi potensi kerusakan seperti retak lelah dan deformasi permanen. Oleh karena itu, program ini menjadi salah satu alat bantu penting dalam perencanaan maupun evaluasi struktur perkerasan lentur.

Selain itu, KENLAYER juga memungkinkan pengguna untuk melakukan simulasi terhadap berbagai skenario beban dan kondisi lingkungan. Dengan memasukkan variasi lalu lintas, distribusi beban poros, serta sifat material yang berbeda, pengguna dapat mengevaluasi kinerja perkerasan dalam jangka waktu tertentu. Hal ini sangat berguna untuk menentukan tebal lapisan yang optimal, memilih material yang sesuai, serta merencanakan perawatan preventif. Dengan demikian, KENLAYER tidak hanya berfungsi sebagai alat perhitungan, tetapi juga sebagai sarana pengambilan keputusan yang mendukung keberlanjutan dan efisiensi perkerasan jalan. Studi oleh Rind, dkk. (2019) menunjukkan bahwa KENLAYER efektif dalam menganalisis potensi kerusakan seperti retak leleh dan deformasi permanen pada perkerasan lentur. Hasil analisis menunjukkan bahwa KENLAYER dapat dengan akurat menghitung tegangan dan regangan pada tiap lapisan perkerasan, serta memprediksi umur desain perkerasan berdasarkan model kerusakan mekanistik-empirik. Studi tersebut juga membandingkan kinerja perkerasan menggunakan KENLAYER dengan perangkat lunak lain, seperti CHEVPC, dan menemukan bahwa KENLAYER memberikan hasil yang lebih representatif terhadap kondisi nyata perkerasan lentur. Dengan demikian, KENLAYER tidak hanya berfungsi sebagai alat bantu perhitungan, tetapi juga sebagai sarana pengambilan keputusan yang mendukung keberlanjutan dan efisiensi perkerasan jalan. Hal ini sejalan dengan temuan Rahmawati dan Adiyasa (2021) yang menggunakan KENPAVE untuk menganalisis umur sisa perkerasan lentur dan menemukan bahwa program ini efektif dalam memprediksi kerusakan akibat lalu lintas dan kondisi lingkungan.

Dengan demikian, KENLAYER tidak hanya memberikan analisis mendalam mengenai perkerasan lentur, tetapi juga memudahkan pengoptimalan desain perkerasan sesuai kebutuhan proyek. Program ini mengakomodasi berbagai variabel, seperti variasi material dan kondisi lalu lintas, untuk merancang perkerasan yang lebih tahan lama dan efisien. Dengan keunggulan ini, KENLAYER menjadi alat penting dalam merancang perkerasan yang berkualitas dan memastikan keberlanjutan struktur jalan.



Gambar 3.3 Tampilan Awal LAYERINP

Tersedia sebelas *menu* pada LAYERINP. Berikut penjelasan mengenai *menu* yang terdapat pada menu LAYERINP.

1. *File*

Menu file digunakan untuk membuat proyek baru (*new*) atau membuka *file* yang sudah ada (*old*).

2. *General*

Menu General menampilkan informasi yang berkaitan dengan perkerasan yang akan dianalisis. *Menu General* memiliki beberapa *menu* yang harus diisi dengan data yang dibutuhkan. Tampilan *Menu General* seperti pada Gambar 3.4 sebagai berikut.

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE

Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined)	(MATL)	1
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)	3
Number of Z coordinates for analysis	(NZ)	0
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

(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 3.4 Tampilan Awal Menu General

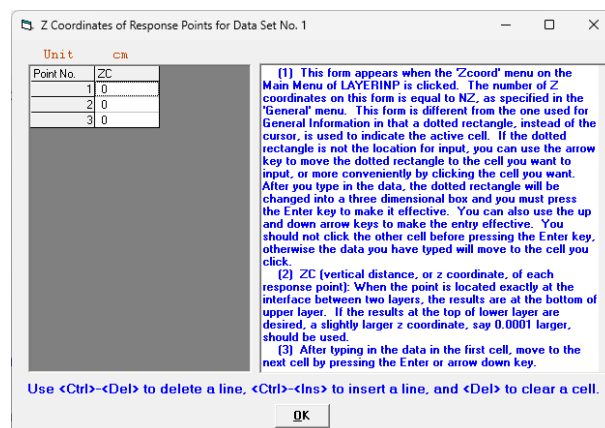
Pada Menu General terdapat beberapa data yang harus dimasukkan sebagai berikut:

- a. *Title* : Untuk Memasukkan judul analisa. Judul yang dimasukkan tidak boleh melebihi dari 68 karakter termasuk spasi serta tidak diperbolehkan menggunakan tanda koma dalam penulisannya sebagai penggantinya hanya diperbolehkan menggunakan tanda titik dua atau titik koma.
- b. *MATL* : Untuk memilih jenis dari material. Pemilihan material dilakukan dengan memasukkan nilai-nilai sebagai berikut: (1) untuk semua lapisan bersifat linear elastis; (2) untuk beberapa lapisan bersifat non-linear elastis dan lainnya bersifat linear elastis; (3) untuk beberapa lapisan bersifat viskos-elastis dan lainnya bersifat linier elastis; (4) untuk beberapa lapisan bersifat elastis non-linier, beberapa bersifat viskos-elastis, dan lainnya bersifat linier elastis.
- c. *NDAMA* : Memilih analisa kerusakan. Pemilihan analisa kerusakan dapat dilakukan dengan memasukkan data sebagai berikut: (0) untuk analisis tanpa menggunakan analisis kerusakan, (1) untuk analisis perkerasan dengan menggunakan analisis kerusakan yang disertai hasil ringkasan, dan (2) untuk analisis perkerasan dengan menggunakan analisis kerusakan yang disertai hasil ringkasan yang lebih rinci, pada analisis mode (2) ini akan menghasilkan ringkasan yang memiliki ukuran besar oleh karena itu, mode ini tidak direkomendasikan.
- d. *DEL* : Nilai akurasi data, dengan standar akurasi 0,001 (0,1%).
- e. *NL* : Jumlah lapisan, maksimal 19 lapis. Nilai *default* NL adalah 3 yang bisa diubah menyesuaikan kebutuhan.
- f. *NZ* : Letak koordinat arah z yang di analisa. Ketika *NDAMA* = 1, *NZ* dapat dibiarkan 0 karena akan ditentukan oleh program berdasarkan jumlah lokasi di mana analisis kerusakan akan dilakukan.

- g. ICL : Jumlah siklus integrasi maksimum, disarankan 80. Jumlah siklus aktual, seperti yang ditampilkan di layar komputer selama eksekusi, harus lebih kecil dari ICL. Jika tidak, hasilnya belum konvergen ke toleransi yang diinginkan DEL.
- h. NSTD : Nilai *stress*, *strain* dan *displacement*. Kondisi NSTD menyesuaikan nilai yang dimasukkan seperti berikut: (1) untuk perpindahan vertikal saja, (5) untuk perpindahan vertikal dan empat tegangan, dan (9) untuk perpindahan vertikal, empat tegangan, dan empat regangan. Saat analisis kerusakan dilakukan, NSTD harus ditetapkan 9.
- i. NBOND : Nilai yang memberikan informasi antar lapisan terikat atau tidak saling terikat. Kondisi NBOND menyesuaikan nilai yang dimasukkan seperti berikut: (1) ketika semua antarmuka terikat, dan (2) ketika beberapa antarmuka tidak terikat atau tanpa gesekan.
- j. NUNIT : Satuan yang digunakan. NUNIT dapat ditentukan sebagai berikut: (1) untuk satuan SI dan (0) untuk satuan Inggris.

3. *Zcoord*

Zcoord merupakan menu yang digunakan untuk analisis perkerasan pada koordinat Z. Jumlah pin yang tersedia dalam menu ini sama dengan jumlah NZ pada menu General. Tampilan *Zcoord* dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Tampilan Awal Menu *Zcoord*

4. *Layer*

Menu layer digunakan untuk memasukkan data jumlah lapisan perkerasan. Kolom TH merupakan tebal tiap layer dan PR merupakan *Poisson's Ratio* tiap layer. Tampilan *Menu Layer* dapat dilihat pada Gambar 3.6.

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

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

Unit	cm	kN/m ³
Layer No.	TH	PR
1	0	0
2	0	0
3	◻◻◻◻◻◻◻◻◻◻	0

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

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

OK

Gambar 3.6 Tampilan Awal *Menu Layer*

5. *Interface*

Menu Interface berkaitan dengan nilai *input* pada NBOUND. Menu ini berfungsi untuk mengatur kondisi keterikatan antar lapisan perkerasan. Pengaturan ini penting karena memengaruhi distribusi tegangan dan regangan pada struktur perkerasan. Jika NBOND = 1, maka *menu* ini berjalan dalam kondisi *default*, sedangkan jika NBOND = 2, pengguna dapat melakukan *input* secara manual. Tampilan *Menu Interface* ditunjukkan pada Gambar 3.7.

Type of Interface for Data Set No. 1

Interface No.	INT
1	0
2	◻◻◻◻◻◻◻◻◻◻

(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 key. 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 3.7 Tampilan Awal *Menu Interface*

6. *Moduli*

Jumlah periode dalam *menu moduli* tergantung nilai *input* NY pada *menu General*. *Menu* ini menampung hingga 12 periode, setiap periode memiliki tampilan untuk nilai E (*modulus elasticities*) yang dimasukkan untuk setiap lapisan. Tampilan *Menu Moduli* dapat dilihat pada Gambar 3.8.

Gambar 3.8 Tampilan Awal *Menu Moduli*

7. *Load*

Jumlah unit pada *menu load* disesuaikan dengan Nilai NLG yang telah ditentukan pada *menu general*. Kolom *load* meliputi, (0) untuk tunggal, (1) untuk tunggal roda ganda, (2) untuk tandem, dan (3) untuk triplet. Kolom CR menunjukkan radius kontak beban, sedangkan kolom CP adalah nilai beban. Kolom YW dan XW menunjukkan jarak antar roda dalam arah x dan y. Kolom NR dan PT adalah titik koordinat tegangan-regangan yang ditinjau. Tampilan *menu load* seperti pada Gambar 3.9.

Gambar 3.9 Tampilan Awal *Menu Load*

BAB IV

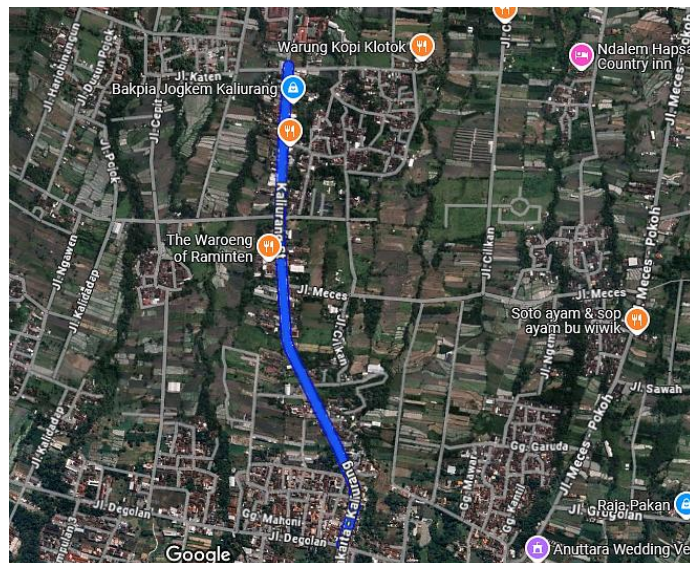
METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, metode penelitian yang digunakan pada Ruas Jalan Kaliurang–Pakem KM 14,5 – 16 yaitu metode penelitian kuantitatif. Menurut Syahroni (2022), penelitian kuantitatif adalah jenis penelitian yang melibatkan penggunaan angka secara luas, baik dalam proses pengumpulan data, analisis dan interpretasi data, maupun dalam penyajian hasil penelitian. Pendekatan pada penelitian dengan metode kuantitatif ini berdasarkan pada hipotesis, lalu dilakukan identifikasi variabel-variabel yang terlibat, dan akhirnya dapat dianalisis menggunakan metode yang valid.

4.2 Lokasi Penelitian

Lokasi yang dipilih untuk penelitian ini terletak pada Ruas Jalan Kaliurang–Pakem KM 14,5 – 16 Daerah Istimewa Yogyakarta. Berikut adalah peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Lokasi Penelitian

Sumber : Google Maps (2025)

Pemilihan segmen KM 14,5 – 16 pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem (Jalan Kaliurang) sebagai lokasi penelitian didasarkan pada pertimbangan bahwa area tersebut merupakan jalur utama yang sering digunakan wisatawan menuju kawasan wisata Kaliurang. Pada segmen ini juga terdapat beberapa titik aktivitas wisata, seperti pusat oleh-oleh dan area pemberhentian kendaraan wisatawan, yang menyebabkan frekuensi perlambatan serta peningkatan beban lalu lintas secara signifikan terutama pada akhir pekan dan musim liburan. Berdasarkan hasil observasi lapangan, terdapat beberapa kerusakan perkerasan seperti retak halus dan lubang kecil di beberapa titik, yang mengindikasikan adanya penurunan kinerja struktural akibat beban lalu lintas berulang. Oleh karena itu, segmen ini dinilai representatif untuk dianalisis dalam penelitian evaluasi kinerja perkerasan jalan, khususnya dengan pendekatan MDPJ 2024, WinJULEA, dan KENPAVE, guna memperoleh gambaran menyeluruh tentang kondisi perkerasan pada jalur wisata berintensitas tinggi.

Berdasarkan kondisinya, didapatkan data mengenai lokasi penelitian. Data tersebut telah divalidasi oleh pihak terkait yaitu Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PUPESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta. Berikut merupakan data kondisi lokasi penelitian yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Kondisi Ruas Jalan Kaliurang–Pakem KM 14,5 – 16

Parameter	Data Kondisi Ruas Jalan
Status Jalan	Jalan Kolektor Primer
Tipe Perkerasan	Perkerasan Lentur
Panjang Jalan (yang diteliti)	1,5 kilometer
Lebar Jalan	8 meter

Sumber : Dinas PUPESDM D.I. Yogyakarta (2024)

4.3 Pengumpulan Data

Dalam melaksanakan sebuah penelitian, dibutuhkan data penunjang yang didasari dari rumusan masalah yang terjadi. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu data sekunder, yang mana data ini sudah tersedia, dan bisa didapatkan dari catatan atau arsip yang sudah tersusun dalam bentuk laporan oleh pihak terkait yaitu

Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta, dan data sekunder juga bisa didapatkan dari instansi pemerintah, perusahaan ataupun perpustakaan.

Adapun data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari Dinas PUPESDM D.I. Yogyakarta bidang Bina Marga. Data yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

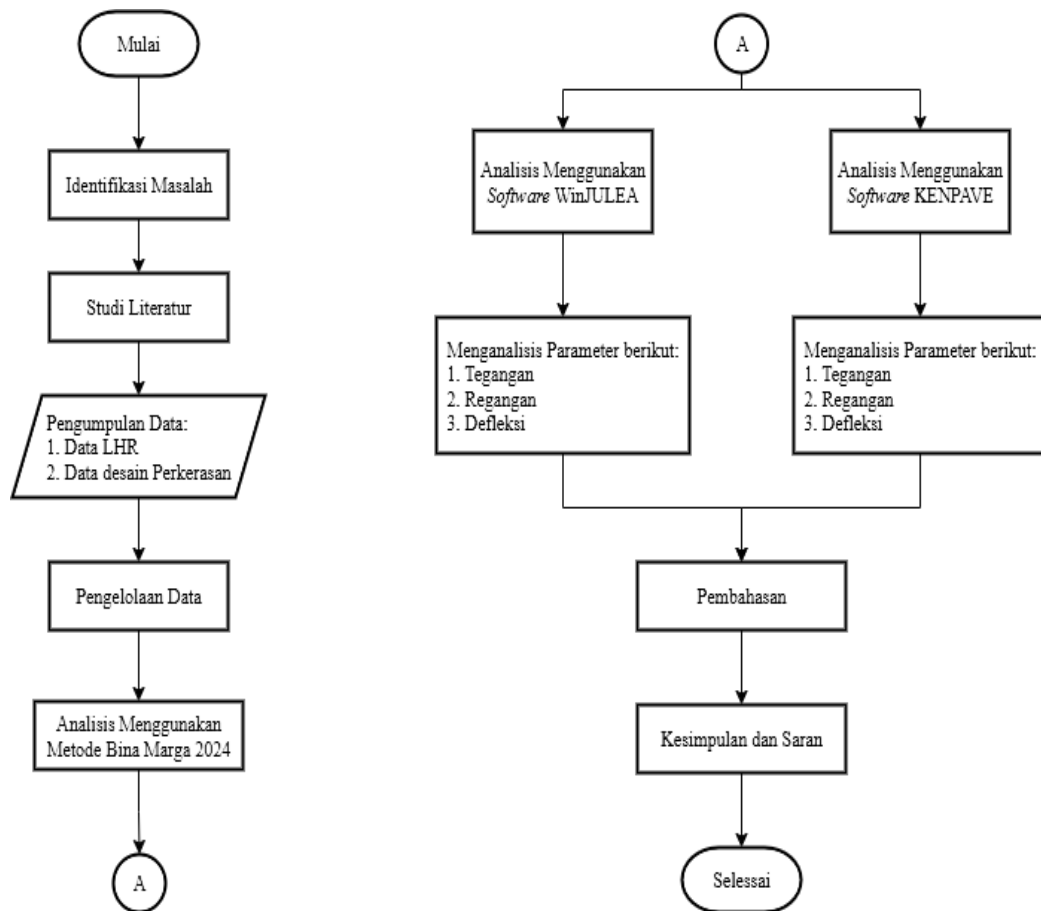
1. Data Lalu Lintas Harian (LHR),
2. Data *properties* material perkerasan jalan,
3. Data struktur perkerasan *existing*, baik berupa data geometri jalan maupun desain dari struktur perkerasan jalan

4.4 Tahapan Penelitian

Proses menganalisis data dapat dilakukan apabila data pendukung telah didapatkan. Data yang telah diperoleh kemudian dilakukan analisis dengan menggunakan metode Bina Marga 2024, lalu diverifikasi dengan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE. Berikut tahapan penelitian yang akan dilakukan.

1. Pengumpulan data dari pihak terkait yaitu Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PUPESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta.
2. Melakukan pengolahan data dan analisis berdasarkan metode Bina Marga 2024, serta diverifikasi menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE dengan data dan kondisi yang sama.
3. Hasil analisis yang didapatkan kemudian dibandingkan tebal lapis perkerasan pada kondisi normal dan kondisi ekstrem.
4. Dengan menggunakan data dan kondisi yang sama, terdapat kemungkinan perbedaan hasil dari metode-metode yang digunakan. Maka periksa kelayakan struktur pada hasil metode yang sudah digunakan.

Tahapan penelitian ini mengikuti diagram alir seperti pada Gambar 4.2 agar penelitian ini dapat berjalan dengan baik



Gambar 4.2 Diagram Alir Penelitian

4.5 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel, WinJULEA dan KENPAVE untuk mempermudah perhitungan, evaluasi, dan verifikasi kinerja perkerasan jalan. Metode perancangan menggunakan pedoman Bina Marga 2024 dijadikan acuan utama dalam menentukan tebal lapisan perkerasan dan spesifikasi material. Selanjutnya, hasil perhitungan metode Bina Marga diverifikasi menggunakan WinJULEA dan KENPAVE untuk memastikan akurasi dan konsistensi perencanaan perkerasan. Tahapan analisis data meliputi beberapa langkah sebagai berikut:

1. Pembagian sumbu pada masing-masing golongan kendaraan
Pembagian sumbu dilakukan berdasarkan klasifikasi kendaraan sesuai standar, yang bertujuan untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing jenis kendaraan terhadap kerusakan perkerasan.

2. Analisis faktor pertumbuhan lalu lintas
Faktor pertumbuhan lalu lintas (R) dihitung menggunakan Persamaan 3.1. Persamaan ini digunakan untuk memproyeksikan pertumbuhan volume lalu lintas selama umur rencana perkerasan.
3. Perhitungan *vehicle damage factor* (VDF)
Vehicle Damage Factor (VDF) digunakan untuk menghitung kontribusi beban kendaraan terhadap kerusakan perkerasan jalan, yang bergantung pada jenis kendaraan, konfigurasi kendaraan, dan kondisi perkerasan jalan. VDF dihitung berdasarkan golongan kendaraan yang melintas, sesuai dengan Tabel Klasifikasi Kendaraan yang ada pada Tabel 3.5. Tabel ini menggambarkan klasifikasi kendaraan berdasarkan ukuran dan berat kendaraan, yang selanjutnya digunakan untuk memperkirakan dampak kerusakan yang ditimbulkan oleh kendaraan terhadap lapisan perkerasan jalan.
4. Perhitungan beban sumbu standar kumulatif (CESAL)
Cumulative Standard Axle Load (CESAL) adalah total beban yang diterima oleh perkerasan jalan selama umur rencana, yang dihitung berdasarkan *standard axle load* dari kendaraan yang melintas. CESAL dihitung dengan mengalikan jumlah kendaraan yang melintas pada setiap golongan kendaraan dengan nilai *standard axle load* masing-masing golongan dan faktor distribusi lalu lintas. Untuk menghitung CESAL dapat dilihat pada Persamaan 3.2.
5. Analisis Perkerasan Menggunakan Metode Bina Marga 2024
Berdasarkan pedoman Bina Marga 2024, tebal lapisan perkerasan dan karakteristik material ditentukan sesuai umur rencana, volume lalu lintas, dan kondisi tanah dasar. Hasil perhitungan ini menjadi acuan awal dalam perancangan perkerasan.
6. Verifikasi menggunakan WinJULEA dan KENPAVE
Hasil perancangan metode Bina Marga diverifikasi menggunakan kedua aplikasi mekanistik-lentur:

- a. WinJULEA: Memverifikasi hasil menggunakan pendekatan teori elastis *multilayer*, menghasilkan distribusi deformasi, tegangan, regangan, dan tegangan geser pada titik-titik evaluasi.
- b. KENPAVE: Menghitung tegangan, regangan, dan defleksi perkerasan lentur berdasarkan *input* beban (CESAL), sehingga dapat menilai umur layanan dan kapasitas dukung lapisan.

Verifikasi ini memastikan bahwa rancangan perkerasan yang dihitung menggunakan metode Bina Marga 2024 aman, efisien, dan sesuai dengan prinsip mekanistik-lentur.

4.5.1 Tahap Metode Bina Marga 2024

Berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan No. 03/M/BM/2024 atau sering disebut sebagai Bina Marga 2024, menjelaskan mengenai tahapan dari desain perkerasan jalan. Berikut merupakan tahapan dalam desain perkerasan jalan berdasarkan metode Bina Marga 2024:

1. Melakukan penentuan umur rencana (UR).
2. Menganalisis data lalu lintas harian rerata tahunan (LHRT).
3. Menentukan faktor pertumbuhan lalu lintas.
4. Menentukan faktor ekuivalen beban.
5. Menganalisis perhitungan *cumulative equivalent single axle load* (CESAL).
6. Menentukan desain perkerasan yang akan dijadikan sebagai alternatif

4.5.2 Tahap Analisis Menggunakan WinJULEA

WinJULEA adalah perangkat lunak mekanistik-empiris untuk menganalisis perkerasan lentur. Analisis menggunakan WinJULEA bertujuan untuk mengevaluasi tegangan, regangan, dan umur perkerasan berdasarkan beban lalu lintas. Berdasarkan FPInnovations (2020), tahapan dalam melakukan analisis menggunakan WinJULEA sebagai berikut:

1. *Input* data lapisan: Masukkan jumlah lapisan, ketebalan, dan sifat material.
2. *Input* data beban: Masukkan beban kendaraan, tekanan ban, dan konfigurasi roda.

3. Tentukan titik perhitungan dan kedalaman analisis: Untuk mendapatkan profil tegangan dan regangan di setiap lapisan.
4. Proses perhitungan: WinJULEA menghitung distribusi tegangan dan regangan berdasarkan teori elastis *multilayer*.
5. *Output* hasil: Menampilkan tegangan sumbu horizontal, regangan tarik dan grafik distribusi tegangan/regangan untuk evaluasi performa perkerasan.

4.5.3 Tahap Analisis Menggunakan KENPAVE

KENPAVE adalah perangkat lunak mekanistik yang digunakan untuk menganalisis perkerasan lentur maupun kaku. Analisis dengan KENPAVE menekankan pada evaluasi regangan, tegangan, dan umur perkerasan untuk memastikan kinerja struktural sesuai standar. Berdasarkan Huang (2004), tahapan dalam melakukan analisis perkerasan lentur jalan dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Penentuan data material
 - a. Menentukan jenis material dan tebal desain awal perkerasan berdasarkan standar Bina Marga atau literatur
 - b. Mengestimasi modulus elastisitas (E) tiap lapisan perkerasan berdasarkan hasil uji laboratorium atau referensi literatur.
 - c. Menentukan *poisson's ratio* (ν) untuk setiap lapisan, digunakan dalam perhitungan tegangan-lentur.
2. Analisis data lalu lintas
 - a. Mengumpulkan data volume kendaraan, jenis kendaraan, dan distribusi sumbu.
 - b. Menghitung ESAL (*equivalent standard axle load*) dan menentukan periode desain perkerasan.
3. Pemodelan struktur perkerasan
 - a. Membuka program KENPAVE-KENLAYER dan membuat model lapisan perkerasan sesuai data material.
 - b. Menentukan jumlah lapisan (Z), jenis respons yang dianalisis (defleksi, tegangan, regangan), dan satuan yang digunakan.
4. *Input* detail lapisan perkerasan
 - a. Menentukan jumlah poin pengamatan dan jarak vertikal antar titik.

- b. Memasukkan tebal tiap lapisan, modulus elastisitas (E), dan *poisson's ratio* tiap lapisan.
- 5. Interaksi antar lapisan
 - a. Menentukan *bounded/unbounded* antar lapisan untuk memodelkan ikatan antar material.
 - b. Memastikan model mewakili kondisi nyata di lapangan.
- 6. *Input* beban lalu lintas
 - a. Memasukkan jumlah periode beban, nilai modulus elastisitas, dan karakteristik beban kendaraan.
 - b. Menentukan tipe dan distribusi beban, serta periode desain sesuai standar.
- 7. Analisis dan simulasi
 - a. Program KENPAVE-KENLAYER melakukan perhitungan defleksi permukaan, regangan lentur pada permukaan, dan regangan vertikal di tanah dasar.
 - b. Hasil digunakan untuk mengevaluasi ketahanan terhadap retak lentur, penurunan permanen, dan umur perkerasan.
- 8. Evaluasi hasil
 - a. Membandingkan hasil dengan batas kritis tegangan dan regangan.
 - b. Melakukan optimasi desain lapisan jika defleksi atau regangan melebihi batas aman.
 - c. Menyusun rekomendasi ketebalan perkerasan yang memenuhi standar keselamatan dan ketahanan.

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Penelitian

Dalam sebuah penelitian, data merupakan unsur utama yang menentukan kualitas hasil analisis. Keandalan suatu penelitian sangat bergantung pada tingkat validitas dan konsistensi data yang digunakan. Menurut Sugiyono (2013), data dapat dipahami sebagai kumpulan fakta atau angka yang memberikan gambaran mengenai suatu fenomena tertentu, yang kemudian diproses menjadi informasi untuk menjawab permasalahan penelitian.

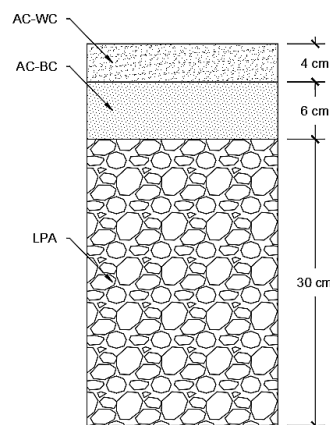
Data umumnya dibedakan menjadi dua kategori, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh secara langsung melalui survei, wawancara, atau eksperimen, sedangkan data sekunder diperoleh dari instansi atau dokumen resmi yang telah tersedia sebelumnya. Dalam penelitian ini, seluruh data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PUPESDM) Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta pada tahun 2024.

Data sekunder dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar utama untuk menganalisis kondisi perkerasan jalan pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem. Pemilihan data sekunder bukan hanya karena praktis, tetapi juga karena lebih sesuai untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi jalan dan lalu lintas pada lokasi penelitian. Menurut Mahajan, dkk. (2022), data publik yang bersumber dari instansi pemerintah dapat meningkatkan keandalan hasil analisis transportasi karena biasanya sudah dikumpulkan dengan prosedur baku dan standarisasi. Hal ini relevan dengan penelitian ini, mengingat data ketebalan perkerasan dan lalu lintas diperoleh dari PUPESDM D.I. Yogyakarta yang memang bertugas melakukan pencatatan, pengawasan, dan penyediaan data jalan di wilayah tersebut. Dengan menggunakan data sekunder ini, analisis yang dilakukan terhadap tebal perkerasan *existing* dan perhitungan beban lalu lintas menjadi lebih valid, karena bersandar

pada sumber resmi yang dapat dipertanggungjawabkan secara akademis maupun teknis.

5.1.1 Struktur dan Tebal Perkerasan *Existing*

Berdasarkan data sekunder yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PUPESDM) Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta pada tahun 2024, struktur perkerasan *existing* pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan aus *Asphalt Concrete – Wearing Course* (AC-WC), lapisan pengikat *Asphalt Concrete – Binder Course* (AC-BC), dan lapisan fondasi agregat (LPA). Jalan ini dikategorikan sebagai jalan kolektor primer sesuai dengan Peraturan Daerah Sleman No.13 Tahun 2021 Pasal 10 Ayat 4, dengan konfigurasi 2 lajur 2 arah (2/2TT). Rincian tebal lapisan dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Tebal Lapisan Perkerasan *Existing*

Sumber : PUPESDM D.I. Yogyakarta (2021)

Masing-masing lapisan memiliki fungsi spesifik yang saling melengkapi. Lapisan aus (AC-WC) berperan menerima beban kendaraan secara langsung, melindungi struktur di bawahnya dari kerusakan akibat air, serta meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan. Lapisan pengikat (AC-BC) berfungsi menyalurkan beban dari lapisan aus menuju fondasi agregat sekaligus memperkuat ikatan antar lapisan. Adapun lapisan fondasi agregat (LPA) menjadi elemen utama yang mendistribusikan beban ke tanah dasar (*subgrade*) sehingga keseluruhan struktur perkerasan tetap stabil dan mampu menopang lalu lintas berat.

Berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024 yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga, ketebalan lapisan perkerasan pada dasarnya tidak ditentukan secara langsung, tetapi dihitung berdasarkan faktor-faktor seperti fungsi jalan, volume lalu lintas rencana, serta kondisi tanah dasar. Artinya, angka ketebalan lapisan yang dipakai harus merupakan hasil dari proses desain sesuai prosedur dalam pedoman tersebut.

Di sisi lain, pada tahap pelaksanaan konstruksi, Bina Marga juga mengeluarkan Spesifikasi Khusus (SKh) yang berfungsi sebagai acuan teknis di lapangan. Dokumen ini menetapkan tebal nominal minimum untuk setiap jenis lapisan perkerasan agar kualitas dan daya tahan jalan tetap terjamin. Dalam SKh-3.6.3.2.1 disebutkan bahwa lapisan aus AC-WC memiliki tebal minimal 4 cm, sedangkan lapisan antara AC-BC minimal 6 cm.

Dengan mengacu pada kedua dokumen tersebut, hasil desain pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 yang menunjukkan ketebalan AC-WC 4 cm dan AC-BC 6 cm dapat dinyatakan sesuai. Nilai tersebut tidak hanya memenuhi standar minimum spesifikasi, tetapi juga sejalan dengan prinsip desain yang diatur dalam MDP 2024. Oleh karena itu, ketebalan yang diperoleh dapat digunakan secara teknis baik dari sisi perencanaan maupun pelaksanaan.

Untuk lapisan fondasi agregat (LPA), MDP 2024 tidak menetapkan angka baku, melainkan disesuaikan dengan fungsi jalan dan besarnya beban lalu lintas. Namun, Hardiyatmo (2015) menjelaskan bahwa dalam praktiknya ketebalan LPA biasanya berada pada rentang 20-30 cm. Pada ruas dengan volume lalu lintas cukup tinggi, penggunaan tebal maksimum 30 cm adalah pilihan tepat karena mampu meningkatkan daya dukung dan memperpanjang umur perkerasan.

Sejalan dengan itu, Huang (2004) dalam bukunya *Pavement Analysis and Design* menegaskan bahwa lapisan fondasi berfungsi penting dalam menyebarkan tegangan ke tanah dasar serta mengurangi risiko deformasi permanen. Hal ini menunjukkan bahwa ketebalan fondasi yang memadai sangat memengaruhi ketahanan jangka panjang perkerasan.

Berdasarkan pedoman MDP 2024, spesifikasi Bina Marga, serta literatur Hardiyatmo dan Huang, maka struktur perkerasan *existing* pada Ruas Jalan

Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16, dapat dinyatakan sesuai dengan prinsip teknis perencanaan. Oleh karena itu, kondisi *existing* layak dijadikan dasar dalam evaluasi kinerja perkerasan pada penelitian ini.

5.1.2 Data Lalu Lintas

Data lalu lintas merupakan salah satu komponen penting dalam evaluasi perkerasan jalan karena langsung memengaruhi desain ketebalan lapisan dan umur layan perkerasan. Dalam penelitian ini, data lalu lintas diperoleh dari PUPESDM Daerah Istimewa Yogyakarta, berupa hasil survei pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 pada tahun 2024 dengan durasi pengamatan selama 34 menit. Hasil survei lalu lintas dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Data Lalu Lintas Tahun 2024

Jenis Kendaraan	Golongan	Data Lalu Lintas
Mobil	2	237
Pikap	4	18
Bus Kecil	5A	1
Bus Besar	5B	6
Truk Mikro	4	1
Truk Kecil	6A	0
Truk Sedang	6B	2
Truk Besar	7A1	3
Truk Trailer	7B1	0
Truk Trailer Besar	7C1	2

Sumber : PUPESDM D.I. Yogyakarta (2024)

Menurut AASHTO (2011), karakteristik lalu lintas seperti volume kendaraan, distribusi tiap golongan kendaraan, dan faktor pertumbuhan tahunan merupakan variabel kunci dalam penentuan performa perkerasan lentur. Data lalu lintas yang akurat membantu dalam memperkirakan tegangan serta deformasi pada setiap lapisan perkerasan, sekaligus memprediksi potensi kerusakan berupa retak lelah (*fatigue cracking*), *rutting* dan deformasi permanen.

Selain itu, literatur internasional yang dibahas oleh Huang (2004) menegaskan bahwa data lalu lintas harus diolah ke dalam bentuk beban ekuivalen sumbu tunggal (ESAL/ESA) agar dapat dijadikan dasar perhitungan umur rencana perkerasan secara lebih realistis. Prinsip ini sejalan dengan Manual Desain

Perkerasan Jalan (MDP) Bina Marga, yang mengatur bahwa perhitungan ketebalan lapisan tidak ditetapkan secara langsung, melainkan bergantung pada kombinasi data lalu lintas, kondisi tanah dasar, dan faktor lingkungan.

Dengan demikian, data lalu lintas *existing* pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 dapat dianggap memadai sebagai dasar analisis ketahanan dan kinerja perkerasan, serta dapat dipertanggungjawabkan secara teknis karena bersumber dari instansi resmi dan didukung oleh pedoman perkerasan nasional maupun internasional.

5.2 Analisis Perkerasan Menggunakan Metode Bina Marga 2024

Analisis perkerasan lentur pada ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 dilakukan dengan menggunakan pendekatan mekanistik-empiris sesuai dengan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024 yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga. Metode ini mengintegrasikan data teknis jalan, karakteristik tanah dasar, dan data lalu lintas untuk menentukan struktur perkerasan yang optimal dalam mendukung kinerja jalan selama umur rencana.

5.2.1 Penentuan Umur Rencana

Umur rencana perkerasan adalah periode waktu perkerasan dirancang untuk berfungsi secara optimal tanpa memerlukan perbaikan struktural besar. Berdasarkan MDP Bina Marga 2024, umur rencana ditentukan berdasarkan jenis perkerasan. Untuk perkerasan lentur pada Tabel 3.1, menetapkan umur rencana 20 tahun.

Penentuan umur rencana ini penting karena menjadi dasar perhitungan beban kumulatif yang diterima perkerasan selama masa layan, serta memengaruhi ketebalan lapisan perkerasan yang akan dirancang. Dengan menetapkan umur rencana 20 tahun, struktur perkerasan dapat direncanakan agar mampu menahan repetisi beban kendaraan secara optimal hingga akhir periode desain.

5.2.2 Perhitungan Data Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR)

Data lalu lintas harian merupakan parameter penting dalam perencanaan dan desain perkerasan jalan. Beban kendaraan yang melewati jalan memengaruhi kinerja struktural dan umur layanan perkerasan. Oleh karena itu, perhitungan Lalu

Lintas Harian Rata-rata (LHR) menjadi langkah awal sebelum melakukan analisis beban kumulatif (CESAL) dan perancangan ketebalan perkerasan. Pada penelitian ini, data lalu lintas ditunjukkan pada Tabel 5.1 yang diperoleh dari PUPESDM DIY di Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16, dengan durasi pengamatan 34 menit. Durasi pengamatan ini dilakukan pada jam sibuk (*peak hour*), yang merupakan periode dengan volume kendaraan tertinggi dalam sehari. Pengamatan pada jam sibuk ini memberikan gambaran yang representatif tentang kondisi lalu lintas harian secara keseluruhan.

Pengamatan dalam hitungan menit, seperti yang dilakukan dalam survei ini, sering digunakan pada jam sibuk karena pada periode tersebut lalu lintas lebih padat dan mencerminkan kondisi puncak dari volume kendaraan harian. Meskipun hanya berlangsung selama 34 menit, survei semacam ini tetap memberikan estimasi yang valid. Sebagaimana dijelaskan dalam studi oleh Gupta, dkk. (2022), survei volume lalu lintas dapat dilakukan dalam hitungan menit, jam, maupun hari untuk memperoleh estimasi yang valid, asalkan dilakukan pada waktu yang tepat, seperti jam sibuk, dan dengan prosedur pengamatan yang sistematis. Oleh karena itu, hasil pengamatan 34 menit ini dapat digunakan untuk menghitung LHR yang dapat mencerminkan kondisi lalu lintas harian dengan akurat. Lalu lintas harian rata-rata (LHR) dihitung berdasarkan jumlah kendaraan yang terhitung selama survei dan dikonversi menjadi jumlah kendaraan per hari. Perhitungan LHR dilakukan menggunakan persamaan 5.1.

$$\text{LHR} = \frac{\text{Jumlah Lalu Lintas Selama Pengamatan}}{\text{Durasi Pengamatan (hari)}} \quad (5.1)$$

Dalam penelitian ini, survei dilakukan selama 34 menit sehingga durasi pengamatan perlu dikonversikan ke dalam satuan hari dengan cara sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Durasi Survei} &= 34 \text{ menit} \\ &= 34 \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{24} \\ &= 0,024 \text{ hari} \end{aligned}$$

Perhitungan LHR dilakukan untuk masing-masing golongan kendaraan. Sebagai contoh perhitungan LHR 2024 untuk Kendaraan Golongan 2, sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{LHR 2024}_{\text{Gol.2}} &= \frac{\text{Jumlah Lalu Lintas Selama Pengamatan untuk Kendaraan Gol.2}}{\text{Durasi Pengamatan}} \\
 &= \frac{237}{0,024} \\
 &= 10.038 \text{ kend./hari}
 \end{aligned}$$

Dengan prosedur yang sama, diperoleh rekapitulasi LHR 2024 untuk seluruh golongan kendaraan seperti pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Perhitungan LHR 2024

Jenis Kendaraan	Golongan	Data Lalu Lintas	LHR 2024 (kend./hari)
Mobil	2	237	10.038
Pikap	4	18	763
Bus Kecil	5A	1	43
Bus Besar	5B	6	255
Truk Mikro	4	1	42
Truk Sedang	6B	2	85
Truk Besar	7A2	3	128
Truk Trailer Besar	7C1	2	85

Berdasarkan hasil perhitungan, terlihat bahwa kendaraan ringan seperti mobil mendominasi jumlah lalu lintas harian, sementara kendaraan berat jumlahnya lebih sedikit tetapi berpengaruh signifikan terhadap kondisi struktural perkerasan. LHR yang diperoleh ini menjadi dasar untuk proyeksi lalu lintas tahun rencana, perhitungan CESAL faktual dan normal, serta perancangan ketebalan lapisan perkerasan sesuai pedoman Bina Marga 2024. Dengan cara ini, data LHR tidak hanya merepresentasikan kondisi saat ini tetapi juga memberikan informasi yang dapat dipertanggungjawabkan secara teknis dalam evaluasi dan perencanaan perkerasan jalan.

5.2.3 Penentuan Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas

Faktor pertumbuhan lalu lintas (i) merupakan parameter penting dalam perencanaan dan desain perkerasan jalan. Nilai ini digunakan untuk memperkirakan

perkembangan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) dari tahun pengamatan ke tahun rencana, sehingga desain perkerasan dapat menahan beban kendaraan kumulatif selama umur rencana. Dengan demikian, akurasi dalam menentukan faktor pertumbuhan lalu lintas sangat berpengaruh terhadap hasil perencanaan tebal perkerasan.

Pertumbuhan lalu lintas sendiri dipengaruhi oleh beberapa aspek, seperti pertumbuhan jumlah penduduk, peningkatan kepemilikan kendaraan bermotor, perkembangan ekonomi wilayah, serta kegiatan sosial dan logistik di sekitar jalan. Pada daerah perkotaan atau semi-urban, laju pertumbuhan lalu lintas biasanya lebih tinggi dibandingkan wilayah rural (Rahman, dkk., 2021).

Penentuan faktor pertumbuhan lalu lintas mengacu pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024. Berdasarkan Tabel 3.3, untuk daerah Jawa dengan kategori jalan kolektor rural, nilai faktor pertumbuhan lalu lintas ditetapkan sebesar 3,5% per tahun. Jalan kolektor rural berfungsi untuk menghubungkan berbagai pusat kegiatan di daerah pedesaan dengan jalan arteri yang lebih besar. Meskipun volume lalu lintasnya lebih rendah dibandingkan jalan arteri, jalan kolektor rural tetap menunjukkan peningkatan seiring dengan pergerakan barang dan orang antar pusat kegiatan. Nilai standar faktor pertumbuhan ini dipilih karena sudah sesuai dengan karakteristik lalu lintas pada jalan kolektor rural, yang memiliki laju pertumbuhan lebih moderat dibandingkan dengan jalan arteri. Penggunaan angka 3,5% per tahun dari MDP 2024 memberikan acuan yang konsisten dan sesuai dengan standar nasional yang berlaku, sehingga perhitungan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) dapat dilakukan dengan tepat dan representatif terhadap kondisi lalu lintas harian.

Keunggulan menggunakan nilai faktor pertumbuhan lalu lintas dari MDP 2024 terletak pada kesesuaiannya dengan standar nasional yang telah diuji dan diterapkan di berbagai proyek perencanaan jalan di Indonesia. Nilai ini memberikan keseragaman dalam perhitungan, yang memudahkan perbandingan antar proyek dan menjaga konsistensi dalam perancangan perkerasan jalan di seluruh Indonesia. Dengan menggunakan nilai yang sudah ditetapkan dalam pedoman nasional, analisis yang dilakukan dapat diandalkan dan lebih mudah diterima oleh pihak

terkait, serta meminimalkan potensi perbedaan hasil yang dapat timbul akibat penggunaan angka yang tidak ter-standarisasi.

Faktor pertumbuhan ini digunakan untuk memproyeksikan LHR dari tahun pengamatan ke tahun rencana menggunakan Persamaan 5.2:

$$LHR_t = LHR_0 \times (1 + i)^t \quad (5.2)$$

dimana :

LHR_0 = Lalu lintas harian rata-rata pada tahun dasar survei,

LHR_t = Lalu lintas harian rata-rata pada tahun ke - t ,

i = Faktor pertumbuhan lalu lintas (%),

t = selisih tahun antara tahun rencana dengan tahun survei.

Dalam konteks penelitian ini, data lalu lintas diperoleh melalui survei pada tahun 2024 sebagai tahun dasar. Kemudian, proyeksi LHR dilakukan untuk tahun 2025 (tahun penelitian) dan tahun 2028 (tahun normal) menggunakan faktor pertumbuhan sebesar 3,5% per tahun. Dengan metode ini, diperoleh gambaran perkembangan volume lalu lintas pada periode analisis, sehingga beban lalu lintas kumulatif yang akan diterima jalan selama umur rencana dapat dihitung dengan lebih akurat.

Hasil proyeksi ini sejalan dengan beberapa penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa pertumbuhan lalu lintas di wilayah perkotaan dan semi-urban di Asia, khususnya di negara berkembang, berkisar antara 3–4% per tahun. Misalnya, penelitian oleh Pamujianto, dkk. (2024) di Kota Yogyakarta menunjukkan bahwa penambahan kendaraan bermotor di Yogyakarta meningkat rata-rata sekitar 4% per tahun, terutama untuk sepeda motor. Sementara itu, studi oleh Putro, dkk. (2023) mengenai pertumbuhan lalu lintas di Provinsi DIY juga mencatatkan angka pertumbuhan kendaraan tahunan sekitar 5,29% per tahun di beberapa ruas jalan arteri perkotaan.

Namun, dalam penelitian ini, faktor pertumbuhan sebesar 3,5% per tahun dipilih sebagai nilai konservatif yang lebih representatif untuk seluruh wilayah DIY. Hal ini karena angka 5,29% yang ditemukan di beberapa ruas jalan arteri perkotaan lebih relevan untuk jalan-jalan dengan tingkat kepadatan tinggi. Selain

itu, angka 3,5% berada dalam rentang yang realistis berdasarkan temuan studi-studi sebelumnya di Indonesia yang mencatatkan pertumbuhan volume lalu lintas sekitar 3–4% per tahun. Oleh karena itu, penggunaan faktor pertumbuhan sebesar 3,5% per tahun dianggap tepat dan sesuai dengan pedoman nasional (MDP 2024)..

5.2.4 Menentukan Faktor Ekuivalen Beban (VDF)

Faktor Ekuivalen Beban atau *Vehicle Damage Factor* (VDF) merupakan parameter penting dalam perencanaan perkerasan jalan karena digunakan untuk menyetarakan berbagai jenis kendaraan ke dalam sumbu standar ekuivalen (*Equivalent Standard Axle/ESA*) dengan beban 18 ton. Setiap jenis kendaraan memiliki dampak yang berbeda terhadap kerusakan perkerasan, sehingga diperlukan suatu faktor konversi yang mampu mengubah jumlah kendaraan campuran menjadi satuan beban standar yang seragam. Dengan adanya penyetaraan ini, perhitungan beban kumulatif lalu lintas (CESA) dapat dilakukan dengan lebih akurat sehingga rancangan tebal perkerasan benar-benar sesuai dengan kondisi lalu lintas yang ada.

Dalam penelitian ini, penentuan nilai VDF mengacu langsung pada Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024 yang diterbitkan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga. Dokumen tersebut menyediakan data VDF per provinsi yang disusun berdasarkan hasil survei *Weigh-In-Motion* (WIM) dan kajian lalu lintas regional. Dengan mempertimbangkan lokasi penelitian yang berada di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, maka nilai VDF yang digunakan tidak diambil secara umum, melainkan bersumber dari tabel khusus untuk provinsi ini. Untuk mempermudah analisis, data VDF tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.6 yang merupakan ekstraksi langsung dari Lampiran H MDP 2024.

Penggunaan Tabel 3.6 dari Lampiran H memiliki alasan yang jelas. Pertama, data tersebut merupakan hasil penelitian resmi pemerintah yang dilakukan secara komprehensif menggunakan peralatan WIM yang mampu merekam beban sumbu kendaraan secara akurat. Kedua, karena penelitian ini berfokus pada ruas jalan di wilayah DIY, maka penggunaan data VDF yang spesifik untuk provinsi ini akan memastikan hasil analisis lebih representatif terhadap kondisi lalu lintas lokal. Ketiga, ketiadaan data WIM primer pada lokasi penelitian menjadikan penggunaan

Lampiran H MDP 2024 sebagai pilihan metodologis yang paling tepat, sah, dan dapat dipertanggungjawabkan.

Tujuan utama penggunaan data VDF dari Lampiran H adalah untuk memastikan bahwa konversi jumlah kendaraan menjadi ESA benar-benar menggambarkan kondisi riil lalu lintas di Provinsi DIY. Hal ini penting karena apabila digunakan nilai rata-rata nasional atau data dari provinsi lain, maka hasil perhitungan CESA berpotensi menyimpang dan berimplikasi pada rancangan tebal perkerasan yang tidak sesuai. Melalui penggunaan VDF lokal, rancangan perkerasan jalan dapat dibuat lebih efisien, tidak berlebihan dan tidak pula kurang, sehingga mampu mencapai umur rencana yang ditetapkan.

Manfaat lain dari penggunaan Tabel 3.6 ini adalah keandalan data yang kuat secara akademis maupun praktis. Karena bersumber dari dokumen resmi Bina Marga, maka data yang digunakan terbebas dari unsur asumsi subjektif peneliti. Hal ini tidak hanya memperkuat validitas penelitian, tetapi juga memberikan kepastian bahwa hasil analisis lalu lintas dan desain perkerasan benar-benar sesuai dengan standar nasional. Dengan demikian, seluruh tahapan perhitungan dalam penelitian ini memiliki dasar metodologi yang kokoh dan dapat dipertanggungjawabkan di hadapan dewan penguji.

Berdasarkan uraian tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan VDF dari Lampiran H MDP 2024 yang dituangkan kembali pada Tabel 3.6 laporan ini merupakan langkah yang tepat, karena secara langsung menyesuaikan dengan kondisi lalu lintas Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Dengan pendekatan ini, hasil analisis beban lalu lintas diyakini lebih akurat, rancangan tebal perkerasan lebih efisien, serta penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan baik secara ilmiah maupun praktis.

5.2.5 Analisis Perhitungan *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL)

Perhitungan *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL) bertujuan untuk mengetahui besarnya beban lalu lintas ekuivalen yang akan diterima oleh perkerasan jalan selama umur rencana. Nilai CESAL ini sangat penting karena menjadi dasar dalam penentuan tebal perkerasan yang mampu menahan beban lalu lintas. Dengan kata lain, semakin besar nilai CESAL, maka tebal lapisan perkerasan

yang dibutuhkan juga semakin tinggi agar dapat menjamin umur pelayanan jalan sesuai yang direncanakan.

Perhitungan CESAL ini dilakukan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 serta diperkuat oleh kajian terbaru seperti penelitian Richard dan Mpele (2023) yang menggunakan metode prediksi CESAL sebagai *input* struktur perkerasan. Putra, dkk., (2022) yang menjelaskan bahwa analisis beban lalu lintas ekuivalen sangat berpengaruh terhadap estimasi umur rencana jalan.

Perhitungan CESAL dilakukan secara bertahap. Pertama, ditentukan nilai Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) untuk tahun analisis (2025) berdasarkan data survei tahun 2024 dengan menggunakan faktor pertumbuhan lalu lintas. Selanjutnya, dilakukan proyeksi LHR untuk tahun normal (2028) yang merupakan awal tahun normal dalam kajian ini. Perhitungan proyeksi LHR untuk tahun analisis dan tahun normal menggunakan Persamaan 5.2.

Dalam penelitian ini, analisis lalu lintas dibagi ke dalam dua periode utama, yaitu periode faktual dan periode normal. Periode faktual digunakan untuk menggambarkan kondisi lalu lintas jangka pendek yang masih sangat dekat dengan data survei. Pada penelitian ini, periode faktual ditetapkan sejak tahun 2025 hingga tahun 2028, dengan data awal berasal dari survei lalu lintas pada tahun 2024 sebagai tahun dasar. Perhitungan dalam periode ini bertujuan untuk memperlihatkan perkembangan volume lalu lintas aktual setelah tahun survei. Sementara itu, periode normal digunakan untuk melihat perkembangan lalu lintas dalam jangka panjang sesuai umur rencana perkerasan jalan. Dalam penelitian ini, periode normal ditetapkan dari tahun 2028 hingga tahun 2045.

Perhitungan proyeksi LHR untuk awal tahun faktual (2025) dilakukan dengan menggunakan Persamaan 5.2, dimana nilai t merupakan selisih dari tahun survei (2024) dengan awal tahun faktual (2025) yaitu satu tahun. Sehingga didapatkan Persamaan 5.3 untuk menghitung LHR 2025 sebagai berikut :

$$LHR_{2025} = LHR_{2024} \times (1 + 3,5\%)^1 \quad (5.3)$$

Untuk proyeksi LHR awal tahun normal (2028) dengan cara yang sama, namun nilai t merupakan selisih dari tahun survei (2024) dengan awal tahun normal

(2028) yaitu empat tahun. Sehingga didapatkan Persamaan 5.4 untuk menghitung LHR 2028 sebagai berikut :

$$\text{LHR}_{2028} = \text{LHR}_{2024} \times (1 + 3,5\%)^4 \quad (5.4)$$

Dengan demikian, berdasarkan data LHR 2024 yang tercantum pada Tabel 5.2 dan dengan menggunakan Persamaan 5.3 serta Persamaan 5.4, dapat dilakukan proyeksi menjadi data LHR 2025 dan data LHR 2028. Hasil proyeksi data LHR dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Rekapitulasi Perhitungan LHR 2025 dan LHR 2028

Golongan	Data Lalu Lintas	LHR 2024	i (%)	LHR 2025	LHR 2028
2	237	10.038	3,5	10.389	11.519
4	19	805	3,5	833	924
5A	1	43	3,5	45	49
5B	6	255	3,5	264	293
6B	2	85	3,5	88	98
7A2	3	128	3,5	132	147
7C1	2	85	3,5	88	98

Berdasarkan Tabel 5.3, memperlihatkan hasil proyeksi LHR tahun 2025 dan 2028 yang dihitung menggunakan tingkat pertumbuhan lalu lintas sebesar 3,5% per tahun. Pertumbuhan ini bersifat majemuk (*compound growth*), artinya setiap tahun volume lalu lintas tidak hanya bertambah sebesar 3,5% dari nilai awal, tetapi juga bertambah dari hasil pertumbuhan tahun sebelumnya. Dengan kata lain, nilai LHR tahun berikutnya selalu menjadi dasar perhitungan untuk tahun selanjutnya. Hal ini dapat dilihat pada proyeksi LHR 2028, di mana selisihnya lebih besar dibandingkan proyeksi LHR 2025 meskipun persentase pertumbuhannya sama, yaitu 3,5% per tahun. Sebagai contoh, pada Golongan 2 nilai LHR tahun 2024 sebesar 10.038 meningkat menjadi 10.389 pada tahun 2025, kemudian terus bertambah menjadi 11.519 pada tahun 2028. Peningkatan dari 2024 ke 2025 hanya sekitar 351 kendaraan per hari, sedangkan dari 2024 ke 2028 mencapai 1.481 kendaraan per hari. Perbedaan ini menunjukkan bahwa semakin panjang periode proyeksi, semakin besar akumulasi kenaikan lalu lintas akibat pengaruh pertumbuhan majemuk. Fenomena yang sama juga terlihat pada golongan kendaraan berat,

misalnya Golongan 5B yang naik dari 255 kendaraan per hari (2024) menjadi 264 (2025) dan terus bertambah menjadi 293 (2028). Kondisi ini sejalan dengan temuan Richard, dkk. (2023) yang menegaskan bahwa pendekatan pertumbuhan majemuk lebih akurat dibandingkan pertumbuhan linier karena mampu menggambarkan beban kumulatif secara realistis dalam desain jangka panjang.

Setelah diperoleh proyeksi LHR untuk tahun faktual (2025) dan tahun normal (2028), tahap selanjutnya adalah menghitung nilai faktor pengali kumulatif atau R. Tahun faktual (2025) merujuk pada data lalu lintas yang diperoleh melalui survei yang dilakukan pada tahun 2024, dan digunakan untuk menggambarkan kondisi lalu lintas yang ada pada tahun 2025. Sementara itu, tahun normal (2028) adalah proyeksi kondisi lalu lintas di masa depan, yang dihitung berdasarkan estimasi pertumbuhan lalu lintas hingga tahun 2028. Nilai R digunakan untuk mengakumulasi pertumbuhan lalu lintas selama periode analisis, baik pada periode faktual maupun periode normal. Dengan kata lain, R menggambarkan berapa kali lipat volume lalu lintas harian pada awal periode akan berkembang jika dihitung secara kumulatif hingga akhir periode umur rencana. Perhitungan nilai R ini dilakukan menggunakan Persamaan 3.1 yang diperoleh dari Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024.

Dalam pedoman Bina Marga 2024, pemisahan antara tahun faktual dan tahun normal bertujuan untuk membedakan antara kondisi lalu lintas yang ada saat ini (tahun survei) dengan proyeksi perkembangan lalu lintas di masa depan. Tahun faktual digunakan untuk menggambarkan keadaan lalu lintas berdasarkan data yang ada, sedangkan tahun normal digunakan untuk memproyeksikan kondisi lalu lintas pada masa mendatang, setelah mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhannya, seperti pembangunan infrastruktur dan perubahan jumlah penduduk. Pemisahan ini juga mengikuti pedoman MDP 2024, yang menyarankan tahun normal ditetapkan 4 tahun setelah tahun faktual untuk memberikan gambaran realistis tentang proyeksi pertumbuhan lalu lintas dalam waktu yang cukup dekat. Tahun normal (2028) memberikan waktu yang cukup untuk merencanakan kapasitas jalan yang dapat mengakomodasi proyeksi

pertumbuhan lalu lintas, dengan mempertimbangkan perkembangan yang diperkirakan akan terjadi dalam periode tersebut.

Perhitungan nilai R untuk periode tahun faktual (2025-2028) dilakukan dengan menggunakan laju pertumbuhan lalu lintas tahunan sebesar 3,5%, dan nilai UR merupakan umur rencana dalam periode faktual yaitu tiga tahun. Sehingga perhitungan nilai R untuk periode faktual sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R_{\text{periode faktual}} &= \frac{(1+0,01 \times 3,5)^3 - 1}{0,01 \times 3,5} \\ &= 3,11 \end{aligned}$$

Perhitungan nilai R untuk periode tahun normal (2028-2045) dilakukan dengan menggunakan laju pertumbuhan lalu lintas tahunan yang sama yaitu 3,5%, dan nilai UR merupakan umur rencana dalam periode normal yaitu 17 tahun. Sehingga perhitungan nilai R untuk periode normal sebagai berikut:

$$\begin{aligned} R_{\text{periode normal}} &= \frac{(1+0,01 \times 3,5)^{17} - 1}{0,01 \times 3,5} \\ &= 22,71 \end{aligned}$$

Pada hasil perhitungan terlihat, pada periode faktual (2025–2028) nilai N hanya 3 tahun sehingga faktor pengali R lebih kecil, sedangkan pada periode normal (2028–2045) nilai N mencapai 17 tahun sehingga faktor R jauh lebih besar. Hal ini berarti semakin panjang periode perencanaan, semakin tinggi nilai R, sehingga beban lalu lintas kumulatif yang akan diterima perkerasan pun semakin besar. Konsep penggunaan R ini sejalan dengan penelitian Kurniawan dan Hadi (2024) yang menjelaskan bahwa faktor kumulatif lalu lintas sangat berpengaruh dalam menentukan nilai CESAL total, karena perbedaan kecil pada tingkat pertumbuhan dapat menghasilkan perbedaan besar pada beban kumulatif di akhir umur rencana. Sementara itu, studi internasional oleh Richard dan Mpele. (2023) juga menegaskan bahwa proyeksi beban lalu lintas dengan pendekatan pertumbuhan majemuk lebih akurat dibandingkan linier karena mampu menggambarkan akumulasi lalu lintas secara realistis. Selain itu, Sukirman (1999) dalam bukunya Perkerasan Lentur

Jalan Raya menekankan bahwa faktor kumulatif lalu lintas atau R merupakan parameter penting yang tidak boleh diabaikan dalam desain perkerasan, karena nilai inilah yang nantinya dipakai dalam menghitung total CESAL seluruh golongan kendaraan. Dengan demikian, perhitungan R baik pada periode faktual maupun periode normal menjadi langkah kunci untuk memastikan desain perkerasan sesuai dengan kondisi lalu lintas aktual maupun proyeksi jangka panjang.

Pada penelitian ini, nilai faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur (DL) ditetapkan masing-masing sebesar 50% (0,5) dan 100% (1,00). Penetapan nilai DD sebesar 0,5 didasarkan pada ketentuan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP 2024) yang menyebutkan bahwa untuk jalan dengan dua arah, lalu lintas kendaraan niaga dianggap terbagi rata pada kedua arah, sehingga hanya 50% dari total lalu lintas yang digunakan pada lajur desain. Sementara itu, nilai DL sebesar 100% diambil dari Tabel 3.4 yang didapat dari MDPJ 2024, karena ruas jalan yang ditinjau hanya memiliki satu lajur efektif per arah, sehingga seluruh kendaraan niaga yang masuk ke arah tersebut diasumsikan melewati lajur desain. Pemakaian DD dan DL dengan nilai tersebut bersifat wajib agar beban lalu lintas yang dihitung pada perencanaan tebal perkerasan tidak terdistorsi oleh asumsi distribusi yang keliru. Hal ini sejalan dengan penelitian Jongga, dkk., (2021), yang menunjukkan bahwa distribusi beban *axle* dan *overload* sangat berpengaruh untuk estimasi masa desain perkerasan. Di konteks Indonesia, penelitian oleh Cahyani dkk. (2023) juga mempertimbangkan ESAL kumulatif dan beban *overload* dalam menghitung umur rencana jalan. Dengan demikian, penggunaan DD = 50 % dan DL = 100 % pada penelitian ini sudah sesuai dengan referensi terbaru dan pedoman nasional.

Setelah semua data lalu lintas ditentukan, mulai dari LHR tahun dasar hingga tahun rencana, faktor pertumbuhan lalu lintas, distribusi arah (DD), dan distribusi lajur (DL), langkah selanjutnya adalah menghitung beban lalu lintas kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL). Perhitungan CESAL dilakukan dengan mengonversi setiap golongan kendaraan menjadi sumbu standar ekuivalen menggunakan *Vehicle Damage Factor* (VDF). VDF menunjukkan seberapa besar kontribusi tiap kendaraan terhadap kerusakan perkerasan, sehingga hasil CESAL merepresentasikan total beban lalu lintas yang diterima jalan selama umur rencana.

Dalam MDPJ 2024, CESAL dapat diekspresikan dalam bentuk CESAL pangkat 4 (CESAL4) dan CESAL pangkat 5 (CESAL5). CESAL4 digunakan pada metode desain lama, di mana hubungan antara jumlah sumbu ekuivalen dan kerusakan perkerasan dianggap mengikuti fungsi pangkat 4. Biasanya CESAL4 diterapkan untuk perencanaan tebal lapisan tipis, perkerasan berbutir tanpa penutup, serta *overlay*. Dengan pangkat 4, kontribusi beban tiap kendaraan terhadap keausan perkerasan dipertimbangkan secara empiris sehingga hasil perhitungan tetap konsisten dengan metode desain terdahulu. Sementara itu, CESAL5 digunakan pada metode desain terbaru yang mengacu pada pendekatan mekanistik-empiris, di mana hubungan antara beban kumulatif dan kerusakan perkerasan lebih sensitif terhadap kendaraan berat. CESAL5 diterapkan dalam perencanaan tebal lapisan dengan mempertimbangkan retak lelah (*fatigue*) pada perkerasan lentur, sehingga desain perkerasan menjadi lebih akurat dan sesuai dengan kondisi lalu lintas modern.

Penggunaan CESAL4 dan CESAL5 tidak mengubah proporsi kontribusi tiap golongan kendaraan, karena setiap golongan tetap dikalikan VDF masing-masing. Perubahan yang terjadi ialah sensitivitas perhitungan terhadap kerusakan perkerasan sesuai metode empiris yang dipakai. Hasil perhitungan CESAL4 dan CESAL5, dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut ini.

Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan CESAL4 dan CESAL5

Golongan	ESA4		ESA5	
	Faktual	Normal	Faktual	Normal
	2025 - 2028	2028 - 2045	2025 - 2028	2028 - 2045
2	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5A	0	0	0	0
5B	179.538,48	1.455.015,11	194.500,03	1.576.266,36
6B	189.512,85	444.587,95	264.320,55	404.170,86
7A2	480.646,82	1.947.628,06	796.071,29	2.434.535,08
7C1	319.179,53	1.737.934,71	448.846,21	2.142.105,57
Total ESA	1.168.877,68	5.585.165,82	1.703.738,08	6.557.077,88
CESAL	6.754.043,50		8.260.815,96	

Hasil perhitungan CESAL pada Tabel 5.4 menunjukkan kontribusi masing-masing golongan kendaraan terhadap beban kumulatif perkerasan jalan selama periode faktual (2025–2028) dan periode normal (2028–2045). Golongan kendaraan ringan seperti Golongan 2, 4, dan 5A memberikan kontribusi CESAL yang sangat kecil atau nol, baik untuk CESAL4 maupun CESAL5. Hal ini wajar karena kendaraan ringan tidak memberikan beban signifikan terhadap kerusakan perkerasan dibandingkan kendaraan berat. Sebaliknya, golongan kendaraan berat seperti 5B, 6B, 7A2, dan 7C1 menunjukkan kontribusi yang jauh lebih besar. Misalnya, pada periode faktual CESAL5, Golongan 7A2 memberikan kontribusi sebesar 796.071,29, sedangkan Golongan 7C1 sebesar 448.846,21. Kontribusi ini meningkat secara signifikan pada periode normal, di mana Golongan 7A2 mencapai 2.434.535,08 dan Golongan 7C1 sebesar 2.142.105,57, menggambarkan akumulasi beban kumulatif dari pertumbuhan lalu lintas jangka panjang.

Total CESAL yang diperoleh dari penjumlahan seluruh golongan kendaraan pada periode faktual adalah 1.168.877,68 untuk CESAL4 dan 1.703.738,08 untuk CESAL5, sedangkan pada periode normal meningkat menjadi 5.585.165,82 untuk CESAL4 dan 6.557.077,88 untuk CESAL5. Peningkatan ini jelas menunjukkan efek pertumbuhan lalu lintas majemuk dan panjangnya umur rencana jalan terhadap total beban yang diterima perkerasan. Dengan kata lain, kendaraan berat memberikan pengaruh dominan terhadap kerusakan jalan, dan semakin lama periode desain, semakin besar akumulasi CESAL, sehingga memerlukan ketebalan perkerasan yang lebih tinggi.

Peningkatan nilai CESAL sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Sujatmiko, dkk., (2025), yang menunjukkan bahwa kendaraan niaga, khususnya yang membawa muatan berlebih, berkontribusi signifikan terhadap kenaikan CESAL. Hal ini disebabkan oleh tingginya nilai *Vehicle Damage Factor* (VDF) pada kendaraan dengan muatan berlebih, yang berdampak langsung pada kerusakan perkerasan jalan. Selain itu, Pratama, dkk., (2025) menegaskan bahwa dalam perhitungan CESAL berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024, hanya kendaraan niaga dengan VDF lebih dari 0 yang diperhitungkan, sementara kendaraan penumpang tidak dimasukkan dalam perhitungan. Dengan

mempertimbangkan distribusi arah ($DD = 50\%$) dan distribusi lajur ($DL = 100\%$), nilai CESAL yang dihitung mencerminkan beban efektif total yang diterima oleh lajur desain, yang dapat digunakan sebagai dasar untuk menentukan ketebalan perkerasan yang sesuai guna memastikan umur rencana jalan dan mengurangi kerusakan struktural pada perkerasan tersebut.

5.3 Evaluasi Perkerasan *Existing*

Evaluasi perkerasan *existing* pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 dilakukan untuk menilai kinerja struktur perkerasan dalam menahan beban lalu lintas yang diterima. Proses evaluasi ini menggunakan dua aplikasi mekanistik-elastis, yaitu WinJULEA dan KENPAVE, yang memungkinkan analisis respons tegangan dan regangan pada tiap lapisan perkerasan akibat beban kendaraan.

Hasil dari evaluasi ini memberikan gambaran terkait ketahanan struktur perkerasan *existing*, serta potensi kerusakan yang dapat terjadi akibat beban berulang. Analisis yang dilakukan dengan kedua aplikasi ini memastikan struktur perkerasan *existing* dapat memenuhi standar kinerja yang ditetapkan dalam pedoman perencanaan jalan.

5.3.1 Evaluasi Perkerasan *Existing* Menggunakan Aplikasi WinJULEA

Evaluasi struktur perkerasan menggunakan WinJULEA merupakan salah satu pendekatan mekanistik-empiris untuk memperoleh respons tegangan dan regangan pada setiap lapisan perkerasan. WinJULEA (Jacob Uzan Layered Elastic Analysis) adalah program semi-analitis berlapis (*multilayer linear elastic*) yang mengaplikasikan teori elastis berlapis untuk menghitung respons perkerasan terhadap beban sumbu kendaraan. Keunggulan utama dari menggunakan WinJULEA adalah kemampuannya untuk menghitung dengan cepat respons tiap lapisan, mempertimbangkan interaksi antar lapisan, dan memungkinkan evaluasi terhadap berbagai alternatif desain struktur perkerasan.

Proses evaluasi dimulai dengan memasukkan data ketebalan lapisan, modulus elastis dan *poisson's ratio* tiap lapisan perkerasan. Data ketebalan lapisan perkerasan *existing* pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 diperoleh dari dokumen teknis yang tersedia, sedangkan nilai modulus elastisitas dan

poisson's ratio didapatkan berdasarkan literatur atau perhitungan standar yang relevan. Selanjutnya, WinJULEA menjalankan simulasi beban dan menghitung distribusi tegangan serta regangan pada lapisan-lapisan perkerasan. Sebagai contoh, analisis dilakukan untuk mengukur regangan horizontal di dasar aspal dan regangan vertikal pada permukaan *subgrade*.

Hasil simulasi ini digunakan untuk menilai efisiensi struktur perkerasan terhadap variasi beban lalu lintas yang diterapkan pada jalan tersebut. Hasil simulasi WinJULEA memberikan gambaran mengenai kinerja perkerasan *existing* dan menjadi dasar untuk verifikasi bahwa struktur perkerasan memenuhi batas kinerja sesuai dengan pedoman desain. Dalam penelitian Putri, dkk. (2022), WinJULEA dan KENPAVE digunakan untuk menyimulasikan skenario nyata pada jalan dengan volume lalu lintas tinggi dan menghasilkan data tegangan serta regangan untuk setiap lapisan perkerasan, yang selanjutnya digunakan untuk menilai kelayakan desain.

1. Data Input WinJULEA untuk Perkerasan *Existing*

Data *input* merupakan tahapan awal dalam proses evaluasi perkerasan menggunakan aplikasi WinJULEA. Pada tahap ini, seluruh informasi yang berkaitan dengan struktur perkerasan dimasukkan ke dalam program sebagai bentuk pemodelan kondisi lapisan jalan yang akan dianalisis. Data tersebut meliputi tebal tiap lapisan, nilai modulus elastisitas, serta *poisson's ratio* yang merepresentasikan sifat mekanik material penyusun perkerasan. Selain itu, parameter lalu lintas berupa beban sumbu ekuivalen standar juga digunakan sebagai acuan pembebanan, sehingga hasil perhitungan dapat menggambarkan respons nyata perkerasan terhadap beban kendaraan yang melintasi. Dengan memasukkan data ini secara akurat, program dapat menghasilkan simulasi distribusi tegangan, regangan, dan lendutan yang sesuai dengan kondisi lapangan, sehingga analisis kinerja perkerasan dapat dilakukan secara lebih representatif.

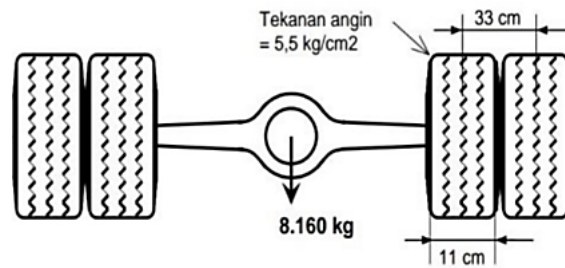
Ketebalan tiap lapisan perkerasan merupakan salah satu data utama yang dimasukkan dalam program WinJULEA, karena ketebalan sangat mempengaruhi distribusi tegangan dan regangan yang terjadi akibat beban

lalu lintas. Lapisan perkerasan umumnya terdiri dari lapis permukaan (*surface course*), lapis pengikat (*binder course*), lapis fondasi atas (*base course*), lapis fondasi bawah (*subbase course*), dan tanah dasar (*subgrade*). Ketebalan lapisan untuk lapisan perkerasan *existing* dapat dilihat pada Gambar 5.1. Data lain yang diperlukan ialah data karakteristik material berupa modulus elastisitas dan nilai *poisson's ratio*. Kedua parameter ini digunakan untuk menggambarkan sifat mekanik dari masing-masing lapisan perkerasan. Modulus elastisitas menunjukkan tingkat kekakuan material terhadap beban, sedangkan *poisson's ratio* merepresentasikan perbandingan antara regangan lateral dengan regangan aksial yang terjadi saat material menerima tekanan. Dengan memasukkan nilai modulus elastisitas dan *poisson's ratio* yang sesuai, pemodelan perkerasan pada WinJULEA dapat lebih akurat dalam menghitung distribusi tegangan dan regangan pada setiap lapisan. Tabel 5.5 merupakan data material yang digunakan untuk perkerasan *existing*.

Tabel 5.5 Data Material Lapisan *Existing*

Lapisan	Modulus Elastisitas (kPa)	<i>Poisson's Ratio</i>
AC-WC	1.100.000	0,4
AC-BC	1.200.000	0,4
LPA Kelas A	220.000	0,35
LPA Kelas B	170.000	0,35
LPA Kelas C	131.000	0,35
<i>Subgrade</i>	60.000	0,45

Selain data ketebalan dan karakteristik material, evaluasi perkerasan dengan WinJULEA juga memerlukan *input* pembebanan yang merepresentasikan beban standar kendaraan. Konfigurasi beban standar yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 5.2, dimana jarak antar roda ganda sebesar 330 mm. Beban acuan yang digunakan adalah *Single Axle Dual Tier* (SADT) dengan beban sumbu sebesar 80 kN (8,160 kg). Nilai ini kemudian dibagi merata ke empat roda, sehingga masing-masing roda menyumbangkan beban sebesar 20 kN.



Gambar 5.2 Konfigurasi Beban Sumbu Standar
(Sumber : Sukirman, 2010)

Selanjutnya, untuk menentukan luas kontak ban (*contact area*) digunakan perhitungan berdasarkan rumus Persamaan 5.5:

$$A = \frac{W}{p} \quad (5.5)$$

dengan:

A = luas bidang kontak ban (cm²),

W = beban roda (kN),

p = tekanan ban (kN/cm²).

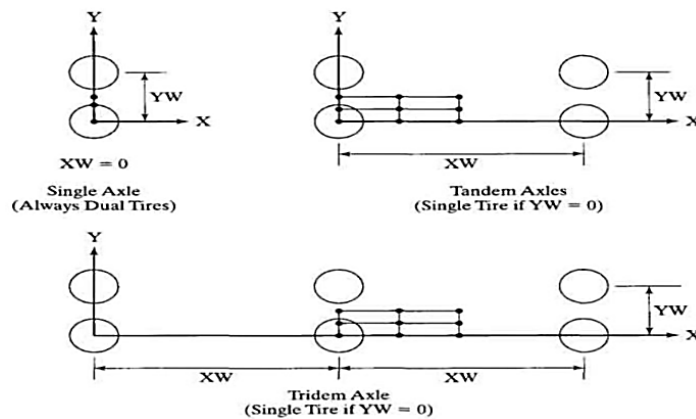
Dalam perhitungan tersebut digunakan nilai beban roda standar yaitu 20 kN dan nilai tekanan ban menggunakan tekanan standar yaitu 550 kPa atau 0,055 kN/cm². Sehingga didapatkan nilai area kontak (A) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A &= \frac{W}{p} \\ &= \frac{20}{0,055} \\ &= 363,636 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

Perhitungan luas kontak ini diperlukan agar distribusi tekanan yang diberikan roda terhadap permukaan perkerasan dapat dimodelkan dengan tepat, sehingga hasil analisis tegangan dan regangan yang dihitung oleh WinJULEA dapat mencerminkan kondisi pembebanan yang realistis di lapangan.

Dalam analisis menggunakan WinJULEA, selain data ketebalan, sifat material, dan pembebanan, diperlukan pula penentuan titik evaluasi dan titik pengamatan. Titik evaluasi ini merupakan posisi tertentu di permukaan

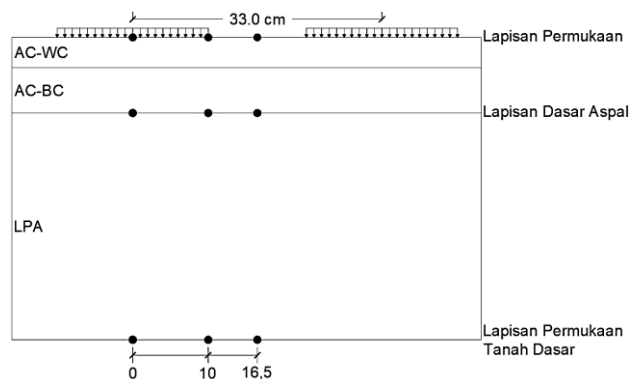
perkerasan yang dijadikan acuan untuk menghitung respons berupa tegangan, regangan, dan lendutan akibat beban lalu lintas. Pada penelitian ini digunakan tiga titik evaluasi berdasarkan *plan view of multiple wheels* (Huang, 2004), yaitu pada koordinat 0 mm, 10 mm, dan 16,5 mm. Nilai tersebut merepresentasikan posisi tengah ban (0 mm), tepi ban (10 mm), dan tengah gandar atau antara roda ganda (16,5 mm). Dengan menentukan titik evaluasi ini, analisis dapat menggambarkan variasi respons perkerasan pada lokasi yang kritis terhadap potensi kerusakan, sehingga hasil evaluasi menjadi lebih komprehensif dan sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Penjelasan di atas diperjelas menggunakan Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Plan View of Multiple Wheels

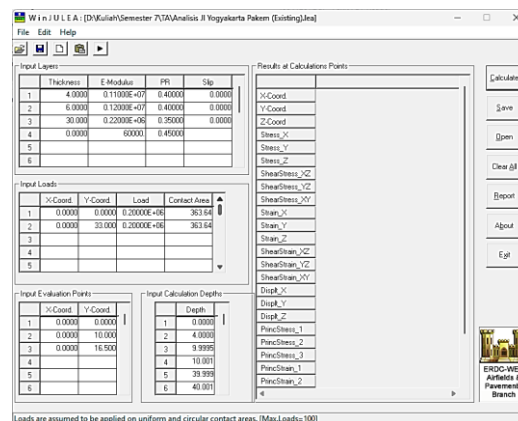
(Sumber : Huang, 2004)

Nilai titik tinjauan dalam penelitian ini disesuaikan dengan kondisi yang ingin dianalisis, mengingat kedalaman titik tinjauan berpengaruh pada jenis kerusakan yang dievaluasi. Titik tinjauan pertama diletakkan pada dasar lapisan aspal untuk mengevaluasi potensi retak lelah (*fatigue cracking*) akibat beban lalu lintas berulang. Sedangkan titik tinjauan kedua ditempatkan pada permukaan tanah dasar untuk menilai potensi deformasi permanen yang terjadi akibat beban kendaraan berat. Pemilihan titik tinjauan ini bertujuan untuk menilai dampak beban lalu lintas pada kedua lapisan tersebut, baik pada lapisan aspal maupun tanah dasar. Gambar 5.4 menjelaskan mengenai titik evaluasi dan titik tinjau yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 5.4 Titik Tinjauan Berdasarkan Konfigurasi Beban Sumbu Standar

Setelah seluruh data yang meliputi ketebalan lapisan, karakteristik material, pembebanan, titik evaluasi, dan titik tinjauan selesai dimasukkan, langkah berikutnya adalah menjalankan perhitungan dengan klik “*Calculate*” pada aplikasi WinJULEA. Proses ini akan mengeluarkan hasil berupa distribusi tegangan dan regangan pada titik-titik yang telah ditentukan. Sebelum perhitungan dijalankan, tampilan *input* yang telah dimasukkan dapat dilihat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.5. Gambar tersebut menampilkan ringkasan data lapisan perkerasan serta parameter beban standar yang menjadi dasar analisis. Hasil keluaran inilah yang kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi untuk menilai kemampuan struktur perkerasan untuk menahan beban lalu lintas sesuai umur rencana, serta untuk membandingkan kinerja antara kondisi *existing*.



Gambar 5.5 Data Input WinJULEA untuk Perkerasan Existing

2. Hasil Analisis WinJULEA untuk Perkerasan *Existing*

Setelah seluruh data *input* dimasukkan ke dalam program dan perhitungan dijalankan, WinJULEA menghasilkan *output* berupa respons struktural pada lapisan perkerasan. *Output* yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah regangan tarik horizontal pada dasar lapisan aspal dan regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar. Kedua parameter ini dipilih karena berhubungan langsung dengan dua jenis kerusakan utama pada perkerasan lentur, yaitu retak lelah (*fatigue cracking*) dan deformasi permanen (*rutting*). Hasil keluaran analisis dari WinJULEA ditampilkan pada Tabel 5.6, yang selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi kinerja perkerasan kondisi *existing*.

Tabel 5.6 Output Analisis WinJULEA untuk Ketebalan *Existing*

No. Koordinat (x ; y)	Horizontal Regangan	Vertikal Regangan	Vertikal Regangan
	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 40,0005 cm
0 ; 0	0,0003603	0,0005077	0,0005696
0 ; 10	0,0003337	0,0002951	0,0006184
0 ; 16,5	0,0003028	0,0001529	0,0006259
Nilai Max	0,0003603	0,0005077	0,0006259

Pada Tabel 5.6 menunjukkan hasil analisis dari WinJULEA untuk ketebalan perkerasan *Existing*. kedalaman 9,9995 cm mewakili lapisan terbawah aspal, di mana analisis horizontal regangan digunakan untuk memprediksi potensi *fatigue cracking* pada lapisan aspal, sementara vertikal regangan pada kedalaman yang sama mengukur perubahan vertikal akibat beban lalu lintas dan memprediksi kerusakan *rutting*. Kedalaman 40,005 cm, yang merupakan lapisan atas *subgrade*, dianalisis dengan vertikal regangan untuk memprediksi deformasi permanen pada *subgrade* yang dapat mengurangi kualitas perkerasan jalan.

3. Kontrol Repetisi Beban Perkerasan *Existing* Berdasarkan Hasil WinJULEA

Setelah diperoleh nilai tegangan dan regangan dari hasil analisis menggunakan WinJULEA, tahap selanjutnya adalah melakukan kontrol repetisi beban untuk memprediksi tingkat ketahanan perkerasan terhadap

kerusakan selama umur rencana. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nugroho, Setyawan dan Budiarto (2023), proses ini memprediksi banyak siklus beban yang dapat diterima oleh perkerasan sebelum masing-masing jenis kerusakan mencapai batas kritis, yang pada akhirnya digunakan untuk menentukan umur pelayanan jalan. Kontrol ini mencakup evaluasi terhadap tiga jenis kerusakan utama pada perkerasan lentur, yaitu *fatigue cracking* (retak lelah), *rutting* (alur pada permukaan jalan akibat penurunan tanah dasar), dan *permanent deformation* (deformasi permanen pada lapisan tanah dasar). Ketiga jenis kerusakan tersebut dihitung dengan menentukan nilai Nf, Nd, dan Nr, yang masing-masing merepresentasikan jumlah repetisi beban hingga terjadinya kerusakan. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan Persamaan 5.6 sampai 5.8. Dengan kontrol ini, hasil analisis mampu memprediksi umur pelayanan jalan secara lebih komprehensif.

a. Kontrol Nf (*Fatigue Cracking*)

Nf adalah jumlah repetisi beban lalu lintas sampai timbulnya retak lelah (*fatigue cracking*) pada lapisan aspal. Retak lelah terjadi karena lapisan aspal mengalami regangan tarik horizontal secara berulang di dasar lapisan, sehingga ikatan antar-aspal dan agregat melemah. Semakin kecil nilai regangan tarik yang terjadi, maka nilai Nf akan semakin besar, sehingga umur perkerasan lebih panjang terhadap potensi retak lelah. Perhitungan Nf dilakukan menggunakan Persamaan 5.6. Perhitungan Nf ini sangat penting untuk menentukan kapasitas perkerasan dalam menahan beban berulang dan memperkirakan umur jalan sebelum terjadinya kerusakan signifikan.

$$N_f = 0,0796 \times \varepsilon_t^{-3,921} \times E^{-0.854} \quad (5.6)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut didapatkan hasil perhitungan Nf perkerasan *existing* hanya mampu menahan sekitar 16,24 juta repetisi beban sebelum mengalami retak lelah.

b. Kontrol Nr (*Rutting*)

Nr adalah jumlah repetisi beban lalu lintas hingga terjadi *rutting*, yaitu alur pada permukaan jalan yang disebabkan oleh regangan tekan vertikal pada tanah dasar (*subgrade*). *Rutting* berbahaya karena dapat menampung air, mengurangi keselamatan, dan mempercepat kerusakan lapisan perkerasan. Nilai Nr yang besar menunjukkan bahwa struktur perkerasan lebih stabil dalam menahan tekanan pada tanah dasar sehingga risiko *rutting* lebih kecil. Perhitungan Nr ini penting untuk mengevaluasi ketahanan perkerasan terhadap deformasi permanen akibat beban lalu lintas yang berulang. Semakin kecil nilai Nr, semakin rendah potensi deformasi permanen yang akan terjadi pada lapisan perkerasan, yang pada akhirnya meningkatkan umur pelayanan jalan. Persamaan 5.7 berikut:

$$Nr = 1,365 \times 10^{-9} \times \varepsilon_c^{-4,477} \quad (5.7)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut didapatkan hasil perhitungan Nr yang merepresentasikan kapasitas maksimum perkerasan dalam menahan beban lalu lintas kumulatif hingga mencapai batas kegagalan alur (*rutting*), yang secara mekanistik dihitung dari regangan tekan vertikal yang terjadi pada lapisan berbutir dan tanah dasar (*subgrade*). Semakin besar Nr, semakin rendah regangan kritis yang dialami lapisan bawah, dan semakin baik stabilitas struktural perkerasan terhadap deformasi permanen. Berdasarkan *Output* WinJULEA, nilai Nr pada Kondisi *Existing* tercatat sebesar 763.802 ESA5. Angka ini menunjukkan bahwa struktur perkerasan yang ada saat ini memiliki kerentanan tinggi terhadap kerusakan alur dini, di mana kapasitasnya berada di bawah satu juta ESA5, mengindikasikan bahwa lapisan di bawah permukaan tidak mampu mendistribusikan tegangan secara efektif, yang konsisten dengan masalah deformasi yang sering ditemukan di lapangan (Sasongko, dkk., 2021).

c. Kontrol Nd (*Permanent Deformation*)

Nd adalah jumlah repetisi beban sampai timbulnya deformasi permanen (*permanent deformation*) pada lapisan perkerasan. Kerusakan ini

umumnya muncul akibat regangan tekan vertikal yang berulang di lapisan perkerasan di atas tanah dasar. Jika nilai N_d tinggi, artinya perkerasan lebih tahan terhadap perubahan bentuk permanen yang dapat mengganggu kenyamanan dan keamanan pengguna jalan. Deformasi permanen ini dapat mempercepat kerusakan struktural jalan, mengurangi kenyamanan berkendara, dan meningkatkan biaya pemeliharaan. Oleh karena itu, perhitungan N_d sangat penting dalam memastikan bahwa perkerasan dapat bertahan selama umur rencana tanpa mengalami kerusakan yang signifikan. Perhitungan N_d dilakukan menggunakan Persamaan 5.8 berikut:

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} \times \varepsilon_c^{-4,477} \quad (5.8)$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut didapatkan hasil perhitungan N_d . Pada kondisi *Existing*, nilai N_d hanya mencapai 299.826 ESA5. Angka ini menunjukkan bahwa perkerasan saat ini sangat rentan terhadap kegagalan deformasi permanen. Kapasitas yang berada di bawah satu juta ESA5 ini mengonfirmasi temuan di lapangan bahwa *permanent deformation*, merupakan mode kegagalan yang paling cepat terjadi, terutama karena tingginya transmisi regangan tekan vertikal ke lapisan tanah dasar (*subgrade*) yang memiliki modulus elastisitas rendah. Secara mekanistik, ε_v yang besar pada lapisan di bawah AC akan mengakibatkan pemadatan yang cepat dan progresif di bawah beban berulang.

4. **Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan *Existing* Berdasarkan Hasil WinJULEA**
 Prediksi umur pelayanan jalan adalah estimasi mengenai jangka waktu yang dibutuhkan agar suatu ruas jalan dapat tetap berfungsi dengan baik sebelum memerlukan perbaikan atau rehabilitasi. Prediksi ini sangat penting untuk perencanaan pemeliharaan jalan guna memastikan bahwa jalan tetap aman dan efisien selama umur rencana yang ditetapkan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Setiawan, dkk. (2023), prediksi umur pelayanan jalan dapat dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa faktor, seperti volume lalu lintas, jenis kendaraan, dan kondisi perkerasan. Selain itu, beban lalu lintas

yang diterima jalan juga mempengaruhi umur perkerasan, sebagaimana diungkapkan oleh Nugroho, dkk. (2023), yang menunjukkan bahwa beban berlebih dari kendaraan dapat mempercepat kerusakan perkerasan dan mengurangi umur pelayanan jalan. Oleh karena itu, prediksi yang akurat terhadap umur perkerasan jalan sangat bergantung pada perhitungan yang mempertimbangkan faktor-faktor teknis dan lingkungan yang ada. Dengan pendekatan yang tepat, prediksi ini dapat digunakan sebagai dasar dalam merencanakan pemeliharaan dan perbaikan jalan yang efisien dan efektif.

Perhitungan prediksi umur pelayanan jalan dilakukan dengan mengintegrasikan beberapa parameter yang mempengaruhi kinerja perkerasan jalan, seperti volume lalu lintas, jenis kendaraan, kondisi perkerasan, dan faktor lingkungan. Proses perhitungan ini mengikuti pedoman yang ditetapkan oleh Bina Marga (2024), yang memberikan pedoman teknis terkait perhitungan ketebalan perkerasan dan umur jalan. Setiawan, dkk. (2023) menjelaskan bahwa dalam perhitungan prediksi umur pelayanan jalan, salah satu aspek penting adalah analisis terhadap *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL), yang merupakan penjumlahan total beban lalu lintas ekuivalen yang diterima oleh perkerasan selama umur rencana jalan. CESAL dihitung dengan mengonversi jumlah kendaraan yang melintas menjadi sumbu standar ekuivalen menggunakan *Vehicle Damage Factor* (VDF) untuk memperkirakan kerusakan yang ditimbulkan oleh berbagai jenis kendaraan.

Untuk menghitung umur pelayanan perkerasan, dilakukan setelah analisis kontrol repetisi beban pada lapisan perkerasan yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Dalam perhitungan prediksi umur pelayanan, faktor pertumbuhan lalu lintas digunakan sebesar 3,5% per tahun, yang sesuai dengan nilai yang digunakan dalam analisis Bina Marga 2024. Faktor pertumbuhan lalu lintas ini sangat berpengaruh terhadap proyeksi volume kendaraan yang akan melintas pada masa mendatang, yang pada gilirannya memengaruhi total beban lalu lintas yang diterima oleh perkerasan.

Dalam penelitian ini, perhitungan prediksi umur pelayanan perkerasan jalan dilakukan dengan mengasumsikan periode normal, yang berarti menggunakan data dan asumsi yang relevan dengan kondisi lalu lintas dan lingkungan pada masa depan. Oleh karena itu, untuk analisis ini, VDF normal digunakan, yang mengacu pada Lampiran H MDP 2024, yang menyajikan nilai VDF untuk provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY). Nilai VDF normal ini menggambarkan dampak kerusakan dari beban kendaraan terhadap kondisi lalu lintas di wilayah tersebut, dan digunakan untuk memastikan prediksi umur perkerasan lebih akurat dan sesuai dengan kondisi. Selain itu, dalam perhitungan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR), yang digunakan adalah LHR 2025 yang telah dihitung sebelumnya di subbab terkait, dengan memperhitungkan faktor distribusi lajur (DL) sebesar 100% dan faktor distribusi arah (DD) sebesar 50%. Nilai DL dan DD ini sesuai dengan ketentuan dalam pedoman Bina Marga 2024 yang mengatur distribusi kendaraan pada ruas jalan dengan dua lajur arah, di mana DD sebesar 50% mengindikasikan pembagian lalu lintas yang setara pada kedua arah, dan DL sebesar 100% berarti bahwa seluruh kendaraan di kedua arah menggunakan lajur desain. Sehingga, dengan menggunakan data-data tersebut, didapatkan rekapitulasi data yang digunakan dalam perhitungan prediksi umur pelayanan jalan, yang disajikan pada Tabel 5.7. Tabel tersebut mencakup data penting seperti LHR 2025, VDF normal, faktor pertumbuhan lalu lintas, serta asumsi terkait distribusi lajur (DL) dan distribusi arah (DD), yang digunakan dalam analisis prediksi umur pelayanan jalan.

Tabel 5.7 Rekapitulasi Data untuk Perhitungan Prediksi Umur Pelayanan

Golongan	i (%)	LHR 2025	Faktor VFD 5 (Normal)	DL (%)	DD
2	3,5	10.389,33	0	100	0,5
4	3,5	833,175	0	100	0,5
5A	3,5	44,505	0	100	0,5
5B	3,5	263,925	1,3	100	0,5
6B	3,5	87,975	1,0	100	0,5
7A2	3,5	132,48	4,0	100	0,5
7C1	3,5	87,975	5,3	100	0,5

Dengan data pada Tabel 5.7, dilakukan perhitungan prediksi umur pelayanan perkerasan jalan. Contoh perhitungan prediksi umur pelayanan perkerasan jalan untuk kerusakan *fatigue cracking* sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{CESAL} &= (\sum \text{LHR}_{\text{JK}} \times \text{VDF}_{\text{JK}}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \\
 16.240.961 &= ((10.389,33 \times 0) + (833,18 \times 0) + (44,51 \times 0) + \\
 &\quad (263,93 \times 1,3) + (87,98 \times 1,0) + (132,5 \times 4,0) + \\
 &\quad (87,975 \times 5,3)) \times 365 \times 100\% \times 0,5 \times \text{R} \\
 16.294.093 &= 260.475,863 \text{ R} \\
 \text{R} &= \frac{16.294.093}{260.475,863} \\
 &= 62,56
 \end{aligned}$$

Dimana R adalah faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif, dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1.

$$\begin{aligned}
 62,56 &= \frac{(1+0,01 \cdot 3,5)^{\text{UR}-1}}{(0,01 \cdot 3,5)} \\
 (1 + 0,01 \times 3,5)^{\text{UR}} &= (62,56 \times (0,01 \times 3,5)) + 1 \\
 1,035^{\text{UR}} &= 3,19 \\
 \text{UR} &= \log_{1,035} 3,19 \\
 \text{UR} &= 34 \text{ tahun}
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan prediksi umur pelayanan perkerasan jalan akibat repetisi beban yang menyebabkan kerusakan *rutting* (Nr) dan *deformation permanent* (Nd) baik untuk perkerasan *existing* dilakukan dengan cara yang sama seperti di atas. Sehingga didapatkan hasil prediksi umur pelayanan perkerasan jalan seperti pada Tabel 5.8 berikut:

Tabel 5.8 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Jalan *Existing*

Jenis Kerusakan	<i>Existing</i>
<i>Fatigue Cracking</i>	34
<i>Rutting</i>	3
<i>Deformation Permanent</i>	1

Berdasarkan hasil perhitungan prediksi umur pelayanan perkerasan jalan yang disajikan dalam Tabel 5.8, dapat dilihat bahwa kondisi *existing* hanya mampu bertahan hingga 34 tahun sebelum mengalami kerusakan akibat *fatigue cracking* (retak lelah). Untuk kerusakan *rutting* (alur pada permukaan jalan), perkerasan *existing* hanya dapat bertahan selama 3 tahun. Begitu pula untuk kerusakan deformasi permanen (*permanent deformation*), pada kondisi *existing* hanya mampu bertahan 1 tahun.

5.3.2 Evaluasi Perkerasan *Existing* Menggunakan Aplikasi KENPAVE

Evaluasi struktur perkerasan jalan merupakan tahapan yang sangat penting dalam perencanaan, pemeliharaan, dan perbaikan infrastruktur jalan. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa jalan dapat berfungsi dengan optimal selama masa pakainya, dengan mengidentifikasi dan mengatasi potensi kerusakan sejak dini. Selain menggunakan aplikasi WinJULEA, salah satu perangkat lunak yang sering digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur perkerasan adalah KENPAVE. Aplikasi ini berfungsi untuk melakukan analisis terhadap respons perkerasan terhadap beban lalu lintas yang diterima oleh jalan, dengan memperhitungkan distribusi tegangan dan regangan pada setiap lapisan perkerasan.

KENPAVE merupakan perangkat lunak berbasis teori elastis berlapis (*multilayer elastic theory*) yang digunakan untuk memodelkan respons struktural perkerasan jalan. Aplikasi ini mampu menghitung interaksi antar lapisan dan memprediksi potensi kerusakan seperti *fatigue cracking* dan *rutting*. Dengan KENPAVE, perencana dapat menilai berbagai alternatif desain serta memperkirakan umur pelayanan perkerasan. Menurut Hadi (2023), penggunaan KENPAVE efektif dalam menganalisis dampak beban berlebih terhadap ketahanan jalan. Hadi dan Fauziah (2022) juga menegaskan bahwa pemilihan desain dan material yang tepat melalui program ini dapat meningkatkan umur layanan dan mengurangi kerusakan struktural. Oleh karena itu, KENPAVE menjadi salah satu perangkat analisis yang banyak digunakan dalam penelitian maupun praktik rekayasa perkerasan jalan di Indonesia.

1. Data *Input* KENPAVE untuk Perkerasan *Existing*

Pada tahap awal evaluasi menggunakan aplikasi KENPAVE, langkah pertama yang harus dilakukan adalah memasukkan data *input* yang menggambarkan kondisi struktur perkerasan jalan yang akan dianalisis. Data ini mencakup informasi mengenai ketebalan lapisan perkerasan, sifat material dari setiap lapisan, serta parameter lalu lintas yang akan digunakan untuk memperkirakan respons struktur terhadap beban kendaraan.

Pada evaluasi menggunakan KENPAVE ini menggunakan karakteristik material berupa modulus elastisitas, *poisson's ratio*, dan data ketebalan yang sama dengan data *input* pada evaluasi menggunakan WinJULEA. Data modulus elastisitas dan *poisson's ratio* dapat dilihat pada Tabel 5.5. Sedangkan untuk ketebalan dapat dilihat pada Gambar 5.1.

Pada evaluasi perkerasan jalan menggunakan aplikasi KENPAVE ini, menggunakan menu LAYERINP dimana menu ini berfungsi untuk mengevaluasi perkerasan jalan lentur (*flexible*). Tahapan awal dalam penggunaan LAYERINP yaitu, mendefinisikan kebutuhan serta bentuk pemodelan yang akan kita buat dan sesuai dengan data yang ada. Pendefinisian kebutuhan ini dilakukan pada menu General yang isinya seperti pada Gambar 5.6.

General Information of LAYERINP for Set No. 1	
TITLE	Analisis Jl Yogyakarta Paken ka 14.5 sd 16 (Existing)
Type of material [1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined]	(MATL) 1
Damage analysis [0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detailed printout]	(NDAMA) 0
Number of periods per year	(NPY) 1
Number of load groups	(NLG) 1
Tolerance for numerical integration	(DEL) 0.001
Number of layers	(NL) 4
Number of Z coordinates for analysis	(NZ) 6
Maximum cycles of numerical integration	(ICL) 80
Type of responses [1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains]	(NSTD) 9
All layer interfaces bonded [1=yes, 0-if some are frictionless]	(NBOND) 1
Number of layers for bottom tension	(NLBT) 1
Number of layers for top compression	(NLTC) 1
System of units [0=English, 1=SI]	(NUNIT) 1

[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 60 characters including spaces. If you make a mistake in typing, use the Del key to erase any typographical errors. When the total length reaches 60, 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 5.6 Tampilan Menu General

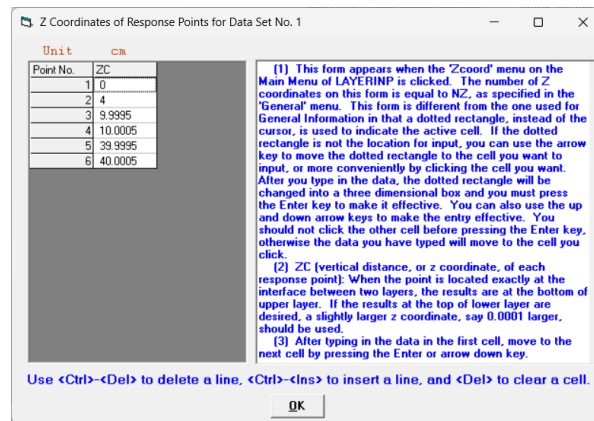
Penjelasan mengenai *input* data di Menu General dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut. Hal yang dimasukkan dalam menu General ini merupakan data awal yang harus ditentukan agar pemodelan sesuai dengan yang diharapkan.

Tabel 5.9 *Input Data* pada Menu General

Isian	Nilai data <i>Input</i>	Keterangan
<i>Title</i>	Analisis Jl Yogyakarta Pakem km 14.5 sd 16 (<i>Existing</i>)	Memberikan judul agar analisis tidak tertukar dengan analisis perkerasan jalan lainnya, sehingga dapat diisi sesuai dengan kebutuhan
MATL	1	Mendefinisikan pemodelan merupakan lapisan yang bersifat linear elastis
NDAMA	0	Analisis tanpa menggunakan analisis kerusakan
NPY	1	jumlah periode dalam satu tahun yang digunakan untuk analisis kerusakan atau respons perkerasan di program KENPAVE
NLG	1	jumlah kelompok beban sumbu (<i>axle load group</i>) yang ditinjau dalam satu analisis
DEL	0,001	Merupakan Nilai akurasi data dengan nilai <i>default</i> sebesar 0,1%
NL	4	Jumlah lapisan yang akan dimodelkan
NZ	6	Jumlah titik kedalaman yang akan ditinjau
ICL	80	Jumlah siklus integrasi maksimum, dimana KENPAVE menyarankan 80
NSTD	9	untuk perpindahan vertikal, tegangan, dan regangan. Saat analisis kerusakan dilakukan, NSTD harus ditetapkan 9.
NBOND	1	Untuk pemodelan dimana semua lapisan antarmuka saling terikat (<i>bonded</i>)
NLBT	1	jumlah lapis perkerasan yang dianalisis berdasarkan regangan tarik (<i>tensile strain</i>) pada dasar (bawah) lapisan aspal
NLCT	1	jumlah lapis perkerasan yang dianalisis berdasarkan regangan tekan vertikal (<i>vertical compressive strain</i>) di permukaan tanah dasar (<i>subgrade</i>) atau lapisan <i>unbonded</i> lain di bawah.
NUNIT	1	Untuk penggunaan satuan dengan standar SI (<i>Standard International</i>)

Setelah memasukkan data dalam menu General, selanjutnya ialah memasukkan titik tinjauan pada *Menu Zcoord*. Hal ini sama dengan fungsi *input Calculation Depth* di WinJULEA dimana fungsi ini memberikan info kedalaman titik tinjau yang akan diamati. Pada dasarnya titik yang diamati dapat dijelaskan sesuai dengan Gambar 5.7, titik tinjau yang diamati berada di bawah lapis aspal untuk mengevaluasi kerusakan *fatigue cracking*, dan di atas lapisan *subgrade* untuk mengevaluasi terhadap kerusakan *deformation*

permanent (*rutting*). Berikut merupakan tampilan *Menu Zcoord* setelah dimasukkan data titik tinjauan.



Point No.	ZC
1	0
2	4
3	9.9995
4	10.0005
5	39.9995
6	40.0005

[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.

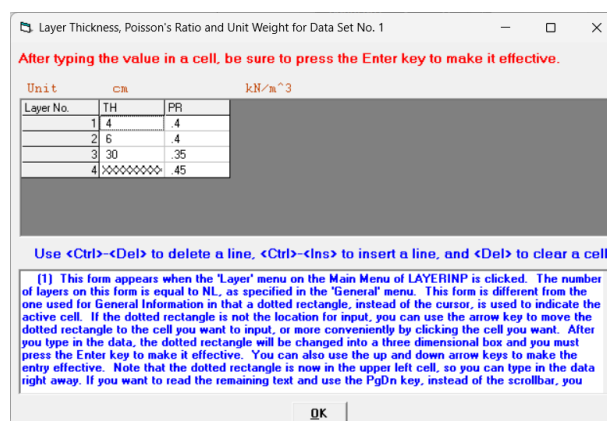
[3] After typing in the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key.

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

OK

Gambar 5.7 Tampilan Menu Zcoord

Langkah selanjutnya yaitu memasukkan ketebalan lapisan dengan nilai *poisson's ratio* pada *Menu Layer*. Nilai ketebalan disesuaikan dengan ketebalan lapisan yang akan dievaluasi, sedangkan nilai *poisson's ratio* diperoleh berdasarkan material lapisan perkerasan. Mengenai ketebalan dan nilai *poisson's ratio* dapat dilihat pada Tabel 5.5. Pada Gambar 5.8, merupakan tampilan setelah dapat ketebalan dan *poisson's ratio* dimasukkan dalam *Menu Layer*.



Layer No.	TH	PR
1	4	.4
2	6	.4
3	30	.35
4	XXXXXXXXXX	.45

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

Unit: CM kN/m^3

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

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

OK

Gambar 5.8 Tampilan Menu Layer

Setelah memasukkan ketebalan lapisan dan nilai *Poisson's ratio*, langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai modulus elastisitas pada menu Moduli.

Modulus elastisitas ini penting karena menggambarkan kemampuan material perkerasan untuk kembali ke bentuk semula setelah diberikan beban, yang mempengaruhi daya tahan dan kinerja perkerasan jalan. Nilai modulus elastisitas yang digunakan dalam pemodelan material perkerasan ini diambil dari referensi yang telah divalidasi, yaitu Tabel 5.5 yang sesuai dengan nilai yang digunakan dalam aplikasi WinJULEA, untuk memastikan konsistensi dalam analisis dan perhitungan kekuatan struktur perkerasan jalan. Tampilan menu Moduli setelah memasukkan nilai modulus elastisitas dapat dilihat pada Gambar 5.9.

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

Unit	kPa
Layer No.	E
1	1100000
2	1200000
3	220000
4	60000

(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 5.9 Tampilan Menu Moduli

Setelah memasukkan data material, proses evaluasi perkerasan menggunakan aplikasi KENPAVE diperlukan memodelkan bebannya. Pada aplikasi KENPAVE, pemodelan beban berbeda dengan aplikasi WinJULEA. Pemodelan pada aplikasi KENPAVE hanya memerlukan data jenis beban standar, jari-jari kontak (*contact radius*), nilai tekanan ban standar, jarak antar sumbu roda gandar arah y, jarak antar sumbu roda gandar arah x, dan jumlah titik evaluasi. Penjelasan mengenai beban sumbu standar dapat dilihat pada Gambar 5.2, dan penjelasan mengenai titik tinjau dan titik evaluasi dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4. Hasil *input* pada Menu Load dapat dilihat pada Gambar 5.10.

Load Information for Data Set No. 1

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

Unit	CR	kPa	YW	XW	NR or NPT	
Load Group No	LOAD	CR	CP	YW	XW	NR or NPT
1	1	10.76	550	33	0	3

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

(1) This form appears when the 'Load' menu on the Main Menu of LAYERIMP 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 area).
 (4) CP (contact pressure on circular loaded area).
 (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 axes 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 5.10 Tampilan Menu Load

Nilai *contact radius* (CR) ini digunakan sebagai *input* KENPAVE untuk menghitung luas area kontak. Luas area kontak pada aplikasi KENPAVE ini menggunakan area kontak berbentuk lingkaran. Nilai CR ini biasanya digunakan sebesar 11 cm, namun pada penelitian ini nilai CR didapat dari perhitungan dimana rumus dasarnya menggunakan Persamaan 5.5 untuk mencari luas area kontak. Untuk mencari nilai CR didapatkan dengan menggunakan rumus luas lingkaran. Berikut merupakan perhitungan untuk mencari nilai CR:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{W}{p} \\
 &= \frac{20}{0,055} \\
 &= 363,636 \text{ cm}^2 \\
 A &= \pi r^2 \\
 r &= \sqrt{\frac{A}{\pi}} \\
 r &= \sqrt{\frac{363,636}{\pi}} \\
 &= 10,76 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Untuk memasukkan nilai titik evaluasi dilakukan dengan cara klik dua kali pada kolom isian sehingga akan membuka jendela baru. Berikut merupakan tampilan untuk memasukkan nilai titik evaluasi seperti pada Gambar 5.11.

Unit	CA	CA
Point No.	XPT	YPT
1	0	0
2	0	10
3	0	16.5

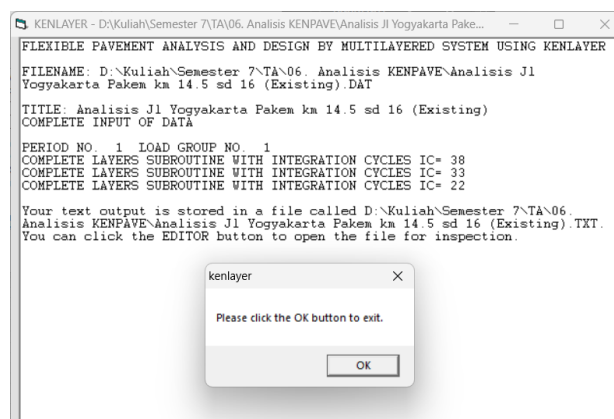
(1) This auxiliary form appears automatically when NPT of a given load is typed on the main form. If NPT was specified previously, you can also enter this auxiliary form by double clicking the main form anywhere on the given load group, instead of retyping NPT to enter this auxiliary form.
 (2) XPT (x coordinates of points to be analyzed).
 (3) YPT (y coordinates of points to be analyzed).
 (4) After typing the data in a cell, be sure to press the Enter key to make it effective.
 (5) You can delete a line, or one of the points, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NPT in the main form will be reduced automatically by 1.
 (6) You can add a new line, or one more point, 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 NPT in the main form will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NPT in the main form 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.
 (7) After completing this form, click OK to return to the main form.

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

OK

Gambar 5.11 Tampilan Menu untuk Memasukkan Titik Evaluasi

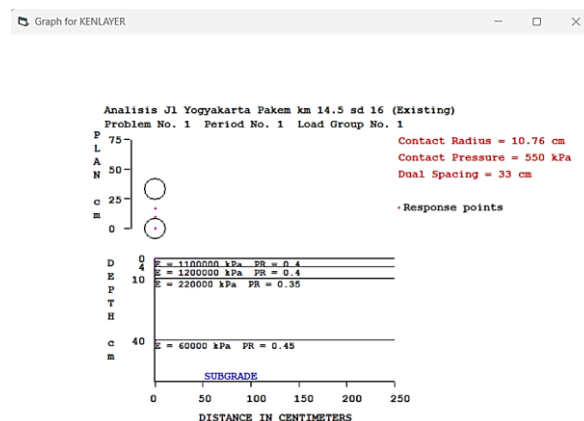
Dengan seluruh data pemodelan beban telah dimasukkan ke dalam KENPAVE artinya data-data pemodelan telah selesai dimasukkan. Langkah selanjutnya yaitu melakukan penyimpanan data sebelum dilakukan simulasi. Untuk menjalankan simulasi dilakukan dengan cara klik menu KENLAYER, Data yang dimasukkan akan diolah oleh aplikasi KENPAVE hingga tampilan menjadi seperti pada Gambar 5.12, yang mengartikan proses evaluasi sedang dijalankan dan berhasil



Gambar 5.12 Tampilan Menjalankan Proses Simulasi KENLAYER

Dalam aplikasi KENPAVE, pemodelan perkerasan jalan yang telah dimasukkan dapat ditinjau dalam bentuk grafik untuk memvisualisasikan hasil analisis. Grafik ini membantu untuk mengevaluasi apakah data yang dimasukkan sesuai dengan harapan dan memperlihatkan dampak dari

ketebalan lapisan serta modulus elastisitas terhadap kinerja perkerasan jalan. Dengan menggunakan Menu LGRAPH, pengguna dapat memverifikasi apakah model perkerasan yang telah dibuat menghasilkan *output* yang konsisten dan sesuai dengan parameter yang diinginkan, serta melakukan penyesuaian jika diperlukan. Gambar 5.13 menunjukkan hasil grafik pemodelan yang telah dimasukkan datanya, yang memberikan gambaran jelas tentang performa perkerasan yang dianalisis. Hasil grafik ini juga memberikan gambaran yang jelas mengenai distribusi tegangan dan regangan pada perkerasan, sehingga memudahkan dalam menilai keefektifan desain yang telah dibuat.



Gambar 5.13 Grafik Pemodelan pada Aplikasi KENPAVE

2. Hasil Analisis KENPAVE untuk Perkerasan *Existing*

Setelah seluruh data *input* dimasukkan ke dalam aplikasi KENPAVE dan perhitungan dilakukan, hasil analisis berupa distribusi tegangan, dan regangan pada tiap lapisan perkerasan diperoleh. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk mengevaluasi kinerja struktur perkerasan jalan dalam menahan beban lalu lintas yang diterima. Salah satu parameter utama yang dianalisis adalah regangan tarik horizontal pada dasar lapisan aspal untuk mengevaluasi potensi kerusakan akibat *fatigue cracking* dan regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar untuk menilai potensi *rutting* serta *permanent deformation*. Hasil analisis dari KENPAVE ditampilkan pada Tabel 5.10.

Tabel 5.10 Output Analisis KENPAVE untuk Ketebalan Existing

No. Koordinat (x ; y)	Horizontal Regangan	Vertikal Regangan	Vertikal Regangan
	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 40,0005 cm
0 ; 0	0,0003603	0,0005077	0,0005696
0 ; 10	0,0003337	0,0002951	0,0006184
0 ; 16,5	0,0003028	0,0001529	0,0006259
Nilai Max	0,0003603	0,0005077	0,0006259

Tabel 5.10 menunjukkan hasil analisis dari KENPAVE untuk ketebalan perkerasan *existing*, kedalaman 9,9995 cm mewakili lapisan terbawah aspal, di mana analisis horizontal regangan digunakan untuk memprediksi potensi *fatigue cracking* pada lapisan aspal, sementara vertikal regangan pada kedalaman yang sama mengukur perubahan vertikal akibat beban lalu lintas dan memprediksi kerusakan *rutting*. Kedalaman 40,005 cm, yang merupakan lapisan atas *subgrade*, dianalisis dengan vertikal regangan untuk memprediksi deformasi permanen pada *subgrade* yang dapat mengurangi kualitas perkerasan jalan.

Fokus utama dalam analisis ini adalah regangan tarik horizontal pada dasar lapisan aspal, yang digunakan untuk menilai potensi kerusakan akibat *fatigue cracking*, serta regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar untuk mengevaluasi potensi *rutting* dan *permanent deformation*. Pada kondisi *existing*, nilai regangan maksimum untuk *fatigue cracking* tercatat sebesar 0,0003603, untuk *rutting* sebesar 0,0005077, dan untuk *permanent deformation* sebesar 0,0006259. Angka-angka ini menunjukkan bahwa struktur perkerasan *existing* memiliki potensi kerusakan yang cukup besar, terutama terkait dengan *fatigue cracking* dan *rutting*, yang dapat mempercepat penurunan kinerja jalan seiring waktu.

3. Kontrol Repetisi Beban Perkerasan *Existing* Berdasarkan Hasil KENPAVE
Setelah seluruh data dimasukkan ke dalam aplikasi KENPAVE dan perhitungan dilakukan, hasil analisis mengenai distribusi tegangan, regangan, dan lendutan pada lapisan perkerasan dapat diperoleh. Analisis ini penting untuk mengevaluasi kemampuan perkerasan dalam menahan beban lalu lintas yang diterimanya selama umur rencana. Salah satu parameter utama yang

diperoleh dari analisis KENPAVE adalah regangan tarik horizontal pada dasar lapisan aspal, yang berfungsi untuk mengevaluasi potensi *fatigue cracking* (retak lelah). *Fatigue cracking* terjadi ketika lapisan aspal mengalami siklus beban yang berulang, menyebabkan material perkerasan kehilangan elastisitasnya dan akhirnya retak. Regangan tarik horizontal ini mengukur seberapa banyak material aspal mengalami pergeseran lateral akibat beban lalu lintas, yang dapat mengindikasikan potensi kerusakan di permukaan jalan. Selain itu, regangan tekan vertikal pada lapisan aspal dan permukaan tanah dasar (*subgrade*) juga dihitung untuk menilai potensi *rutting* dan *permanent deformation* (deformasi permanen). *Rutting* terjadi ketika lapisan aspal perkerasan mengalami pemadatan atau pergeseran vertikal yang tidak dapat kembali ke bentuk semula, mengakibatkan jalan menjadi bergelombang. Deformasi permanen merujuk pada perubahan bentuk yang terjadi pada material *subgrade* yang tidak dapat kembali ke bentuk semula setelah beban dihapus, dan ini bisa menyebabkan kerusakan jangka panjang pada struktur jalan. Parameter-parameter ini sangat penting untuk merancang perkerasan mengevaluasi keandalan struktur jalan dan merancang perkerasan yang dapat menahan beban lalu lintas tanpa mengalami kerusakan yang signifikan selama umur rencana jalan.

Kontrol repetisi beban dilakukan untuk memprediksi jumlah siklus beban yang dapat diterima perkerasan sebelum masing-masing jenis kerusakan ini terjadi. Dengan menggunakan hasil perhitungan dari KENPAVE, nilai N_f , N_r , dan N_d dihitung untuk mengetahui jumlah siklus beban yang dapat diterima oleh perkerasan hingga mencapai batas kegagalan dari masing-masing kerusakan. Hasil perhitungan kontrol repetisi beban ini sangat penting dalam menentukan umur pelayanan jalan dan untuk memastikan desain yang diusulkan dapat memenuhi persyaratan ketahanan terhadap kerusakan yang ditetapkan.

a. Kontrol N_f (*Fatigue Cracking*)

Fatigue cracking terjadi ketika lapisan aspal mengalami regangan tarik horizontal berulang yang melemahkan ikatan antara aspal dan agregat.

Maka, untuk menentukan ketahanan perkerasan terhadap kerusakan akibat *fatigue cracking*, perlu dihitung nilai N_f (jumlah repetisi beban) yang menunjukkan berapa banyak siklus beban yang dapat diterima oleh lapisan perkerasan sebelum mengalami kerusakan tersebut. Perhitungan N_f dilakukan dengan menggunakan Persamaan 5.6. dan didapatkan hasil kondisi *existing* menunjukkan bahwa lapisan perkerasan *existing* hanya mampu menahan 16.240.961 repetisi beban sebelum mengalami retak lelah.

b. Kontrol N_r (*Rutting*)

Rutting atau deformasi permukaan jalan akibat tekanan vertikal yang berulang pada lapisan tanah dasar adalah masalah umum yang dihadapi oleh banyak struktur perkerasan. Maka, untuk menilai kapasitas perkerasan dalam menahan kerusakan akibat *rutting*, diperlukan perhitungan N_r (jumlah repetisi beban) yang mengukur jumlah siklus beban yang dapat diterima oleh perkerasan sebelum terjadi alur pada permukaan jalan. Nilai N_r dilakukan menggunakan Persamaan 5.7. dan didapatkan hasil N_r kondisi perkerasan *existing* hanya mampu menahan 765.825 repetisi beban sebelum terjadi *rutting*, yang menunjukkan kerentanannya terhadap deformasi akibat beban lalu lintas berulang.

c. Kontrol N_d (*Permanent Deformation*)

Deformasi permanen pada perkerasan terjadi ketika regangan tekan vertikal yang berulang menyebabkan lapisan tanah dasar (*subgrade*) mengalami perubahan bentuk yang tidak dapat kembali ke kondisi semula. Oleh karena itu, untuk mengukur ketahanan perkerasan terhadap deformasi permanen, diperlukan perhitungan N_d (jumlah repetisi beban) yang menentukan berapa banyak siklus beban yang dapat diterima perkerasan sebelum deformasi permanen terjadi. Perhitungan N_d dilakukan menggunakan Persamaan 5.8 dan hasil N_d untuk kondisi *existing* menunjukkan bahwa perkerasan hanya mampu menahan 300.041 repetisi beban sebelum mengalami deformasi permanen. Kondisi ini mencerminkan kerentanannya terhadap kerusakan struktural yang

disebabkan oleh tekanan berulang dari beban lalu lintas. Deformasi permanen ini terjadi ketika regangan tekan vertikal yang berulang pada lapisan perkerasan, terutama pada tanah dasar atau *subgrade*, menyebabkan perubahan bentuk yang tidak dapat kembali ke kondisi semula. Ini menunjukkan bahwa perkerasan *existing* kurang tahan terhadap beban lalu lintas yang berat dan berulang, yang mempercepat kerusakan pada struktur jalan. Hasil perhitungan ini memberikan gambaran tentang daya tahan perkerasan terhadap beban lalu lintas berulang dan potensi kerusakan yang dapat terjadi pada lapisan *subgrade*.

4. **Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan *Existing* Berdasarkan Hasil KENPAVE**
 Prediksi umur pelayanan jalan adalah suatu estimasi yang menggambarkan waktu yang dibutuhkan agar suatu ruas jalan tetap berfungsi dengan baik sebelum memerlukan pemeliharaan atau rehabilitasi. Dengan perhitungan yang tepat, prediksi ini dapat digunakan untuk merencanakan pemeliharaan jalan guna menjaga keamanan, kenyamanan, dan efisiensi selama umur rencana yang ditetapkan.

Dalam perhitungan prediksi umur pelayanan perkerasan, salah satu komponen utama yang digunakan adalah *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL), yaitu jumlah total beban lalu lintas ekuivalen yang diterima oleh perkerasan sepanjang umur rencana. CESAL ini dihitung dengan mengonversi volume lalu lintas menjadi beban ekuivalen yang dapat diprediksi berdasarkan karakteristik kendaraan, yang dihitung menggunakan *Vehicle Damage Factor* (VDF). Proses ini penting untuk memperkirakan kerusakan yang ditimbulkan oleh berbagai jenis kendaraan, terutama kendaraan dengan berat berlebih. Selain itu, untuk menghitung prediksi umur pelayanan perkerasan, aplikasi KENPAVE juga memperhitungkan Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) dan faktor distribusi lajur (DL) serta faktor distribusi arah (DD) sesuai dengan pedoman dari Bina Marga 2024.

Penggunaan KENPAVE memiliki keunggulan dalam memodelkan interaksi antar lapisan perkerasan secara lebih rinci. Aplikasi ini dapat menghitung tegangan dan regangan di berbagai titik pada perkerasan, yang menjadi dasar

perhitungan untuk memprediksi umur pelayanan jalan. Untuk menganalisis potensi kerusakan, terutama yang disebabkan oleh beban berulang, KENPAVE mengidentifikasi dua jenis kerusakan utama, yaitu *fatigue cracking* (retak lelah) dan *rutting* (alur pada permukaan jalan) yang terjadi akibat repetisi beban. Pada penelitian ini, faktor pertumbuhan lalu lintas digunakan sebesar 3,5% per tahun, yang mempengaruhi proyeksi volume kendaraan yang akan melintas di masa depan. Proses perhitungan prediksi umur pelayanan dilakukan dengan cara yang sama seperti yang dijelaskan pada subbab 4 dan didapatkan hasil seperti pada Tabel 5.11. Nilai umur pelayanan yang dihasilkan dari analisis KENPAVE ini selanjutnya digunakan untuk menilai sejauh mana struktur perkerasan mampu menahan beban lalu lintas selama umur rencana yang telah ditetapkan.

Tabel 5.11 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Jalan

Jenis Kerusakan	<i>Existing</i>
<i>Fatigue Cracking</i>	34
<i>Rutting</i>	3
<i>Deformation Permanent</i>	1

Dari hasil analisis yang dilakukan, dapat dilihat bahwa untuk kerusakan *fatigue cracking*, perkerasan pada kondisi *existing* hanya mampu bertahan sekitar 34 tahun sebelum terjadi kerusakan. Untuk kerusakan *rutting*, yang disebabkan oleh regangan tekan vertikal, perkerasan *existing* hanya dapat bertahan selama 3 tahun. Sedangkan untuk *permanent deformation*, yang dapat mengganggu kenyamanan dan keselamatan pengguna jalan, perkerasan pada *existing* hanya mampu bertahan selama 1 tahun.

5.4 Penentuan Tebal Perkerasan Alternatif

Berdasarkan hasil analisis menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE, diperoleh bahwa struktur perkerasan *existing* pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 memiliki nilai regangan tarik pada lapisan bawah aspal dan regangan tekan pada lapisan tanah dasar yang melebihi batas kriteria desain. Nilai prediksi umur pelayanan yang dihasilkan juga menunjukkan umur

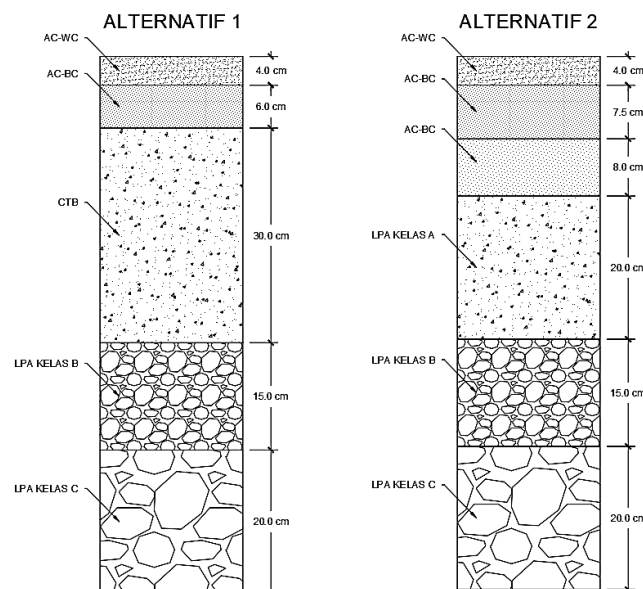
pelayanan sisa perkerasan lebih rendah dari umur rencana 20 tahun sebagaimana disyaratkan dalam pedoman MDPJ 2024. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa struktur perkerasan *existing* tidak lagi mampu menahan beban lalu lintas aktual secara optimal, terutama dengan peningkatan arus kendaraan menuju kawasan wisata Kaliurang. Oleh karena itu, perlu dilakukan perencanaan ulang ketebalan perkerasan (*redesign*) untuk mendapatkan struktur yang memiliki umur pelayanan lebih panjang dan kinerja struktural yang lebih baik.

Setelah memperoleh nilai CESAL (CESAL4 dan CESAL5) untuk periode faktual dan normal, langkah berikutnya adalah menentukan ketebalan struktur perkerasan yang dapat menahan beban lalu lintas kumulatif selama umur rencana. CESAL4 digunakan untuk analisis kondisi lalu lintas saat ini (tahun faktual), menghitung beban sumbu ekuivalen berdasarkan data lalu lintas yang ada. CESAL5 digunakan untuk proyeksi jangka panjang, menghitung kumulatif beban berdasarkan proyeksi pertumbuhan lalu lintas hingga tahun normal (misalnya 4 tahun setelah tahun faktual). Dalam MDP 2024 untuk menentukan jenis perkerasan, menggunakan nilai CESAL5.

Meskipun CESAL5 yang digunakan untuk perencanaan jangka panjang dan menentukan ketebalan perkerasan jalan, CESAL4 tetap dihitung dalam MDP 2024 karena berfungsi untuk memvalidasi kondisi lalu lintas saat ini atau tahun faktual. Perhitungan CESAL4 memberikan gambaran mengenai beban lalu lintas yang ada pada saat survei dilakukan, yang penting untuk memastikan bahwa proyeksi yang dilakukan dengan CESAL5 didasarkan pada data yang akurat dan relevan. Selain itu, CESAL4 juga memungkinkan untuk membandingkan kondisi lalu lintas saat ini dengan proyeksi di masa depan, memastikan bahwa CESAL5 yang digunakan untuk proyeksi jangka panjang sesuai dengan tren yang ada. Dengan demikian, meskipun CESAL5 yang menjadi dasar utama dalam perencanaan, CESAL4 tetap dihitung untuk memberikan konteks dan validitas dalam perhitungan proyeksi pertumbuhan lalu lintas.

Jenis perkerasan yang dipilih mengacu pada Tabel 3.2, yang mengklasifikasikan perkerasan berdasarkan ESA5, dengan hasil perhitungan menunjukkan nilai ESA5 sebesar 8.260.815,96. Oleh karena itu, jenis perkerasan

yang dipilih adalah perkerasan lentur dengan lapisan fondasi agregat, dan ketebalan perkerasan disesuaikan dengan katalog yang disajikan dalam Bagan-Desain, seperti yang terlihat pada Gambar 5.14.



Gambar 5.14 Tebal Lapisan Perkerasan Alternatif

Gambar 5.14 menunjukkan dua alternatif struktur perkerasan standar yang terdapat dalam pedoman Bina Marga (MDP 2024). Alternatif 1 (kiri) memadukan lapisan permukaan tipis (AC-WC 4 cm + AC-BC 6 cm) di atas CTB (*Cement Treated Base*) tebal 30 cm, lalu dilanjutkan LPA Kelas B 15 cm dan LPA Kelas C 20 cm. Alternatif 2 (kanan) menggunakan lapisan permukaan sedikit lebih tebal (AC-WC 4 cm dan dua lapis AC-BC 15,5 cm), diikuti LPA Kelas A 20 cm, LPA Kelas B 15 cm dan LPA Kelas C 20 cm.

Secara teknis, CTB pada alternatif 1 adalah lapisan berikatan (*bounded*) yang memberikan modul tinggi dan tahan kelembaban; CTB efektif menaikkan kapasitas dukung struktur ketika tanah dasar relatif lunak (CBR rendah) atau ketika diperlukan lapisan *base* yang kuat tanpa bergantung sepenuhnya pada agregat kelas tinggi. Karena CTB bersifat terikat secara kimia (adanya semen), lapisan ini mampu menahan beban besar dengan penurunan tebal lapisan agregat berbutir di atasnya, tetapi biaya material, proses kontrol mutu, dan potensi retak reflektif harus diperhitungkan. Studi-studi aplikasi CTB dan panduan teknis menunjukkan CTB

cocok untuk kondisi *subgrade* lemah dan untuk memperpanjang umur perkerasan bila pelaksanaan dan *curing* dikelola dengan baik.

Sebaliknya, alternatif 2 menekankan penggunaan Lapis Fondasi Agregat (LPA) Kelas A yang memiliki mutu agregat lebih tinggi dan sifat mekanik yang lebih baik dibanding LPA Kelas B/C. Bila material agregat berkualitas tersedia dan nilai CBR tanah dasar cukup (tidak sangat lemah), pendekatan berbutir (LPA Kelas A dan lapisan AC-BC yang lebih tebal) sering lebih ekonomis dan lebih mudah dikerjakan di lapangan dibanding CTB, serta memberi performa yang baik terhadap retak leleh dan deformasi bila dirancang sesuai CESAL.

5.5 Evaluasi Perkerasan Alternatif

Pada bagian ini, dilakukan evaluasi terhadap perkerasan alternatif yang dirancang berdasarkan hasil analisis perkerasan *existing* dan pedoman MDPJ 2024. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai kinerja struktur perkerasan alternatif dalam menahan beban lalu lintas serta memastikan umur pelayanan yang direncanakan lebih dari 20 tahun. Evaluasi dilakukan menggunakan dua aplikasi mekanistik-elastis, WinJULEA dan KENPAVE, yang masing-masing memberikan simulasi mengenai tegangan, regangan, dan prediksi umur pelayanan perkerasan alternatif. Hasil dari kedua aplikasi ini akan memberikan gambaran yang lebih jelas tentang performa perkerasan alternatif dalam kondisi lapangan yang sesungguhnya.

5.5.1 Evaluasi Perkerasan Alternatif Menggunakan Aplikasi WinJULEA

Evaluasi perkerasan alternatif dilakukan dengan menggunakan aplikasi WinJULEA untuk menganalisis respons struktur perkerasan terhadap beban lalu lintas yang direncanakan. Proses ini dimulai dengan memasukkan data ketebalan lapisan perkerasan yang telah disesuaikan, serta karakteristik material seperti modulus elastisitas dan *poisson's ratio* untuk tiap lapisan. Setelah itu, WinJULEA menjalankan simulasi untuk menghitung distribusi tegangan dan regangan yang terjadi akibat beban kendaraan sesuai dengan kondisi yang diinginkan.

Hasil analisis dari WinJULEA digunakan untuk menilai seberapa efektif perkerasan alternatif dalam menahan beban yang diperkirakan. Perhitungan ini juga memastikan bahwa perkerasan alternatif dapat memenuhi batas kinerja yang

ditetapkan oleh pedoman MDPJ 2024, termasuk umur pelayanan yang diharapkan lebih dari 20 tahun. Dengan pendekatan ini, dapat dipastikan bahwa desain perkerasan alternatif yang diusulkan tidak hanya efisien, tetapi juga aman dan sesuai dengan standar teknis yang berlaku.

1. Data *Input* WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif

Pada evaluasi perkerasan alternatif, data *input* yang digunakan mengikuti prosedur yang serupa dengan perkerasan *existing*, namun dengan penyesuaian pada ketebalan lapisan dan material yang telah direncanakan untuk desain alternatif. Ketebalan lapisan yang digunakan pada alternatif 1 dan alternatif 2 telah disesuaikan dengan perencanaan desain baru (Gambar 5.14), dengan variasi pada lapis permukaan, lapis pengikat, serta lapisan fondasi atas dan bawah. Hal ini memungkinkan perbandingan kinerja antara struktur jalan *existing* dan alternatif yang diusulkan.

Data lain yang dimasukkan mencakup modulus elastisitas dan poisson's ratio untuk setiap lapisan perkerasan alternatif. Data material untuk perkerasan alternatif 1 dan alternatif 2 dapat dilihat pada Tabel 5.12, menunjukkan rincian data material yang digunakan untuk perkerasan alternatif 1 dan alternatif 2, termasuk nilai modulus elastisitas dan *poisson's ratio* yang disesuaikan untuk masing-masing lapisan perkerasan. Nilai modulus elastisitas yang lebih tinggi pada lapisan CTB pada alternatif 1 dan LPA Kelas A pada alternatif 2 mempengaruhi distribusi tegangan dan regangan, yang akan berdampak pada ketahanan perkerasan terhadap beban lalu lintas.

Tabel 5.12 Data Material Lapisan Alternatif 1 dan Alternatif 2

Lapisan	Alternatif 1		Alternatif 2	
	Modulus (kPa)	Poisson's Ratio	Modulus (kPa)	Poisson's Ratio
AC-WC	1.100.000	0,4	1.100.000	0,4
AC-BC	1.200.000	0,4	1.200.000	0,4
CTB	500.000	0,2	-	-
LPA Kelas A	-	-	220.000	0,35
LPA Kelas B	170.000	0,35	170.000	0,35
LPA Kelas C	131.000	0,35	131.000	0,35
<i>Subgrade</i>	60.000	0,45	60.000	0,45

Sebagaimana halnya dengan perkerasan *existing*, parameter beban sumbu standar (SADT) digunakan untuk pembebanan, di mana nilai pembebanan dibagi merata ke empat roda kendaraan untuk menghitung distribusi beban yang diterima perkerasan alternatif. Selain itu penentuan titik evaluasi dan titik pengamatan juga dilakukan dengan proses yang sama pada evaluasi perkerasan *existing*. Dengan data *input* yang sesuai, WinJULEA dapat menghitung respons perkerasan alternatif terhadap beban lalu lintas, dan hasil analisis dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi kerusakan serta memperkirakan umur pelayanan perkerasan alternatif tersebut.

Setelah data terkait ketebalan lapisan, karakteristik material, pembebanan, titik evaluasi, dan titik tinjauan untuk perkerasan alternatif dimasukkan, langkah berikutnya adalah menjalankan perhitungan dengan mengklik tombol “Calculate” pada aplikasi WinJULEA. Proses ini menghasilkan distribusi tegangan dan regangan pada titik evaluasi yang telah ditentukan. Gambar 5.15 dan Gambar 5.16 menunjukkan ringkasan data lapisan perkerasan alternatif beserta parameter pembebanan yang digunakan dalam analisis. Hasil keluaran ini digunakan sebagai evaluasi kemampuan struktur perkerasan alternatif dalam menahan beban lalu lintas dan untuk membandingkan kinerja antara kondisi *existing* dan alternatif.

WinJULEA: [D:\Kuliah\Semester 7\TA\Analisis JI Yogyakarta Pakem (Alt 6)\Jes]

File Edit Help

Input Layers

	Thickness	E-Modulus	PP	Slp
1	4.0000	0.11000E+07	0.40000	0.0000
2	6.0000	0.12000E+07	0.40000	0.0000
3	30.000	0.50000E+06	0.20000	0.0000
4	15.000	0.17000E+06	0.25000	0.0000
5	20.000	0.13100E+06	0.25000	0.0000
6	0.0000	60000	0.45000	

Input Loads

	X-Coord	Y-Coord	Load	Contact Area
1	0.0000	0.0000	0.20000E+06	363.64
2	0.0000	33.000	0.20000E+06	363.64
3				
4				
5				

Input Evaluation Points

	X-Coord	Y-Coord
1	0.0000	0.0000
2	0.0000	10.000
3	0.0000	16.500
4		
5		
6		

Input Calculation Depths

	Depth
1	0.0000
2	4.0000
3	9.9995
4	10.001
5	40.000
6	55.000

Results of Calculations Points

	Point 1	Point 2	Point 3
X-Coord			
Y-Coord			
Z-Coord			
Stress_X			
Stress_Y			
Stress_Z			
ShearStress_XZ			
ShearStress_YZ			
ShearStress_XY			
Strain_X			
Strain_Y			
Strain_Z			
ShearStrain_XZ			
ShearStrain_YZ			
ShearStrain_XY			
Displ_X			
Displ_Y			
Displ_Z			
PrincStress_1			
PrincStress_2			
PrincStress_3			
PrincStrain_1			
PrincStrain_2			

Calculate

Save

Open

Clear All

Report

About

Exit

ERDC-WES
Artifacts &
Pavements
Branch

Loads are assumed to be applied on uniform and circular contact areas. (MaxLoads=100)

Gambar 5.15 Data *Input* WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 1

WinJULEA: [D:\Kuliah\Semester 7\TA\Analisis JI Yogyakarta Pakem (Alt 9)\Jes]

File Edit Help

Input Layers

	Thickness	E-Modulus	PR	Slp
1	4.0000	0.11000E+07	0.40000	0.0000
2	7.5000	0.12000E+07	0.40000	0.0000
3	8.0000	0.12000E+07	0.40000	0.0000
4	20.000	0.22000E+06	0.35000	0.0000
5	15.000	0.17000E+06	0.35000	0.0000
6	20.000	0.13100E+06	0.35000	0.0000

Input Loads

	X-Coord	Y-Coord	Load	Contact Area
1	0.0000	0.0000	0.20000E+06	363.64
2	0.0000	33.000	0.20000E+06	363.64
3				
4				
5				

Input Evaluation Points

	X-Coord	Y-Coord
1	0.0000	0.0000
2	0.0000	10.000
3	0.0000	16.500
4		
5		
6		

Input Calculation Depths

	Depth
1	0.0000
2	4.0000
3	11.500
4	19.500
5	19.500
6	38.500

Results of Calculations Points

	Point 1	Point 2	Point 3
X-Coord			
Y-Coord			
Z-Coord			
Stress_X			
Stress_Y			
Stress_Z			
ShearStress_XZ			
ShearStress_YZ			
ShearStress_XY			
Strain_X			
Strain_Y			
Strain_Z			
ShearStrain_XZ			
ShearStrain_YZ			
ShearStrain_XY			
Displ_X			
Displ_Y			
Displ_Z			
PrincStress_1			
PrincStress_2			
PrincStress_3			
PrincStrain_1			
PrincStrain_2			

Calculate

Save

Open

Clear All

Report

About

Exit

ERDC-WES
Airfields &
Pavements
Branch

Loads are assumed to be applied on uniform and circular contact areas. (MaxLoads=100)

Gambar 5.16 Data Input WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 2

2. Hasil Analisis WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif

Setelah seluruh data untuk perkerasan alternatif dimasukkan ke dalam aplikasi WinJULEA, proses perhitungan dilakukan untuk menghasilkan distribusi tegangan dan regangan pada setiap lapisan perkerasan. Hasil simulasi ini berfokus pada regangan tarik horizontal di dasar lapisan aspal dan regangan tekan vertikal di permukaan tanah dasar, dua parameter utama yang berkaitan dengan kerusakan akibat beban berulang, yaitu retak lelah (*fatigue cracking*) dan deformasi permanen (*rutting*). Hasil analisis ini digunakan untuk menilai performa struktur perkerasan alternatif dalam menahan beban lalu lintas, serta untuk membandingkan potensi kerusakan yang mungkin terjadi pada kedua alternatif dibandingkan dengan kondisi perkerasan *existing*. Pada Tabel 5.13 dan Tabel 5.14, menampilkan hasil analisis lengkap yang memberikan informasi terkait distribusi tegangan dan regangan pada perkerasan alternatif.

Tabel 5.13 Output Analisis WinJULEA untuk Alternatif 1

No. Koordinat (x ; y)	Horizontal Regangan	Vertikal Regangan	Vertikal Regangan
	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 75,0005 cm
0 ; 0	0,0001516	0,0003013	0,000203
0 ; 10	0,0001288	0,0001376	0,000214
0 ; 16,5	0,0001072	0,00002708	0,0002159
Nilai Max	0,0001516	0,0003013	0,0002159

Tabel 5.14 *Output* Analisis WinJULEA untuk Alternatif 2

No. Koordinat (x ; y)	Horizontal Regangan	Vertikal Regangan	Vertikal Regangan
	Kedalaman 19,4995 cm	Kedalaman 19,4995 cm	Kedalaman 74,5005 cm
0 ; 0	0,0002083	0,0002688	0,0002277
0 ; 10	0,0002128	0,0002304	0,0002402
0 ; 16,5	0,0002098	0,0002054	0,0002425
Nilai Max	0,0002128	0,0002688	0,0002425

Tabel 5.13, dan Tabel 5.14 menunjukkan hasil analisis dari WinJULEA untuk perkerasan alternatif yang berbeda. Pada Tabel 5.13 yang menunjukkan alternatif 1, kedalaman 9,9995 cm (lapisan terbawah aspal) dan 75,005 cm (lapisan *subgrade*) dianalisis dengan cara yang serupa, dengan fokus pada horizontal regangan untuk memprediksi keretakan pada lapisan aspal, dan vertikal regangan untuk mengukur potensi deformasi pada *subgrade*. Sementara itu, Tabel 5.14 menggambarkan analisis untuk alternatif 2, dengan kedalaman 19,4995 cm pada lapisan perkerasan dan 74,5005 cm pada *subgrade*. Seperti sebelumnya, horizontal regangan pada lapisan aspal digunakan untuk memprediksi *fatigue cracking* dan *rutting*, sementara vertikal regangan pada *subgrade* mengukur deformasi yang terjadi di lapisan dasar perkerasan.

Berdasarkan hasil analisis menggunakan WinJULEA, dapat dilihat bahwa kondisi perkerasan alternatif 1 dan alternatif 2, nilai regangan maksimum pada lapisan aspal maupun tanah dasar menunjukkan penurunan yang cukup signifikan dibandingkan kondisi *existing*. Hal ini mengindikasikan bahwa kedua alternatif perkerasan mampu memberikan kinerja struktural yang lebih baik dalam menahan beban lalu lintas, dengan potensi kerusakan akibat retak lelah (*fatigue cracking*) maupun deformasi permanen (*rutting*) yang lebih rendah.

3. Kontrol Repetisi Beban Perkerasan Alternatif Berdasarkan Hasil WinJULEA
Setelah diperoleh nilai tegangan dan regangan dari hasil analisis menggunakan WinJULEA untuk perkerasan alternatif, langkah selanjutnya adalah melakukan kontrol repetisi beban untuk memprediksi tingkat ketahanan perkerasan alternatif terhadap kerusakan selama umur rencana. Proses ini dilakukan dengan cara yang sama seperti pada perkerasan *existing*,

yaitu untuk memprediksi jumlah siklus beban yang dapat diterima oleh perkerasan alternatif sebelum masing-masing jenis kerusakan mencapai batas kritis, yang akhirnya digunakan untuk menentukan umur pelayanan perkerasan alternatif tersebut.

a. Kontrol Nf (*Fatigue Cracking*)

Untuk perkerasan alternatif, Nf adalah jumlah repetisi beban lalu lintas yang dapat diterima oleh lapisan aspal sebelum terjadi retak lelah (*fatigue cracking*). Pada alternatif, perubahan ketebalan lapisan dan penggunaan material seperti CTB dan LPA Kelas A dapat mempengaruhi daya tahan lapisan aspal terhadap beban berulang. Dengan menggunakan Persamaan 5.6, perhitungan Nf untuk perkerasan alternatif memberikan hasil yang berbeda dibandingkan perkerasan *existing*, menunjukkan perbedaan potensi kerusakan pada lapisan aspal. Hasil perhitungan untuk perkerasan alternatif dapat dilihat pada Tabel 5.15.

Tabel 5.15 Hasil Perhitungan Nilai Nf Perkerasan Alternatif Berdasarkan Output WinJULEA

Lapisan Perkerasan	Hasil Nf (ESA5)
Alternatif 1	478.942.719
Alternatif 2	127.560.396

Berdasarkan hasil perhitungan nilai Nf pada Tabel 5.15, dapat dilihat bahwa perkerasan alternatif 1 dan alternatif 2 menunjukkan ketahanan yang jauh lebih tinggi, yaitu masing-masing mencapai sekitar 478,94 juta dan 127,56 juta repetisi beban. Hal ini menunjukkan bahwa kedua alternatif desain memiliki kemampuan yang jauh lebih baik dalam menahan kerusakan akibat *fatigue cracking* dibandingkan kondisi *existing*. Dengan demikian, penerapan alternatif perkerasan, khususnya alternatif 1 yang menghasilkan nilai Nf paling besar, dapat memberikan umur pelayanan jalan yang lebih panjang serta meningkatkan kinerja struktural jalan terhadap beban lalu lintas berulang.

b. Kontrol Nr (*Rutting*)

Nilai Nr untuk perkerasan alternatif dihitung berdasarkan regangan tekan vertikal yang terjadi pada tanah dasar, yang merupakan faktor utama penyebab *rutting*. Pada alternatif, ketebalan lapisan CTB pada alternatif 1 dan LPA Kelas A pada alternatif 2 dapat meningkatkan stabilitas struktural perkerasan dalam menahan beban berulang. Hasil perhitungan menggunakan Persamaan 5.7 menunjukkan bahwa perkerasan alternatif memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap deformasi permanen pada lapisan tanah dasar, sehingga mengurangi risiko terjadinya *rutting* dibandingkan kondisi *existing*. Dengan persamaan tersebut didapatkan hasil perhitungan Nr untuk perkerasan alternatif seperti pada Tabel 5.16 sebagai berikut:

Tabel 5.16 Hasil Perhitungan Nilai Nr Perkerasan Alternatif Berdasarkan Output WinJULEA

Lapisan Perkerasan	Hasil Nr (ESA5)
Alternatif 1	7.954.089
Alternatif 2	13.156.237

Nilai Nr merepresentasikan kapasitas maksimum perkerasan dalam menahan beban lalu lintas kumulatif hingga mencapai batas kegagalan alur (*rutting*), yang secara mekanistik dihitung dari regangan tekan vertikal yang terjadi pada lapisan berbutir dan tanah dasar (*subgrade*). Semakin besar Nr, semakin rendah regangan kritis yang dialami lapisan bawah, dan semakin baik stabilitas struktural perkerasan terhadap deformasi permanen. Berdasarkan *Output WinJULEA*, peningkatan terjadi pada desain alternatif perkuatan. Misalnya, alternatif 1 menunjukkan kenaikan Nr yang signifikan menjadi 7.954.089 ESA5, yang merupakan peningkatan kurang lebih sepuluh kali lipat dari kondisi *existing*. Peningkatan ini didorong oleh intervensi struktural yang menambah kekakuan sistem secara keseluruhan, seperti penggunaan lapisan *Cement Treated Base* (CTB) atau penebalan lapisan beraspal. Secara mekanistik, penggunaan material dengan modulus elastisitas tinggi (CTB) sangat

efektif dalam mereduksi ε_v yang ditransmisikan ke *subgrade* (Rojas dan Sandoval, 2020). Selanjutnya, alternatif 2 menunjukkan nilai N_r yang paling optimal, mencapai 13.156.237 ESA5. Kapasitas yang melebihi 13 juta ESA5 ini merupakan bukti keberhasilan desain perkuatan dalam menciptakan struktur perkerasan yang jauh lebih kuat dan tahan lama.

c. Kontrol N_d (*Permanent Deformation*)

Kontrol N_d pada perkerasan alternatif mengukur kapasitas perkerasan untuk menahan deformasi permanen yang terjadi pada lapisan perkerasan akibat beban berulang. Dengan menggunakan Persamaan 5.8, perhitungan N_d menunjukkan hasil yang berbeda untuk perkerasan alternatif dibandingkan *existing*, dimana material dan desain alternatif memberikan hasil yang lebih baik dalam hal ketahanan terhadap deformasi permanen. Peningkatan ketebalan lapisan pengikat dan penggunaan material dengan modulus elastisitas yang lebih tinggi, seperti LPA Kelas A pada alternatif 2, menunjukkan kapasitas yang lebih besar dalam menahan beban, yang pada gilirannya memperpanjang umur pelayanan perkerasan. Hasil perhitungan N_d dapat dilihat pada Tabel 5.17 sebagai berikut.

Tabel 5.17 Hasil Perhitungan Nilai N_d Perkerasan Alternatif Berdasarkan Output WinJULEA

Lapisan Perkerasan	Hasil N_d (ESA5)
Alternatif 1	35.138.499
Alternatif 2	21.124.734

Hasil perhitungan N_d menggunakan WinJULEA seperti pada Tabel 5.17, menunjukkan perbedaan kapasitas yang sangat mencolok antara kondisi *existing* dan alternatif desain yang diusulkan. Perkerasan yang direvitalisasi melalui desain alternatif menunjukkan peningkatan ketahanan deformasi yang masif. Alternatif 1 menunjukkan peningkatan N_d yang melonjak menjadi 35.138.499 ESA5. Alternatif 2 juga menunjukkan kapasitas yang sangat tinggi, yaitu 21.124.734 ESA5. Peningkatan kapasitas N_d hingga lebih dari seratus kali lipat ini merupakan dampak langsung dari intervensi

struktural yang meningkatkan modulus kekakuan lapisan di bawah AC, seperti penambahan atau penebalan lapisan yang kaku (Lapisan Fondasi Agregat berkualitas tinggi). Lapisan kaku ini bekerja secara efektif untuk mereduksi dan mendistribusikan regangan tekan vertikal ke area yang lebih luas, sehingga regangan kritis yang mencapai lapisan di bawahnya berada di bawah batas ambang kegagalan deformasi (Sasongko, dkk., 2021). Perbedaan N_d yang signifikan ini memvalidasi bahwa desain alternatif berhasil mengatasi kelemahan utama struktur perkerasan *existing*, menjamin masa layanan yang lebih panjang dari umur rencana 20 tahun, serta memberikan faktor keamanan yang memadai terhadap risiko *permanent deformation*.

4. Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Alternatif Berdasarkan Hasil WinJULEA

Pada perhitungan prediksi umur pelayanan untuk perkerasan alternatif, data yang telah dimasukkan ke dalam aplikasi WinJULEA sebelumnya digunakan untuk menghitung distribusi tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan. Berdasarkan hasil perhitungan ini, dilakukan estimasi terhadap umur pelayanan perkerasan alternatif dengan mempertimbangkan beban lalu lintas kumulatif dan karakteristik material yang digunakan, seperti lapisan CTB pada alternatif 1 dan LPA Kelas A pada alternatif 2.

Perhitungan prediksi umur pelayanan dilakukan dengan mempertimbangkan jenis kerusakan utama pada perkerasan lentur, yaitu *fatigue cracking*, *rutting*, dan deformasi permanen. Penggunaan modulus elastisitas yang lebih tinggi pada alternatif 1 dan alternatif 2 meningkatkan ketahanan terhadap beban lalu lintas berulang, sehingga memperpanjang umur pelayanan perkerasan alternatif dibandingkan dengan perkerasan *existing*.

Tabel 5.18 menyajikan rekapitulasi prediksi umur pelayanan untuk perkerasan alternatif berdasarkan hasil perhitungan dengan WinJULEA. Hasil tersebut menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap kerusakan pada alternatif 1 dan alternatif 2, yang mengindikasikan umur pelayanan yang lebih panjang dibandingkan dengan kondisi *existing*.

Tabel 5.18 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Alternatif

Jenis Kerusakan	Prediksi Umur Pelayanan Jalan (Tahun)	
	Alternatif 1	Alternatif 2
<i>Fatigue Cracking</i>	122	84
<i>Rutting</i>	21	30
<i>Deformation Permanent</i>	51	39

Berdasarkan Tabel 5.18, dapat dilihat bahwa kondisi alternatif 1 menunjukkan ketahanan yang jauh lebih baik dengan prediksi umur pelayanan mencapai 122 tahun, dan alternatif 2 dengan umur pelayanan 84 tahun. Untuk kerusakan *rutting* (alur pada permukaan jalan), perkerasan alternatif 1 dan alternatif 2 masing-masing memiliki umur pelayanan 21 tahun dan 30 tahun. Begitu pula untuk kerusakan deformasi permanen (*permanent deformation*), pada kondisi alternatif 1 dan alternatif 2 menunjukkan umur pelayanan 51 tahun dan 39 tahun.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa perkerasan pada alternatif 1 dan alternatif 2 memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan dengan perkerasan *existing*. Peningkatan umur pelayanan terlihat jelas pada kerusakan *fatigue cracking* dan *rutting*, yang menunjukkan bahwa kedua alternatif mampu menahan beban lalu lintas berulang dengan lebih efektif. Keberhasilan desain ini disebabkan oleh ketebalan lapisan yang ditingkatkan serta penggunaan material berkualitas tinggi, sehingga mengurangi dampak negatif dari beban kendaraan berulang. Hal ini sejalan dengan temuan Zhuang, dkk., (2023) yang menyatakan bahwa ketahanan terhadap *fatigue* dan *rutting* sangat dipengaruhi oleh kualitas material serta karakteristik campuran aspal. Selain itu, penelitian Po, dkk., (2024) menunjukkan bahwa ketebalan lapisan aspal dan *base* merupakan faktor utama yang menentukan umur perkerasan terhadap retak leleh dan deformasi permanen, sehingga desain perkerasan yang tepat dapat memperpanjang umur layanan jalan. Dengan demikian, alternatif 1 dan alternatif 2 merupakan desain yang lebih optimal dibandingkan kondisi *existing* dalam menjaga kinerja struktural jalan.

5.5.2 Evaluasi Perkerasan Alternatif Menggunakan Aplikasi KENPAVE

Evaluasi struktur perkerasan alternatif menggunakan aplikasi KENPAVE juga merupakan tahap yang sangat penting dalam merancang dan merencanakan

pemeliharaan infrastruktur jalan. Dalam hal ini, penggunaan aplikasi KENPAVE memungkinkan untuk menganalisis respons struktural perkerasan alternatif terhadap beban lalu lintas yang diterima, dengan memperhitungkan distribusi tegangan dan regangan pada lapisan-lapisan perkerasan yang ada pada alternatif 1 dan alternatif 2.

KENPAVE, yang mengaplikasikan teori elastis berlapis (*multilayer elastic theory*), digunakan untuk memodelkan interaksi antar lapisan perkerasan dan memprediksi potensi kerusakan, seperti *fatigue cracking*, *rutting* dan deformasi permanen yang mungkin terjadi pada perkerasan alternatif. Aplikasi ini memungkinkan untuk melakukan evaluasi terhadap berbagai desain alternatif dan material yang digunakan pada perkerasan alternatif 1 dan alternatif 2, serta memperkirakan umur pelayanan berdasarkan hasil analisis.

Dengan menggunakan KENPAVE, analisis kinerja perkerasan alternatif dapat dilakukan dengan lebih mendalam dan akurat, karena aplikasi ini juga mempertimbangkan modulus elastisitas dan *poisson's ratio* yang berbeda pada setiap lapisan perkerasan alternatif. Dengan demikian, KENPAVE menjadi alat yang sangat berguna untuk memverifikasi desain alternatif dan memastikan bahwa struktur perkerasan dapat bertahan lebih lama, mengurangi kerusakan, serta meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap beban lalu lintas yang meningkat.

1. Data *Input* KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif

Pada evaluasi perkerasan alternatif menggunakan KENPAVE, data *input* yang dimasukkan untuk alternatif 1 dan alternatif 2 berbeda dengan kondisi *existing*, terutama pada ketebalan lapisan dan material yang digunakan. Perbedaan ini mencakup penggunaan lapisan CTB pada alternatif 1 dan LPA Kelas A pada alternatif 2, yang mempengaruhi modulus elastisitas dan *poisson's ratio*. Oleh karena itu, data terkait material lapisan untuk kedua alternatif dimasukkan ke dalam aplikasi KENPAVE, yang mengacu pada nilai yang relevan untuk setiap desain.

Data modulus elastisitas dan *poisson's ratio* yang digunakan dalam perkerasan alternatif mengacu pada material yang berbeda, sesuai dengan lapisan yang direncanakan untuk kedua alternatif tersebut. Tabel 5.12

menyajikan nilai modulus elastisitas dan *poisson's ratio* untuk masing-masing lapisan pada alternatif 1 dan alternatif 2, yang kemudian digunakan dalam pemodelan struktur perkerasan menggunakan KENPAVE. Sedangkan untuk ketebalan lapisan, data yang digunakan disesuaikan dengan desain perkerasan alternatif, dan dapat dilihat pada Gambar 5.14.

Sama halnya dengan evaluasi perkerasan *existing*, *Menu General* pada KENPAVE digunakan untuk mengatur parameter awal, namun dengan data yang lebih spesifik untuk perkerasan alternatif. Sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 5.6, pengaturan awal seperti jumlah lapisan, jumlah titik evaluasi, dan periode analisis juga disesuaikan dengan perkerasan alternatif yang direncanakan. Selanjutnya, *Menu Zcoord* digunakan untuk menentukan kedalaman titik evaluasi, dimana tampilannya dapat dilihat pada Gambar 5.7, untuk mengevaluasi potensi kerusakan pada lapisan aspal dan *subgrade* perkerasan alternatif. Data mengenai ketebalan lapisan dan *poisson's ratio* untuk perkerasan alternatif dapat ditemukan pada Tabel 5.12 dan untuk tampilan *Menu Layer* seperti pada Gambar 5.8.

Proses pemodelan beban di KENPAVE memanfaatkan *Menu Load* untuk mendefinisikan karakteristik beban kendaraan sesuai dengan Gambar 5.10, sementara hasil analisis dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Menu LGRAPH, tampilan Menu LGRAPH seperti pada Gambar 5.13, untuk memverifikasi hasil simulasi terhadap desain alternatif.

2. Hasil Analisis KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif

Setelah seluruh data *input* untuk perkerasan alternatif dimasukkan ke dalam aplikasi KENPAVE, hasil analisis berupa distribusi tegangan dan regangan pada setiap lapisan perkerasan diperoleh. Evaluasi ini penting untuk membandingkan kinerja perkerasan alternatif dengan kondisi *existing*, guna mengetahui seberapa besar peningkatan kinerja yang dapat dicapai dengan menggunakan desain alternatif. Parameter utama yang dianalisis meliputi regangan tarik horizontal pada lapisan aspal dan regangan tekan vertikal pada lapisan *subgrade*, yang digunakan untuk mengevaluasi potensi kerusakan akibat *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent deformation*. Hasil keluaran

analisis dari KENPAVE ditampilkan pada Tabel 5.19 dan Tabel 5.20, yang selanjutnya digunakan untuk membandingkan kinerja perkerasan kondisi *existing* dengan dua alternatif desain yang diusulkan.

Tabel 5.19 Output Analisis KENPAVE untuk Ketebalan Alternatif 1

No. Koordinat (x ; y)	Horizontal Regangan	Vertikal Regangan	Vertikal Regangan
	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 9,9995 cm	Kedalaman 75,0005 cm
0 ; 0	0,0001516	0,0003013	0,000203
0 ; 10	0,0001288	0,0001376	0,000214
0 ; 16,5	0,0001072	0,00002708	0,0002159
Nilai Max	0,0001516	0,0003013	0,0002159

Tabel 5.20 Output Analisis KENPAVE untuk Ketebalan Alternatif 2

No. Koordinat (x ; y)	Horizontal Regangan	Vertikal Regangan	Vertikal Regangan
	Kedalaman 19,4995 cm	Kedalaman 19,4995 cm	Kedalaman 74,5005 cm
0 ; 0	0,0002083	0,0002688	0,0002277
0 ; 10	0,0002128	0,0002304	0,0002402
0 ; 16,5	0,0002098	0,0002054	0,0002425
Nilai Max	0,0002128	0,0002688	0,0002425

Hasil analisis untuk alternatif 1 menunjukkan nilai regangan maksimum yang lebih rendah dibandingkan dengan kondisi *existing*. Regangan untuk *fatigue cracking* tercatat sebesar 0,0001516, untuk *rutting* 0,0003013, dan untuk *permanent deformation* 0,0002159. Angka-angka ini menunjukkan bahwa perkerasan alternatif 1 lebih tahan terhadap beban berulang dan dapat mengurangi potensi kerusakan lebih efektif dibandingkan kondisi *existing*.

Untuk alternatif 2, hasil analisis menunjukkan sedikit peningkatan dibandingkan dengan alternatif 1, dengan nilai regangan maksimum untuk *fatigue cracking* sebesar 0,0002128, *rutting* 0,0002688, dan *permanent deformation* 0,0002425. Meskipun alternatif 2 memiliki nilai regangan yang sedikit lebih tinggi daripada alternatif 1, namun tetap menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan perkerasan *existing*.

Secara keseluruhan, baik alternatif 1 maupun alternatif 2 menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam hal ketahanan terhadap kerusakan akibat *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent deformation*. Hal ini menunjukkan

bahwa peningkatan ketebalan lapisan dan pemilihan material yang lebih tahan lama dapat memperpanjang umur pelayanan jalan dan meningkatkan kinerja struktur perkerasan. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan pentingnya ketebalan lapisan dan karakteristik material dalam meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap kerusakan akibat beban lalu lintas berulang (Selsal, dkk., 2022; Joumblat, dkk., 2023).

3. Kontrol Repetisi Beban Perkerasan Alternatif Berdasarkan Hasil KENPAVE
Setelah seluruh data *input* untuk perkerasan alternatif dimasukkan ke dalam aplikasi KENPAVE dan perhitungan dilakukan, hasil analisis berupa distribusi tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan diperoleh. Hasil analisis ini sangat penting untuk menilai kinerja struktur perkerasan alternatif dalam menahan beban lalu lintas selama umur rencana. Salah satu parameter utama yang dianalisis adalah regangan tarik horizontal pada dasar lapisan aspal untuk mengevaluasi potensi *fatigue cracking* (retak lelah) dan regangan tekan vertikal pada lapisan *subgrade* untuk menilai potensi *rutting* serta *permanent deformation* (deformasi permanen).

a. Kontrol Nf (*Fatigue Cracking*)

Fatigue cracking terjadi ketika lapisan aspal mengalami regangan tarik berulang yang melemahkan ikatan antara aspal dan agregat. Untuk mengetahui ketahanan perkerasan alternatif terhadap kerusakan ini, perhitungan nilai Nf dilakukan dengan menggunakan Persamaan 5.6 dan didapatkan hasil seperti pada Tabel 5.21.

Tabel 5.21 Hasil Perhitungan Nilai Nf Perkerasan Alternatif Berdasarkan Output KENPAVE

Lapisan Perkerasan	Hasil Nf (ESA5)
Alternatif 1	483.916.817
Alternatif 2	128.031.121

Tabel 5.21 menunjukkan bahwa alternatif 1 mampu menahan hingga 483.916.817 repetisi beban, sedangkan alternatif 2 mampu menahan 128.031.121 repetisi beban, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi *existing* yang hanya mampu menahan 16.240.961 repetisi beban. Hal ini

menunjukkan bahwa desain alternatif dengan peningkatan ketebalan lapisan dan material yang lebih kuat, seperti penggunaan *Cement Treated Base* (CTB) pada alternatif 1, memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap kerusakan akibat siklus beban berulang.

Penelitian oleh Safrudin, dkk., (2023) membuktikan bahwa penggunaan material dengan modulus elastisitas tinggi dalam lapisan dasar perkerasan dapat mengurangi kerusakan akibat *fatigue cracking*. Dengan demikian, desain alternatif menunjukkan hasil yang lebih baik dalam hal ketahanan terhadap beban berulang dibandingkan dengan kondisi perkerasan *existing*. Selain itu, penelitian oleh Aszharri, dkk., (2024) menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan dan penggunaan material dengan modulus elastisitas tinggi secara signifikan meningkatkan ketahanan perkerasan lentur terhadap kerusakan akibat *fatigue cracking*.

b. Kontrol Nr (*Rutting*)

Rutting terjadi akibat tekanan vertikal yang berulang pada lapisan *subgrade*, menyebabkan pergeseran vertikal pada permukaan jalan. Untuk mengevaluasi ketahanan perkerasan terhadap *rutting*, perhitungan Nr dilakukan menggunakan Persamaan 5.7, didapatkan hasil pada Tabel 5.22.

Tabel 5.22 Hasil Perhitungan Nilai Nr Perkerasan Alternatif Berdasarkan Output KENPAVE

Lapisan Perkerasan	Hasil Nr (ESA5)
Alternatif 1	7.918.694
Alternatif 2	13.200.119

Berdasarkan hasil perhitungan Nr, alternatif 1 dan alternatif 2 menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap *rutting*, dengan nilai Nr masing-masing sebesar 7.918.694 dan 13.200.119 repetisi beban. Peningkatan nilai Nr pada desain alternatif ini disebabkan oleh penebalan lapisan dan penggunaan material yang lebih stabil, yang secara mekanistik mampu mendistribusikan beban dengan lebih efektif. Hal ini mendukung temuan dari penelitian Alifuddin, dkk., (2023) menyatakan bahwa selain penebalan lapisan dan penggunaan material yang stabil, peningkatan

modulus kekakuan lapisan fondasi juga berkontribusi signifikan dalam menahan deformasi permanen, sehingga memperlambat laju kerusakan *rutting*. Dengan demikian, desain alternatif lebih tahan lama terhadap kerusakan *rutting*.

c. Kontrol Nd (*Permanent Deformation*)

Deformasi permanen pada perkerasan terjadi ketika lapisan tanah dasar (subgrade) mengalami perubahan bentuk yang tidak dapat kembali ke bentuk semula setelah beban tidak ada. Perhitungan Nd dilakukan menggunakan Persamaan 5.8 dan hasilnya didapat seperti pada Tabel 5.23.

Tabel 5.23 Hasil Perhitungan Nilai Nd Perkerasan Alternatif Berdasarkan Output KENPAVE

Lapisan Perkerasan	Hasil Nd (ESA5)
Alternatif 1	35.211.423
Alternatif 2	20.930.431

Hasil perhitungan Nd, yang mengukur jumlah siklus beban hingga deformasi permanen terjadi, menunjukkan pada desain alternatif 1 dan alternatif 2, nilai Nd meningkat secara signifikan. Alternatif 1 menunjukkan kapasitas perkerasan yang dapat menahan hingga 35.211.423 repetisi beban, sementara alternatif 2 mencapai 20.930.431 repetisi beban. Kedua alternatif ini menunjukkan peningkatan signifikan dibandingkan dengan *existing*, yang hanya mampu menahan 300.041 repetisi beban. Peningkatan kapasitas ini disebabkan oleh penggunaan lapisan perkerasan yang lebih kaku, seperti lapisan fondasi agregat berkualitas tinggi, yang memiliki kekakuan lebih besar dalam menahan regangan tekan vertikal. Hal ini mengurangi dampak dari deformasi permanen pada lapisan tanah dasar dan meningkatkan ketahanan perkerasan terhadap kerusakan. Penelitian oleh Alifuddin, dkk. (2023) mengonfirmasi bahwa peningkatan modulus kekakuan lapisan fondasi secara signifikan dapat mengurangi potensi deformasi permanen pada perkerasan lentur, sehingga memperpanjang umur pelayanan jalan. Oleh karena itu, penerapan desain alternatif yang melibatkan lapisan-lapisan

perkerasan dengan kualitas material yang lebih baik memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan daya tahan jalan terhadap beban berulang, dan secara signifikan meningkatkan performa struktural jalan di masa depan.

4. Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Alternatif Berdasarkan Hasil KENPAVE

Prediksi umur pelayanan perkerasan alternatif bertujuan untuk memperkirakan berapa lama suatu perkerasan dapat bertahan sebelum memerlukan pemeliharaan atau rehabilitasi, dengan mempertimbangkan kondisi lalu lintas yang diproyeksikan selama umur rencana. Dengan menggunakan metode yang sama seperti pada perkerasan *existing*, faktor-faktor yang dihitung meliputi *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL), Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR), serta faktor distribusi lajur (DL) dan distribusi arah (DD), sesuai dengan pedoman Bina Marga 2024.

Aplikasi KENPAVE memberikan keunggulan dalam menganalisis interaksi antar lapisan perkerasan, dengan memperhitungkan tegangan dan regangan pada setiap titik lapisan, sehingga memungkinkan prediksi yang lebih akurat mengenai ketahanan perkerasan terhadap beban lalu lintas berulang. KENPAVE juga memodelkan kerusakan akibat beban berulang, seperti *fatigue cracking* dan *rutting*, yang terjadi seiring dengan waktu. Untuk prediksi umur pelayanan perkerasan alternatif, dilakukan perhitungan yang sama dengan menggunakan data yang relevan dan faktor pertumbuhan lalu lintas sebesar 3,5% per tahun.

Hasil analisis dari KENPAVE untuk perkerasan alternatif dapat dilihat pada Tabel 5.24, yang membandingkan ketahanan perkerasan alternatif dengan perkerasan *existing*.

Tabel 5.24 Rekapitulasi Prediksi Umur Pelayanan Perkerasan Jalan

Jenis Kerusakan	Prediksi Umur Pelayanan Jalan (Tahun)	
	Alternatif 1	Alternatif 2
<i>Fatigue Cracking</i>	122	84
<i>Rutting</i>	21	30
<i>Deformation Permanent</i>	51	39

Berdasarkan hasil perhitungan, alternatif 1 menunjukkan peningkatan umur pelayanan yang signifikan dibandingkan perkerasan *existing*. Untuk kerusakan *fatigue cracking*, umur pelayanan perkerasan alternatif meningkat menjadi 122 tahun pada alternatif 1 dan 84 tahun pada alternatif 2, jauh lebih baik dibandingkan dengan perkerasan *existing* yang hanya dapat bertahan 34 tahun. Hal ini disebabkan oleh peningkatan ketebalan lapisan perkerasan dan penggunaan material yang lebih tahan terhadap beban berulang, seperti *Cement Treated Base* (CTB) pada alternatif 1.

Untuk kerusakan *rutting*, yang dipengaruhi oleh regangan tekan vertikal pada tanah dasar, alternatif 1 mampu bertahan 21 tahun, sementara alternatif 2 bertahan 30 tahun, jauh lebih baik dibandingkan dengan 3 tahun pada kondisi *existing*. Peningkatan ketahanan terhadap *rutting* ini disebabkan oleh penggunaan material yang lebih stabil pada lapisan perkerasan, serta penebalan lapisan yang lebih baik, yang memperlambat kerusakan akibat beban vertikal yang berulang.

Untuk *permanent deformation*, yang merupakan kerusakan pada lapisan *subgrade* akibat regangan tekan vertikal berulang, alternatif 1 mampu bertahan 51 tahun, dan alternatif 2 bertahan 39 tahun, sementara perkerasan *existing* hanya mampu bertahan 1 tahun. Peningkatan ketahanan terhadap deformasi permanen ini disebabkan oleh penggunaan lapisan perkerasan yang lebih kaku, yang memungkinkan distribusi beban yang lebih baik ke lapisan bawah, mengurangi risiko deformasi pada tanah dasar.

Secara keseluruhan, baik alternatif 1 maupun alternatif 2 menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam hal ketahanan terhadap kerusakan, dibandingkan dengan perkerasan *existing*. Peningkatan ketebalan lapisan dan penggunaan material yang lebih baik pada kedua alternatif ini memberikan perbaikan yang substansial dalam memperpanjang umur pelayanan jalan dan mengurangi kerusakan struktural akibat beban lalu lintas berulang.

Dari hasil analisis prediksi umur pelayanan perkerasan jalan yang menggunakan KENPAVE, dapat disimpulkan bahwa desain alternatif 1

memberikan umur pelayanan yang paling lama, terutama dalam mengatasi kerusakan akibat *fatigue cracking* dan *rutting*, diikuti oleh alternatif 2. Sementara itu, perkerasan *existing* menunjukkan ketahanan yang lebih rendah dan umur pelayanan yang lebih pendek pada semua jenis kerusakan yang dianalisis. Peningkatan ketahanan pada desain alternatif ini disebabkan oleh ketebalan lapisan dan penggunaan material yang lebih kuat dan tahan lama, yang dapat meminimalkan kerusakan struktural akibat beban lalu lintas berulang.

5.6 Perbandingan Hasil Evaluasi Perkerasan Menggunakan Aplikasi WinJULEA dan Aplikasi KENPAVE

Perbandingan hasil evaluasi perkerasan jalan menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE bertujuan untuk mengidentifikasi perbedaan dalam pendekatan dan hasil analisis yang diberikan oleh kedua perangkat lunak tersebut. Perbandingan hasil evaluasi perkerasan antara WinJULEA dan KENPAVE dilakukan dengan *input* yang distandarkan (ketebalan lapisan, modulus elastisitas, *poisson's ratio*, konfigurasi beban, dan titik tinjau) sehingga perbedaan yang muncul dapat ditelaah sebagai efek numerik dan perbedaan formulasi internal kedua perangkat lunak. Perbandingan hasil evaluasi perkerasan jalan menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE difokuskan pada perbedaan dalam menghitung regangan pada lapisan-lapisan perkerasan pada titik-titik evaluasi yang sama.

WinJULEA, yang menggunakan pendekatan elastis berlapis, menghitung distribusi tegangan dan regangan secara cepat di setiap lapisan perkerasan, sementara KENPAVE memberikan analisis yang lebih mendalam dengan memperhitungkan interaksi antar lapisan yang lebih rinci. Perbandingan ini bertujuan untuk menilai keakuratan kedua aplikasi dalam memodelkan regangan yang terjadi pada perkerasan akibat beban lalu lintas, serta melihat aplikasi mana yang lebih efektif dalam menggambarkan potensi kerusakan struktural pada lapisan perkerasan.

Proses *input* data pada WinJULEA relatif lebih sederhana karena seluruh parameter dimasukkan dalam satu tampilan antarmuka (*interface*) utama. Pengguna dapat langsung mengisi nilai modulus elastisitas, *poisson's ratio*, ketebalan tiap lapisan, serta parameter beban pada satu lembar kerja tanpa harus berpindah menu, sehingga pengerjaan menjadi lebih cepat dan praktis, terutama untuk analisis awal atau perbandingan cepat antar skenario. Sebaliknya, pada KENPAVE, *input* data dilakukan melalui beberapa menu terpisah, di mana setiap menu memerlukan pengisian informasi spesifik, seperti ketebalan lapisan, modulus elastisitas, *poisson's ratio*, dan beban kendaraan. Meskipun proses ini lebih memakan waktu, KENPAVE menawarkan keunggulan dalam hal kedalaman dan detail analisis, karena memungkinkan pengguna untuk memasukkan data lebih rinci dan spesifik untuk setiap lapisan perkerasan, yang memberikan gambaran lebih komprehensif tentang respons perkerasan terhadap beban.

Evaluasi dilakukan pada tiga kondisi perkerasan yang berbeda, yaitu perkerasan *existing*, alternatif 1, dan alternatif 2. Ketiga kondisi ini dianalisis untuk melihat bagaimana setiap desain perkerasan merespons beban lalu lintas yang diterima selama umur rencananya. Perkerasan *existing* menggambarkan kondisi jalan yang saat ini digunakan, sedangkan alternatif 1 dan alternatif 2 merupakan desain perkerasan yang diusulkan dengan ketebalan lapisan dan material yang berbeda. Evaluasi regangan dilakukan pada titik tinjau dan titik evaluasi yang sama untuk ketiga kondisi perkerasan ini, untuk membandingkan kinerja struktural masing-masing desain dalam menahan beban lalu lintas.

Dari hasil evaluasi yang telah dilakukan, diperoleh nilai regangan pada titik tinjau dan titik evaluasi yang sama untuk kedua aplikasi. Meskipun WinJULEA dan KENPAVE menggunakan metode *input* dan analisis yang berbeda, hasil perbandingan regangan menunjukkan kecenderungan serupa dalam menggambarkan respons perkerasan terhadap beban lalu lintas serta potensi kerusakan seperti retak lelah dan deformasi permanen. Perbandingan hasil regangan antara kedua aplikasi dapat dilihat pada Tabel 5.25 sampai Tabel 5.27 untuk perkerasan *existing*, alternatif 1, dan alternatif 2.

Tabel–tabel ini membandingkan hasil analisis WinJULEA dan KENPAVE untuk regangan horizontal dan vertikal pada berbagai kedalaman perkerasan untuk ketebalan *existing*, alternatif 1, dan alternatif 2. Hasil regangan yang diperoleh dari kedua aplikasi ini menunjukkan pola yang hampir identik, meskipun terdapat sedikit perbedaan pada nilai regangan horizontal dan vertikal yang dihasilkan pada kedalaman tertentu. Sebagai contoh, pada Tabel 5.25 untuk perkerasan *existing*, regangan horizontal pada kedalaman 9,9995 cm menunjukkan nilai yang sangat mirip antara WinJULEA (0,0003600) dan KENPAVE (0,0003603), dengan perbedaan hanya sebesar 0,0000003, yang mencerminkan tingkat konsistensi antara kedua metode. Selain itu, meskipun perbedaan kecil ditemukan pada kedalaman lebih dalam, seperti pada kedalaman 40,005 cm (perkerasan *existing*), perbedaan regangan vertikal antara kedua aplikasi tetap sangat kecil, yakni 0,0005690 untuk WinJULEA dan 0,0005696 untuk KENPAVE. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun ada variasi kecil, kedua aplikasi menghasilkan hasil yang sangat serupa dan dapat digunakan untuk analisis yang lebih mendalam tentang ketahanan perkerasan terhadap beban lalu lintas. Perbandingan ini penting untuk memvalidasi keandalan kedua aplikasi dalam melakukan prediksi regangan pada berbagai lapisan perkerasan. Perbandingan hasil analisis ini juga menunjukkan bahwa meskipun terdapat sedikit perbedaan, kedua aplikasi tersebut dapat saling melengkapi dalam memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai kinerja struktur perkerasan pada berbagai kondisi.

Tabel 5.25 Perbandingan Hasil Regangan Berdasarkan WinJULEA dan KENPAVE untuk Perkerasan *Existing*

Titik Evaluasi (x ; y)	Horizontal Regangan		Vertikal Regangan		Vertikal Regangan	
	Kedalaman 9,9995 cm		Kedalaman 9,9995 cm		Kedalaman 40,0005 cm	
	WinJULEA	KENPAVE	WinJULEA	KENPAVE	WinJULEA	KENPAVE
0 ; 0	0,0003600	0,0003603	0,0005080	0,0005077	0,0005690	0,0005696
0 ; 10	0,0003340	0,0003337	0,0002950	0,0002951	0,0006180	0,0006184
0 ; 16,5	0,0003030	0,0003028	0,0001530	0,0001529	0,0006260	0,0006259
Nilai Max	0,0003600	0,0003603	0,0005080	0,0005077	0,0006260	0,0006259

Tabel 5.26 Perbandingan Hasil Regangan Berdasarkan WinJULEA dan KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 1

Titik Evaluasi (x ; y)	Horizontal Regangan		Vertikal Regangan		Vertikal Regangan	
	Kedalaman 9,9995 cm		Kedalaman 9,9995 cm		Kedalaman 75,0005 cm	
	WinJULEA	KENPAVE	WinJULEA	KENPAVE	WinJULEA	KENPAVE
0 ; 0	0,00015200	0,00015160	0,00030100	0,00030130	0,00020300	0,00020300
0 ; 10	0,00012900	0,00012880	0,00013800	0,00013760	0,00021400	0,00021400
0 ; 16,5	0,00010700	0,00010720	0,00002740	0,00002708	0,00021600	0,00021590
Nilai Max	0,00015200	0,00015160	0,00030100	0,00030130	0,00021600	0,00021590

Tabel 5.27 Perbandingan Hasil Regangan Berdasarkan WinJULEA dan KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 2

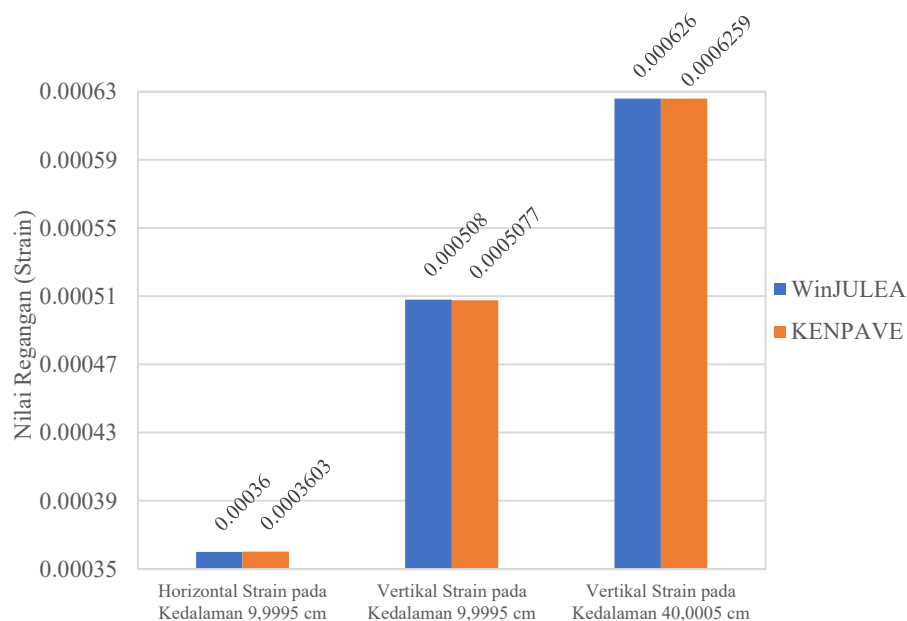
Titik Evaluasi (x ; y)	Horizontal Regangan		Vertikal Regangan		Vertikal Regangan	
	Kedalaman 19,4995 cm		Kedalaman 19,4995 cm		Kedalaman 74,5005 cm	
	WinJULEA	KENPAVE	WinJULEA	KENPAVE	WinJULEA	KENPAVE
0 ; 0	0,0002080	0,0002083	0,0002690	0,0002688	0,0002280	0,0002277
0 ; 10	0,0002130	0,0002128	0,0002300	0,0002304	0,0002400	0,0002402
0 ; 16,5	0,0002100	0,0002098	0,0002050	0,0002054	0,0002420	0,0002425
Nilai Max	0,0002130	0,0002128	0,0002690	0,0002688	0,0002420	0,0002425

Berdasarkan Tabel 5.25 hingga Tabel 5.27, terlihat bahwa hasil regangan horizontal dan vertikal yang diperoleh dari aplikasi WinJULEA dan KENPAVE menunjukkan nilai yang sangat berdekatan pada setiap kondisi perkerasan, baik untuk perkerasan *existing*, alternatif 1, maupun alternatif 2. Perbandingan ini dilakukan pada titik evaluasi yang sama (0 , 0 cm; 0 , 10 cm; dan 0 , 16,5 cm) serta kedalaman pengamatan yang identik, sehingga hasil yang muncul menggambarkan perbedaan metode perhitungan internal dari kedua perangkat lunak.

Pada perkerasan *existing* (Tabel 5.25), nilai regangan horizontal dan vertikal yang dihasilkan oleh WinJULEA dan KENPAVE menunjukkan pola yang hampir identik. Sebelum dibahas lebih jauh, untuk memperjelas distribusi regangan yang terjadi, grafik perbandingan regangan horizontal dan vertikal pada kondisi *existing* ditampilkan pada Gambar 5.17. Dari tabel dan grafik tersebut terlihat bahwa nilai

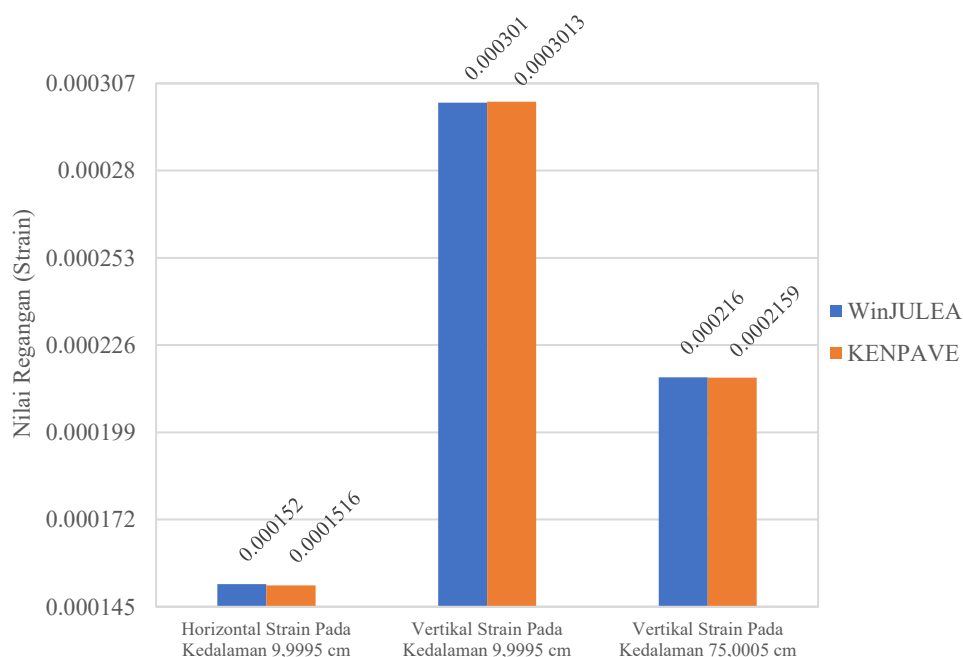
regangan horizontal maksimum yang dihasilkan WinJULEA sebesar 0,0003600, sedangkan KENPAVE sebesar 0,0003603, dengan perbedaan hanya 0,0000003 atau sekitar 0,08%. Nilai regangan vertikal juga sangat mirip, yaitu 0,0005080 pada WinJULEA dan 0,0005077 pada KENPAVE pada kedalaman 9,9995 cm. Sementara itu, pada kedalaman yang lebih dalam (40,0005 cm), nilai maksimum berturut-turut adalah 0,0006260 dan 0,0006259. Selisih yang sangat kecil ini menunjukkan bahwa kedua perangkat lunak memiliki tingkat akurasi yang hampir sama dalam menghitung respons regangan untuk kondisi perkerasan *existing*.

Dari hasil perhitungan, terlihat bahwa nilai regangan horizontal dan vertikal pada titik-titik evaluasi yang sama menunjukkan kesamaan distribusi yang tinggi. Nilai maksimum regangan horizontal berada di dasar lapisan aspal dengan perbedaan yang sangat tipis antara kedua perangkat lunak, dan nilai maksimum regangan vertikal tertinggi terletak pada lapisan tanah dasar (*subgrade*). Kedalaman pengamatan yang identik memperkuat keakuratan perbandingan, dengan variasi nilai regangan yang sangat kecil, di bawah 0,1%. Fitur ini mengindikasikan bahwa kedua metode mampu memetakan kondisi regangan lapisan perkerasan secara konsisten, memberikan gambaran yang reliabel untuk analisis lebih lanjut.



Gambar 5.17 Grafik Perbandingan WinJULEA dan KENPAVE pada Perkerasan *Existing*

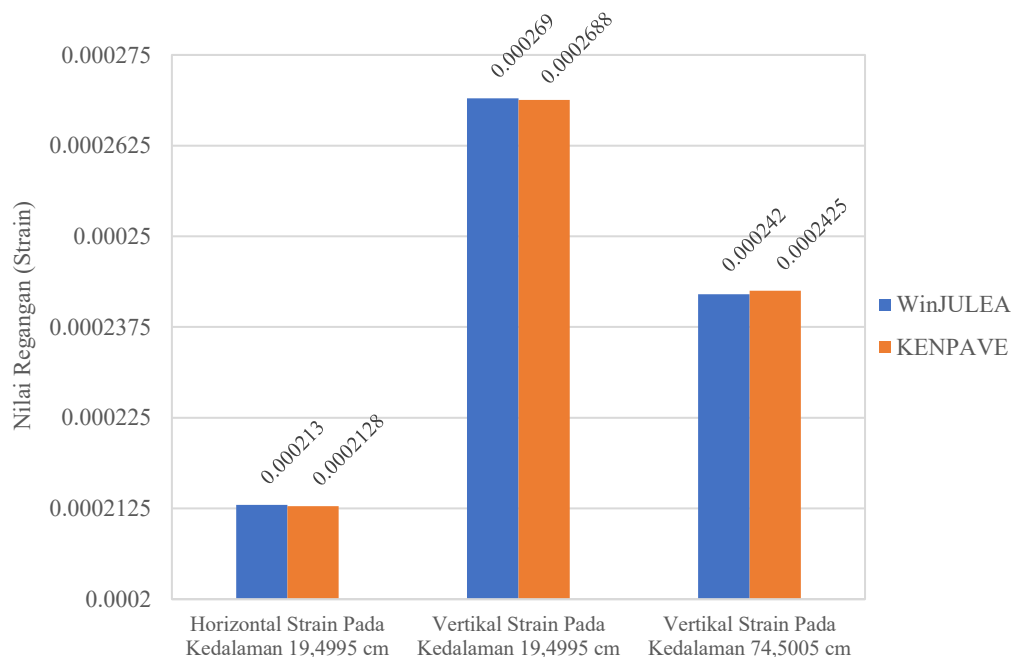
Pada alternatif 1 (Tabel 5.26), kecenderungan hasil yang hampir sama juga terlihat. Untuk memperjelas pola regangan terhadap kedalaman lapisan, grafik perbandingan regangan horizontal dan vertikal untuk alternatif 1 disajikan pada Gambar 5.18. Berdasarkan data pada tabel dan grafik, nilai regangan horizontal maksimum yang dihasilkan WinJULEA adalah 0,0001520, sedangkan KENPAVE menghasilkan 0,0001560. Selisih absolutnya sebesar 0,000004 menghasilkan deviasi relatif sekitar 0,26%. Nilai regangan vertikal maksimum pada kedalaman 9,9995 cm tercatat 0,00030100 dan 0,00030130, sementara pada kedalaman 75,0005 cm nilainya adalah 0,0002160 (WinJULEA) dan 0,0002159 (KENPAVE). Pola distribusi regangan dari grafik menunjukkan bahwa perbedaan hanya terjadi pada besaran angka, sedangkan bentuk kurva regangan terhadap kedalaman relatif sama. Hal ini menandakan bahwa kedua perangkat lunak memiliki kecenderungan perhitungan yang searah terhadap respons mekanis lapisan perkerasan.



Gambar 5.18 Grafik Perbandingan WinJULEA dan KENPAVE pada Perkerasan Alternatif 1

Sementara itu, pada alternatif 2 (Tabel 5.27), hasil perbandingan juga memperlihatkan kesamaan pola distribusi regangan di setiap titik tinjau. Untuk

menggambarkan kecenderungan tersebut, grafik perbandingan hasil regangan antara WinJULEA dan KENPAVE untuk alternatif 2 dapat dilihat pada Gambar 5.19. Berdasarkan hasil perhitungan, nilai regangan horizontal maksimum dari WinJULEA adalah 0,0002130, sedangkan dari KENPAVE sebesar 0,0002128, dengan selisih yang sangat kecil. Regangan vertikal pada kedalaman 19,4995 cm tercatat sebesar 0,0002690 (WinJULEA) dan 0,0002688 (KENPAVE), sedangkan pada kedalaman 74,5005 cm nilainya masing-masing 0,0002420 dan 0,0002425. Selisih kurang dari 0,21% ini menunjukkan bahwa kedua perangkat lunak memberikan hasil yang sangat konsisten. Dari grafik juga terlihat bahwa bentuk kurva dan tren penurunan regangan terhadap kedalaman hampir berimpit, menandakan kesamaan karakteristik respons lapisan terhadap beban lalu lintas.



Gambar 5.19 Grafik Perbandingan WinJULEA dan KENPAVE pada Perkerasan Alternatif 2

Dengan demikian, baik WinJULEA maupun KENPAVE dapat digunakan secara andal untuk menganalisis regangan pada struktur perkerasan. Namun, WinJULEA lebih unggul dari sisi kemudahan *input* dan kecepatan analisis, sementara KENPAVE unggul dalam ketelitian dan kelengkapan pengaturan parameter. Hasil yang serupa dari kedua program ini memperkuat validitas hasil

evaluasi dan menunjukkan bahwa proses perhitungan yang dilakukan telah sesuai dengan prinsip mekanistik-empiris.

5.7 Pembahasan

Dari hasil analisis dan evaluasi, terdapat beberapa poin penting yang perlu dibahas agar hasil yang diperoleh memiliki makna teknis dan implikasi desain yang jelas.

5.7.1 Pembahasan Perkerasan *Existing*

Pada kondisi *existing*, hasil analisis menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE menunjukkan bahwa struktur perkerasan saat ini telah mengalami penurunan kemampuan dalam menahan beban lalu lintas. Berdasarkan hasil evaluasi regangan (Tabel 5.25), didapatkan urutan kerusakan pada perkerasan *existing* dimana kerusakan diawali oleh deformasi permanen, *rutting* dan terakhir kerusakan *fatigue cracking*. Kerusakan ini terjadi karena perubahan mekanis yang terjadi secara bertahap pada struktur perkerasan lentur akibat beban lalu lintas berulang.

Pada tahap awal, deformasi permanen (*permanent deformation*) muncul ketika regangan tekan vertikal pada lapisan tanah dasar (ϵ_v) melebihi batas elastis material. Berdasarkan hasil analisis, nilai regangan tekan vertikal pada kondisi *existing* mencapai 0,0006260 (WinJULEA) dan 0,0006259 (KENPAVE), dengan deviasi hanya 0,02% yang menunjukkan tingkat keakuratan serupa kedua aplikasi. Nilai regangan vertikal tersebut sudah mendekati atau melampaui ambang batas aman sebesar 3×10^{-4} menurut kriteria Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG). Ini menandakan *subgrade* kehilangan kemampuannya untuk kembali ke bentuk semula setelah menerima beban berulang, sehingga timbul deformasi plastis di lapisan fondasi yang menyebabkan penurunan permukaan jalan di daerah roda kendaraan.

Seiring bertambahnya repetisi beban, deformasi plastis berkembang menjadi alur permanen di permukaan jalan (*rutting*). Nilai ϵ_v yang tinggi pada lapisan bawah memperkuat gejala *rutting* karena distribusi tegangan tidak lagi merata. Hasil grafik distribusi regangan vertikal pada Gambar 5.17 menunjukkan konsentrasi regangan

terbesar pada lapisan permukaan *subgrade*, lokasi yang umum menjadi titik awal terbentuknya alur. Fenomena ini sesuai dengan temuan Putri, dkk. (2022) yang menyatakan bahwa ketika regangan vertikal melebihi 5×10^{-4} , deformasi di lapisan bawah tidak lagi dapat pulih secara elastis dan *rutting* mulai muncul sebagai kerusakan dominan.

Setelah *rutting* berkembang, lapisan aspal di bagian atas mulai mengalami tegangan lentur berulang akibat perubahan bentuk permukaan. Kondisi ini memicu peningkatan regangan tarik horizontal (ϵ_t) di dasar lapisan aspal. Berdasarkan hasil analisis, nilai ϵ_t pada kondisi *existing* mencapai 0,0003600 hingga 0,0003603, yang melebihi ambang batas kerusakan lelah sebesar $2,5 \times 10^{-4}$ (MEPDG, 2008). Ketika regangan tarik ini terjadi berulang kali, ikatan antar-aspal dan agregat mulai melemah, menyebabkan munculnya retak mikro (*microcracks*) yang lambat laun berkembang menjadi retak lelah (*fatigue cracking*). Menurut Iqbal dan Prihutomo (2025), pada perkerasan yang sudah mengalami deformasi permanen dan *rutting*, tegangan lentur akibat beban tidak lagi terdistribusi secara seragam, sehingga peningkatan regangan tarik di dasar lapisan aspal mempercepat timbulnya retak lelah.

Dengan demikian, urutan kerusakan pada perkerasan *existing* secara mekanistik dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Deformasi permanen terjadi lebih dahulu karena lapisan tanah dasar mengalami regangan tekan berlebih dan kehilangan sifat elastisnya.
2. *Rutting* muncul sebagai akibat kumulatif deformasi vertikal, di mana permukaan jalan membentuk alur akibat pergeseran material di lapisan bawah.
3. *Fatigue cracking* terjadi terakhir karena lapisan aspal yang mengalami lenturan berulang di atas deformasi *rutting* mengalami peningkatan regangan tarik hingga melampaui batas kelelahan material.

Urutan kerusakan ini sejalan dengan teori Yoder dan Witczak (1975), yang menegaskan bahwa pada perkerasan dengan daya dukung rendah, *rutting* terjadi lebih dulu karena regangan vertikal di *subgrade* cepat menurun, diikuti *fatigue cracking* akibat kerusakan lapisan aspal atas. Selain itu, pola distribusi regangan

pada grafik hasil perbandingan antara WinJULEA dan KENPAVE (Gambar 5.17) menguatkan gambaran tersebut, puncak regangan tarik maksimal terjadi di dasar aspal, dan regangan tekan maksimal pada *subgrade*. Kondisi ini memperlihatkan struktur *existing* sudah tidak efektif dalam mendistribusikan tegangan ke lapisan bawah.

Hal ini sejalan dengan penelitian Singh dan Sahoo (2021) yang menjelaskan bahwa peningkatan regangan vertikal di lapisan bawah *subgrade* merupakan tanda menurunnya daya dukung tanah akibat beban lalu lintas berulang. Dalam penelitiannya, regangan vertikal di atas ambang 5×10^{-4} dianggap sebagai kondisi kritis yang dapat mempercepat terjadinya alur permanen (*rutting*) pada perkerasan lentur. Nilai regangan vertikal hasil analisis pada kondisi *existing* (sekitar $5,08 \times 10^{-4}$) menunjukkan bahwa perkerasan jalan sudah mendekati batas kritis sehingga perlu dilakukan perbaikan struktural atau peningkatan ketebalan lapisan guna memperpanjang umur layanan. Pernyataan ini juga didukung oleh hasil penelitian Arévalo-Mendoza, dkk., (2025) yang menegaskan bahwa kontrol terhadap regangan vertikal pada permukaan *subgrade* merupakan parameter kunci dalam mencegah deformasi permanen dan menjaga stabilitas struktur perkerasan lentur.

Perbandingan antara kedua perangkat lunak juga memperlihatkan bahwa WinJULEA memberikan hasil yang sedikit lebih kecil dibanding KENPAVE, meskipun perbedaannya sangat kecil. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan algoritma pembulatan internal dan metode interpolasi titik evaluasi. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa baik WinJULEA maupun KENPAVE mampu memberikan hasil evaluasi yang konsisten dan valid pada kondisi *existing*, terutama bila digunakan dengan parameter *input* yang identik.

Secara keseluruhan, hasil pembahasan menunjukkan bahwa pada kondisi *existing*, struktur perkerasan sudah tidak lagi dalam kondisi optimal karena nilai regangan tarik dan tekan berada pada rentang yang mendekati batas kritis. Kesamaan hasil antara WinJULEA dan KENPAVE memperkuat keyakinan bahwa hasil evaluasi ini dapat dipercaya sebagai dasar untuk merancang alternatif

perbaikan (alternatif 1 dan alternatif 2) yang bertujuan menurunkan nilai regangan hingga mencapai tingkat aman terhadap kerusakan lelah dan deformasi permanen.

5.7.2 Pembahasan Perkerasan Alternatif

Analisis terhadap kondisi alternatif 1 dan alternatif 2 dilakukan untuk menilai efektivitas peningkatan tebal lapisan perkerasan dalam menurunkan regangan akibat beban lalu lintas. Kedua alternatif merupakan bentuk perbaikan dari kondisi *existing* dengan asumsi konfigurasi beban, dan titik evaluasi yang sama, sehingga perbedaan hasil lebih merefleksikan pengaruh struktural lapisan.

Jenis dan tebal lapisan pada masing-masing alternatif perkerasan ditunjukkan pada Gambar 5.14. Pada alternatif 1, struktur perkerasan terdiri atas lapisan AC-WC (*Asphalt Concrete – Wearing Course*) setebal 4 cm sebagai lapisan permukaan, diikuti AC-BC (*Asphalt Concrete – Binder Course*) setebal 6 cm sebagai lapisan pengikat, serta CTB (*Cement Treated Base*) setebal 30 cm sebagai lapisan fondasi atas berikat semen. Di bawahnya terdapat LPA Kelas B setebal 15 cm dan LPA Kelas C setebal 20 cm sebagai lapisan fondasi bawah.

Sementara itu, alternatif 2 memiliki susunan lapisan yang berbeda dibandingkan alternatif 1. Meskipun total ketebalannya sedikit lebih tipis (74,5 cm dibandingkan 75 cm), alternatif 2 memiliki ketebalan lapisan aspal yang lebih besar, yaitu 19,5 cm (AC-WC 4 cm, AC-BC 7,5 cm, dan AC-Base 8 cm), dibandingkan 10 cm pada alternatif 1. Peningkatan tebal lapisan aspal ini meningkatkan daya tahan struktur terhadap regangan tarik dan memperlambat timbulnya retak lelah.

Berbeda dengan alternatif 1 yang menggunakan CTB (*Cement Treated Base*) dengan modulus elastisitas tinggi namun cenderung kaku, alternatif 2 menggunakan LPA Kelas A yang lebih lentur dan mampu mendistribusikan beban secara lebih merata ke lapisan bawah. Menurut Hadi dan Fauziah (2022), kombinasi antara lapisan aspal yang lebih tebal dan fondasi agregat yang lebih fleksibel dapat menurunkan konsentrasi tegangan lentur di lapisan bawah, sehingga mengurangi risiko *cracking* dan memperpanjang umur layan struktur perkerasan.

Hasil evaluasi menggunakan WinJULEA dan KENPAVE menunjukkan bahwa pada alternatif 1, nilai regangan tarik horizontal maksimum (ϵ_t) masing-masing sebesar 0,0001520 dan 0,0001516, sedangkan regangan tekan vertikal (ϵ_v)

pada lapisan tanah dasar sebesar 0,0002160 dan 0,0002159. Perbedaan hasil antar perangkat lunak sebesar 0,15%, menandakan tingkat akurasi yang baik. Dibandingkan kondisi *existing*, terjadi penurunan regangan tarik sekitar 57,8% dan regangan tekan sekitar 65,5%, menunjukkan peningkatan performa struktural yang signifikan akibat penambahan ketebalan dan kekakuan lapisan.

Pada alternatif 2, hasil evaluasi menunjukkan nilai ϵ_t sebesar 0,0002130 (WinJULEA) dan 0,0002128 (KENPAVE) serta ϵ_v pada lapisan tanah dasar sebesar 0,0002420 (WinJULEA) dan 0,0002425, dengan perbedaan hasil sangat kecil (0,15%). Meskipun total struktur sedikit lebih tipis, peningkatan tebal lapisan aspal membuat distribusi beban menjadi lebih merata dan mengurangi potensi retak akibat tegangan lentur. Berdasarkan grafik hasil analisis (Gambar 5.19), kurva regangan dari kedua aplikasi hampir berimpit, menandakan bahwa distribusi regangan pada kedua metode analisis sangat konsisten.

Berdasarkan hasil perhitungan prediksi umur pelayanan, alternatif 1 memiliki umur layan hingga terjadi kerusakan *fatigue cracking* sebesar 122 tahun, *rutting* 21 tahun, dan deformasi permanen 51 tahun. Sedangkan alternatif 2 memiliki umur layan hingga terjadi kerusakan *fatigue cracking* sebesar 84 tahun, *rutting* 30 tahun, dan deformasi permanen 39 tahun. Perbedaan ini menunjukkan bahwa alternatif 1 lebih unggul terhadap kelelahan (*fatigue*) karena lapisan CTB yang sangat kaku mampu menahan regangan tarik lebih lama. Namun, alternatif 2 lebih unggul dalam menahan *rutting* dan deformasi permanen karena lapisan aspal yang tebal dan LPA yang lebih lentur dapat menyerap beban berulang tanpa menyebabkan deformasi plastis besar pada lapisan bawah.

Urutan kerusakan yang diprediksi terjadi pada kedua alternatif adalah *rutting*, lalu deformasi permanen, dan terakhir *fatigue cracking*. Pada tahap awal, *rutting* muncul karena pergeseran volume material di lapisan permukaan akibat tekanan roda berulang. Selanjutnya, deformasi permanen berkembang pada lapisan fondasi, terutama di antara LPA dan tanah dasar. *Fatigue cracking* terjadi paling akhir ketika regangan tarik berulang di dasar lapisan aspal telah melampaui batas kelelahan material. Hasil ini sejalan dengan penelitian Kurniawan dan Hadi (2024) yang menjelaskan bahwa perkerasan dengan kombinasi lapisan aspal tebal dan fondasi

fleksibel memiliki urutan kerusakan yang serupa, di mana *rutting* terjadi lebih dahulu, diikuti deformasi, dan baru kemudian retak lelah. Temuan ini juga diperkuat oleh penelitian Hadi (2023) yang menegaskan bahwa aktivitas beban berlebih (*overload*) dapat mempercepat kerusakan akibat regangan vertikal di lapisan bawah. Namun, pada desain seperti alternatif 2, peningkatan ketebalan aspal dan penggunaan material agregat yang lebih lentur terbukti dapat memperlambat pertumbuhan deformasi tersebut.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa alternatif 1 lebih tahan terhadap kerusakan akibat kelelahan (*fatigue cracking*) karena kekakuan CTB, sedangkan alternatif 2 lebih optimal terhadap *rutting* dan deformasi permanen berkat kombinasi lapisan aspal yang tebal dan fondasi agregat fleksibel. Meskipun total ketebalan alternatif 2 sedikit lebih tipis, kinerja strukturalnya tetap lebih seimbang dan sesuai untuk kondisi lalu lintas berat. Dengan demikian, alternatif 1 direkomendasikan untuk kondisi lalu lintas sedang dengan pertimbangan efisiensi biaya, sedangkan alternatif 2 direkomendasikan untuk kondisi lalu lintas padat dan umur rencana panjang karena mampu menjaga stabilitas perkerasan dalam jangka waktu lama. Sehingga ketebalan perkerasan pada Ruas Jalan Kaliurang–Pakem KM 14,5 – 16 dengan kondisi lalu lintas sedang dapat direkomendasikan menggunakan tebal perkerasan alternatif 1.

5.7.3 Pembahasan Penggunaan Aplikasi WinJULEA dan Aplikasi KENPAVE

Penggunaan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku mekanistik struktur perkerasan lentur dengan pendekatan elastis berlapis. Kedua aplikasi memiliki prinsip dasar yang sama, yaitu menghitung tegangan, regangan, dan lendutan pada tiap lapisan perkerasan akibat beban lalu lintas, namun memiliki perbedaan dalam cara pengolahan data dan tingkat detail hasil analisis yang dihasilkan.

Dari segi antarmuka dan proses *input* data, aplikasi WinJULEA dinilai lebih sederhana dan mudah digunakan karena seluruh parameter material, geometri lapisan, dan konfigurasi beban dapat dimasukkan dalam satu tampilan (*single interface*). Proses ini mempermudah pengguna, terutama saat melakukan pengujian cepat terhadap beberapa variasi desain. Sedangkan pada KENPAVE, proses *input*

dilakukan melalui beberapa *menu* terpisah seperti *Menu Layer* untuk data lapisan, *Menu Load* untuk beban, dan *Menu Zcoord* untuk pengaturan titik tinjau. Meskipun terkesan lebih rumit, metode ini memungkinkan pengguna memperoleh hasil yang lebih detail dan fleksibel, terutama untuk menganalisis kondisi spesifik seperti posisi beban ganda, variasi modulus antar lapisan, atau pembebanan asimetris.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai regangan tarik horizontal (ϵ_t) dan regangan tekan vertikal (ϵ_v) yang diperoleh dari kedua aplikasi relatif sangat mirip, dengan deviasi rata-rata di bawah 3%. Hal ini membuktikan bahwa baik WinJULEA maupun KENPAVE memiliki kemampuan komputasi yang akurat dalam menganalisis perilaku elastis perkerasan. Menurut Putri, dkk. (2022), kesamaan hasil antara kedua perangkat lunak tersebut disebabkan karena keduanya menggunakan teori *multi-layer elastic system* dengan pendekatan numerik yang hampir identik, hanya berbeda dalam algoritma interpolasi titik evaluasi.

Dari sisi visualisasi hasil, WinJULEA menampilkan distribusi tegangan dan regangan secara langsung pada setiap lapisan, sehingga mempermudah interpretasi bagi pengguna pemula. Sebaliknya, KENPAVE menghasilkan keluaran dalam format numerik yang lebih rinci, yang kemudian dapat diolah secara manual. Menurut Hadi dan Fauziah (2022), kemampuan interpretasi hasil analisis yang baik sangat penting dalam memastikan keakuratan desain perkerasan, karena kesalahan interpretasi terhadap nilai regangan dapat menyebabkan kesalahan dalam menentukan ketebalan lapisan maupun umur layan perkerasan.

Selain itu, penelitian Kurniawan dan Hadi (2024) juga menegaskan bahwa penggunaan perangkat lunak berbasis mekanistik seperti KENPAVE perlu didukung dengan pemahaman konsep elastisitas dan korelasi empiris agar hasil analisis tidak hanya bersifat teoretis, tetapi juga dapat diimplementasikan pada kondisi lapangan. Dalam konteks ini, kombinasi antara kemudahan penggunaan WinJULEA dan ketelitian KENPAVE memberikan hasil analisis yang komprehensif dan realistis.

Secara umum, kedua aplikasi menghasilkan pola distribusi regangan yang sama, regangan tarik maksimum terjadi di dasar lapisan aspal, sedangkan regangan tekan maksimum berada pada permukaan tanah dasar. Pola ini sesuai dengan teori

mekanistik perkerasan lentur yang dijelaskan oleh Yoder dan Witczak (1975), serta diperkuat oleh hasil studi Hadi (2023) yang menggunakan KENPAVE untuk menganalisis dampak beban berlebih (*overload*) terhadap perubahan regangan vertikal pada lapisan bawah.

Dari hasil perbandingan ini, dapat disimpulkan bahwa kedua aplikasi sama-sama andal untuk analisis perkerasan lentur, namun memiliki perbedaan karakteristik yang saling melengkapi. WinJULEA cocok digunakan untuk analisis awal, validasi cepat, dan studi perbandingan antar skenario, sedangkan KENPAVE lebih sesuai untuk analisis mendalam yang memerlukan detail tinggi dan simulasi kompleks. Kombinasi keduanya memberikan hasil evaluasi yang lebih menyeluruh, akurat, dan dapat dijadikan dasar yang kuat dalam proses perencanaan maupun evaluasi kinerja struktur perkerasan jalan.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE, Perkerasan Alternatif 1 dapat dipilih sebagai solusi yang paling optimal. Kedua aplikasi tersebut menunjukkan hasil yang konsisten dalam hal distribusi tegangan dan regangan, dengan perbedaan yang sangat kecil antara keduanya. WinJULEA menawarkan kemudahan dalam *input* data dan analisis cepat, menjadikannya pilihan tepat untuk perencanaan awal dan pengujian skenario desain. Di sisi lain, KENPAVE memberikan hasil yang lebih detail dan mendalam, sehingga mendukung keakuratan desain perkerasan dalam kondisi yang lebih kompleks. Oleh karena itu, Perkerasan Alternatif 1 menjadi pilihan terbaik, mengingat kemampuannya untuk memberikan hasil yang efisien dan akurat dalam merancang perkerasan yang tahan lama dan memenuhi standar yang diharapkan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pada Ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5 – 16 dengan tiga metode analisis, yaitu MDPJ Bina Marga 2024, WinJULEA, dan KENPAVE, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis menggunakan aplikasi WinJULEA dan KENPAVE menunjukkan bahwa struktur perkerasan lentur pada ruas Jalan Yogyakarta–Pakem KM 14,5–16 telah mengalami penurunan kinerja. Analisis ini mengungkapkan bahwa perkerasan *existing* berpotensi menimbulkan kerusakan berupa *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent deformation* yang tinggi. Hasil ini menunjukkan perlunya evaluasi lebih lanjut terhadap struktur dan material perkerasan yang ada untuk meningkatkan daya tahan jalan.
2. Berdasarkan hasil analisis mekanistik-elastis, umur pelayanan perkerasan *existing* diperkirakan hanya mencapai 34 tahun untuk *fatigue cracking*, 3 tahun untuk *rutting* dan 1 tahun untuk deformasi permanen. Nilai umur pelayanan ini jauh di bawah standar minimum 20 tahun, sehingga diperlukan desain ulang untuk meningkatkan ketahanannya terhadap kerusakan.
3. Perancangan ulang struktur perkerasan dengan metode MDPJ Bina Marga 2024 menghasilkan desain alternatif yang memiliki ketebalan lapisan lebih besar dibandingkan kondisi *existing*. Desain alternatif 1 terbukti memberikan kinerja paling baik dengan prediksi umur pelayanan mencapai 122 tahun untuk *fatigue cracking*, 21 tahun untuk *rutting*, dan 51 tahun untuk *permanent deformation*. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan perkerasan secara signifikan memperpanjang umur pelayanan jalan.
4. Hasil verifikasi menggunakan kedua aplikasi menunjukkan bahwa desain alternatif memiliki respons tegangan dan regangan yang lebih kecil dibandingkan kondisi *existing*. Nilai lendutan dan regangan yang lebih rendah

menandakan peningkatan kinerja struktural perkerasan, sehingga desain alternatif terbukti lebih stabil dan tahan terhadap beban lalu lintas berulang.

5. Berdasarkan hasil evaluasi dan perbandingan, disarankan penerapan desain alternatif 1 dengan peningkatan ketebalan lapisan perkerasan serta penggunaan material berdaya tahan tinggi, seperti aspal modifikasi atau lapisan CTB (*Cement Treated Base*). Alternatif ini dinilai paling sesuai untuk diterapkan pada ruas Jalan Yogyakarta–Pakem yang memiliki volume lalu lintas tinggi agar umur pelayanan jalan optimal dan sesuai standar perencanaan.

6.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan di atas, disampaikan saran-saran teknis, manajerial, dan penelitian lanjutan sebagai berikut:

1. Secara teknis, disarankan menggunakan desain alternatif 1 karena memiliki kinerja struktural terbaik dan umur pelayanan paling panjang. Pemilihan material dengan modulus tinggi seperti CTB atau agregat berkualitas perlu diterapkan untuk meningkatkan kekakuan lapisan.
2. Dari sisi manajerial dan pemeliharaan, perlu dilakukan pengawasan beban kendaraan guna mencegah *overload* serta *monitoring* kondisi jalan secara berkala melalui pemeriksaan visual dan uji defleksi agar kinerja perkerasan tetap sesuai dengan hasil desain.
3. Dalam aspek efisiensi, disarankan melakukan analisis biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost Analysis*) untuk memilih alternatif desain yang paling ekonomis, berkelanjutan, dan menyusun program pemeliharaan berbasis kondisi aktual.
4. Untuk penelitian dan pengembangan, perlu dilakukan verifikasi lapangan dan uji material serta pengembangan model analisis yang mempertimbangkan pengaruh suhu dan viskos-elastisitas material aspal agar hasil akurat.
5. Dari sisi kebijakan dan standar, disarankan agar instansi teknis menggabungkan pendekatan MDPJ 2024 dengan analisis mekanistik-elastis (WinJULEA dan KENPAVE) sebagai metode terpadu dalam evaluasi dan perencanaan struktur perkerasan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adedeji, J. A., Abejide, S. O. & Hassan, M. M., 2022. *Numerical Response Analysis of Structural Strength Capacity of Fly-Ash-Inverted Pavement*. Pula, Croatia, CETRA.
- Aji, Z. A. & Susilo, B. H., 2023. Evaluasi Tebal Perkerasan Jalan Menggunakan Program Software KENPAVE. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan*, pp. 96-105.
- Alaye, Q. E. A., Alaye, M. H. & Chabi, C., 2023. Structural Model Performance and Reinforced Pavement Technology in Unstable Location in The South of The Republic of Benin (West Africa). *Natural Hazards Research*, Juni, 3(2), pp. 205-218.
- Alifuddin, A., Kasim, M. R. & Said, L. B., 2024. Perilaku Rutting dan Modulus Kekakuan dengan Penguatan Serat Ijuk pada Campuran Beton Aspal. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, pp. 223-232.
- Al-Khateeb, G. G., 2021. *Traffic and Pavement Engineering*. Boca Raton(London): CRC Press.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008. *Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide*. United States of America: AASHTO.
- American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington D.C: AASHTO.
- Aptarila, G., Lubis, F. & Saleh, A., 2020. Analisis Kerusakan Jalan Metode SDI Taluk Kuantan - Batas Provinsi Sumatera Barat. *SIKLUS*, Oktober, 6(2), pp. 195-203.
- Arévalo Mendoza, B.-G.et al., 2025. Impact of Load Frequency on The Laboratory Transfer Function for Subgrade Soil Rutting Behavior. *GEOMONTREAL*.
- Ariyanto, Umam, K. & Saputro, Y. A., 2021. Pengaruh Jumlah Kendaraan Terhadap Kerusakan Aspal Di Jalan KH. Wahid Hasyim Bapangan Kabupaten Jepara. *DISPROTEK*, Volume 12 No. 2, pp. 109-113.
- Aszharri, A., Susetyo, D. A. & Sulaiman, S., 2024. Kinerja Struktur Perkerasan Aspal Porus Modifikasi dengan Pemodelan Program KENPAVE. *Cantilever*, pp. 91-102.

- Bradley, A. & Thiam, P.-M., 2020. *Validation of WinJULEA predictions of pavement response under wide-base tire loading (Technical Report No. TR2020N12)*. Canada: FPInnovations.
- Budiarnaya, P., Ariawan, I. P., Wismantara, I. G. N. N. & Puspasari, I. G. P., 2021. Analisa Kerusakan dan Anggaran Perbaikan Jalan Menggunakan Metode Pavement Condition Index (PCI). *SIKLUS*, Oktober, 7(2), pp. 197-207.
- Cahyani, N. K. A. G., Sumanjaya, A. A. G. & Aryastana, P., 2024. Penilaian Konsekuensi Beban Lalu Lintas Terhadap Pengurangan Umur Rencana Jalan. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, pp. 189-202.
- Dinas Pariwisata Kabupaten Sleman, 2024. *Dokumen Statistik Pariwisata Kabupaten Sleman Tahun 2024*. Sleman: Dinas Pariwisata Kabupaten Sleman.
- Farhan, A. M., Amrozi, M. R. F. & Siswosukarto, S., 2025. *Perancangan Tebal Perkerasan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 Studi Kasus Jalan Yogyakarta – Bakulan*. Yogyakarta, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada.
- Google Maps, 2025. *Ruas Jalan Kaliurang-Pakem KM 14,5 - 16, 1:200*. [Online] Available at: <https://maps.app.goo.gl/uyfsuYk3LGEYqCXm6> [Diakses Juni 2025].
- Gulzar, A., Shehzad, M. K., Javed, M. A. & Ahmed, S. R., 2022. A Spatio-Temporal Study for The Appraisal of Traffic Congestion Issues in Lahore, Punjab, Pakistan. *Pakistan Geographical Review*, pp. 206-220.
- Gutap, G., Anand, A., Raj, A. & Robert, B. R. G., 2022. Study of Traffic Volumes. *International Journal of Health Sciences*, 6(S1), pp. 9997-10012.
- Gutiérrez, C. A. C., Domínguez, R. I. H. & Anguas, G. P., 2018. *Teorías para calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en pavimentos flexibles: un enfoque mecanicista*. Meksiko: Instituto Mexicano Del Transporte.
- Hadi, M. A., 2023. Identifikasi Kerentanan Kinerja Perkerasan Jalan Terhadap Aktivitas Overload Kendaraan Menggunakan Program KENPAVE. *SIKLUS*, Oktober, 9(2), pp. 95-104.
- Hadi, M. A., 2024. Eksplorasi Dampak Perubahan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017 ke 2024 Menggunakan Program KENPAVE. *Wahana Teknik Sipil*, Desember, 29(2), pp. 416-427.
- Hadi, M. A. & Fauziah, M., 2022. Studi Komparasi Prediksi Umur Pelayanan Antara Campuran Superpave dan AC-WC Menggunakan Permodelan Viskoelastik dan Elastik. *Teknisia*, November, 27(02), pp. 71-82.

- Hadi, M. A. & Tolab, L. Z., 2022. *Studi Analisis Sensitivitas Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Terhadap Pengaruh Perubahan Temperatur*. Yogyakarta, Universitas Islam Indonesia, pp. 332-341.
- Hardiyatmo, H. C., 2015. *Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hernandez, J. et al., 2024. Verification and Validation of Pavement Models. *Journal of Transportation Engineering Part B: Pavements*, 150(4).
- Highway Research Board, 1962. *Special Report 73: The AASHO Road Test*. Washington, D.C.: Highway Research Board, National Research Council.
- Hissan, R. u., Waseem, L. A., Khurshid, M. & Maqbool, M. S., 2023. The Impact of Urbanization on the Flow of Traffic in Faisalabad City Pakistan. *Pakistan Journal of Humanities and Social Sciences*, pp. 1238-1245.
- Huang, Y. H., 2004. *Pavement analysis and design (2nd ed.)*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Iqbal, M. & Prihutomo, N. B., 2025. Analisis Program Kenpave pada Perancangan Perkerasan Lentur Metode AASTHO 1993 dan MDP 2017. *CIVeng*, pp. 39-48.
- Jihanny, J. et al., 2021. The Overload Impact on Design Life of Flexible Pavement. *International Journal of GEOMATE*, pp. 65-72.
- Joumbat, R. et al., 2023. State-of-the-Art Review on Permanent Deformation Characterization of Asphalt Concrete Pavements. *Sustainability*.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2015. *Spesifikasi Khusus Interim-3 (Skh-3.6.3.2)*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024. *Manual Desain Perkerasan Jalan No. 03/M/BM/2024*. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Keputusan Gubernur Daerah Istimewa Yogyakarta No. 41/KEP/2023 Tentang Penetapan Ruas Jalan Menurut Statusnya Sebagai Jalan Provinsi, 2023. s.l.:s.n.
- Kurniawan, D. & Hadi, M. A., 2024. Kolaborasi Metode Empiris dan Mekanistik-Empiris Guna Identifikasi dan Evaluasi Kinerja Perkerasan Jalan. *Teras Jurnal*, September, 14(02), pp. 373-386.
- Lestari, U. S., Tjitradi, D., Rahman, F. & Mona, 2024. Analisis Perbandingan Ketebalan Perkerasan Lentur Antara Desain Rencana Dengan Perencanaan

- Menggunakan Metode MDP 2017 dan Metode Bina Marga PT T-01-2002-B. (Studi Kasus: Ruas Jalan Gubernur Syarkawi (STA 24+500 sd. STA 37+000)). *Jurnal Gradasi Teknik Sipil*, pp. 75-83.
- Lia, N. & Mahardi, P., 2022. Evaluasi Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Aplikasi KENPAVE. *Jurnal REKATS Rekayasa Teknik Sipil*, 4(2), pp. 1-10.
- Lu, Y. & Hagg, R., 2021. Investigation of Flexible Pavement Maintenance Patching Factors using a Finite Element Model. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 2(30), pp. 1-16.
- Mahajan, V. et al., 2022. Data to the People: A Review of Public and Proprietary Data for Transport Models. *Transport Reviews*, 42(4), pp. 415-440.
- Marlina, E., Frans, J. H. & Nasjono, J. K., 2023. Analisis Tebal Perkerasan Lentur dengan Metode Bina Marga 2017 dan Program Kenpave. *Jurnal Teknik Sipil*, September, 12(2), pp. 173-184.
- Nugroho, S. K., Setyawan, A. & Budiarto, A., 2023. Structural Analysis and Service Life Prediction of Rubberized Thin Surfacing Hot Mix Asphalt. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, pp. 538-547.
- Nur, N. K. et al., 2021. *Perancangan Perkerasan Jalan*. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Pamujianto, S. et al., 2024. Pengaruh Fasilitas Moda Transportasi Darat Terhadap Kepuasan Penumpang (Studi Kasus: Bus Trans Jogja Trayek 14 Pelajar MAN 2 Sleman). *Jurnal Baruna Horizon*, 7(2), pp. 80-88.
- Papagiannakis, A. T. & Masad, E. A., 2008. *Pavement Design and Materials*. Canada: John Wiley & Sons, Inc..
- Pasiak, I. S., Waani, J. E. & Sendow, T. K., 2020. Evaluasi Struktur Perkerasan Jalan Menggunakan Metode Pavement Condition Index (PCI) (Studi Kasus: Ruas Jalan Airmadidi - Kairagi STA 8+193,64 - STA 11+193,64). *Jurnal Sipil Statik*, Juli, 8(4), pp. 545-554.
- Po, Y. M. et al., 2024. Fatigue and Rutting Life Design of Layered Flexible Pavements Via Advanced MultiSmart3D. *International Journal of Pavement Research and Technology*.
- Pratama, N., Putri, E. E. & Purnawan, 2025. Analisa Komparatif Perencanaan Perkerasan Lentur Jalan Kabupaten Antara Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024 dan Metode Analisa Komponen. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, pp. 2572-2587.

- Priambudi, D. A., Sholichin, I. & Fatikasari, A. D., 2024. Analisis Perbandingan Perencanaan Perkerasan Lentur Metode Bina Marga 2017 dan AASHTO 1993 Dengan Menggunakan Program Kenpave Pada Frontage Road Waru-Buduran Sidoarjo (STA 0+000 - 9+400). *AGREGAT*, November, 9(2), pp. 1102-1108.
- Putra, N. M., Silitonga, S. P. & Robby, 2021. Analisis Sisa Umur Rencana Jalan Berdasarkan Pertumbuhan Lalu Lintas di Kota Palangka Raya. *Jurnal Teknik*, pp. 155-164.
- Putri, E. E. et al., 2022. Stormpay Pavement Using Different Wheel Loads. *International Journal of GEOMATE*, Januari, 22(89), pp. 1-8.
- Putro, Y. W. S., 2023. Kajian Standar Pelayanan Minimal Jalan Provinsi DIY Pendukung Aksesibilitas Kawasan Pantai Selatan Gunungkidul. *Journal of Civil Engineering, Building and Transportation*, 7(1), pp. 103-167.
- Rahman, M. M., Najaf, P., Fields, G. M. & Thill, J. C., 2021. Traffic Congestion and Its Urban Scale Factors: Empirical Evidence from American Urban Areas. *International Journal of Sustainable Transportation*, pp. 406-421.
- Rahmawati, A., Aldiansyah, F. & Setiawan, D. M., 2021. Desain Tebal Perkerasan Lentur Jalan Menggunakan Program KENPAVE di Ruas Jalan Maospati - Sukomoro, Kabupaten Magetan, Jawa Timur. *Bulletin of Civil Engineering*, Februari, 1(1), pp. 29-32.
- Richard, F. & Mpele, M., 2023. Generation of Traffic Input for Flexible Pavement Design. *Heliyon*.
- Rind, T. A. et al., 2019. Fatigue and Rutting Analysis Of Asphaltic Pavement Using "Kenlayer" Software. *Journal Of Applied Engineering Sciences*, 9(2), pp. 177-182.
- Roja, K. L., Yamani, H., Sadeq, M. & Masad, E., 2023. Analysis of Performance of Asphalt Pavements in Qatar using Mechanistic-Empirical Approaches. *Case Studies in Construction Materials*, November. Volume 18.
- Rojas, D. A. H. & Sandoval, C. H. H., 2020. Cuencos de deflexión 3d en pavimento flexible. *Ingenio Magno*, 11(2), pp. 62-77.
- Safrudin, A. T., Siswosukarto, S. & Suhendro, B., 2023. Analisis Derajat Kerusakan dan Penurunan Modulus Elastisitas Material Cement Treated Base (CTB) menggunakan UPV Test dan Concrete Quality Designation (CQD). *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, pp. 405-414.
- Sasongko, A. N., Suprpto, B. & Rokhmawati, A., 2021. Studi Alternatif Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Dengan Menggunakan Aplikasi

- KENPAVE Pada Ruas Jalan Karangates - Jatikerto (Sta 1+500-11+700). *Jurnal Rekayasa Sipil*, 9(2), pp. 112-122.
- Selsal, Z., Karakas, A. S. & Sayin, B., 2022. Effect of Pavement Thickness on Stress Distribution in Asphalt Pavements Under Traffic Loads. *Case Studies in Construction Materials*.
- Setiawan, D. M., 2023. Permanent Deformation Characteristics of Flexible Pavement Under Palm Oil Freight Truck Loading. *International Journal of Integrated Engineering*, pp. 34-49.
- Setyawan, A., Pramesti, F. P. & Pratama, A. B. W., 2023. Prediksi Sisa Umur Layan Menggunakan Data Kinerja Jalan Dengan Metode Pavement Condition Index (PCI) Pada Ruas Jalan Batas Kota Rembang-Bulu (Batas Provinsi Jawa Timur). *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, pp. 332-339.
- Singh, A. K. & Sahoo, J. P., 2021. Rutting Prediction Models for Flexible Pavement Structures: A Review of Historical and Recent Developments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, pp. 315-338.
- Sugema, R. & Maulana, R., 2024. Analisis Perbandingan Perencanaan Tebal Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Metode AASHTO 1993 dan MDP 2024 dalam Konteks Kebijakan Transportasi Berkelanjutan. *Jurnal Teknik*, November, 23(2), pp. 112-118.
- Sugiyono, 2013. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- Sujatmiko, C., Farida, J. & Sepdianti, L., 2025. Evaluasi Tebal Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Manual Desain Perkerasan (MDP) 2024. *Jurnal Teknik Sains*, pp. 131-141.
- Sukirman, S., 1999. *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Nova.
- Sukirman, S., 2010. *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur*. Bandung: Nova.
- Syahroni, M. I., 2022. Prosedur Penelitian Kuantitatif. *Jurnal Al-Musthafa*, September, 2(3), pp. 43-56.
- U.S. Department of Transportation, & U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2017. *Evaluation of Airfield Pavement Response using PCASE with WinJULEA (DOT/ERDC/CRREL Report)*. s.l.:National Transportation Library.
- Yanti, A. K., 2025. Analisis Perbandingan Tebal Perkerasan Kaku Menggunakan Metode Bina Marga 2024 dan Metode AASHTO 1993 (Studi Kasus : Proyek

Pembangunan Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 1 STA 3+881 - 9+000). *Jurnal Teknik ITS*, 14(2).

Yoder, E. J. & Witczak, M. W., 1975. *Principles of Pavement Design*. United States of America: Jhon Wiley & Sons, INC..

Zhuang, S. et al., 2023. Rutting and Fatigue Resistance of High-Modulus Asphalt Mixture Considering the Combined Effects of Moisture Content and Temperature. *Buildings*.

LAMPIRAN

Lampiran 1 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan *Existing*

*** LAYERS STRUCTURE

LAYER NUMBER	THICKNESS	MODULUS OF ELASTICITY	POISSON RATIO	INTERFACE CONDITION
1	4.00	1100000.00	0.40	0.00
2	6.00	1200000.00	0.40	0.00
3	30.00	220000.00	0.35	0.00
4		60000.00	0.45	

*** APPLIED LOADS

LOAD NUMBER	X COORD	Y COORD	LOAD MAGNITUDE	CONTACT AREA
1	0.00	0.00	199999.80	363.64
2	0.00	33.00	199999.80	363.64

*** EVALUATION POINTS

POINT NUMBER	X COORD	Y COORD
1	0.00	0.00
2	0.00	10.00
3	0.00	16.50

*** CALCULATION DEPTHS

DEPTH NUMBER	DEPTH
1	0.00
2	4.00
3	10.00
4	10.00
5	40.00
6	40.00

*** RESULTS

DEPTH	X-COORD	Y-COORD	STRESS-X	STRESS-Y	
STRESS-Z	SHEAR-XZ	SHEAR-YZ	SHEAR-XY	STRAIN-X	STRAIN-Y


```

-0.262E-03  0.508E-03  0.000E+00 -0.484E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.107E-02  0.612E-01  0.240E+03 -0.421E+03
-0.505E+03  0.508E-03 -0.263E-03 -0.360E-03  0.372E+03
-0.229E+03  0.333E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.363E+03 -0.821E+02
0.176E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.334E-03
-0.618E-05  0.295E-03  0.000E+00  0.730E-04  0.000E+00
0.000E+00  0.620E-03  0.615E-01  0.180E+03 -0.858E+02
-0.363E+03  0.299E-03 -0.105E-04 -0.334E-03  0.271E+03
-0.896E+02  0.222E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.258E+03  0.131E+03
0.133E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.303E-03
0.151E-03  0.153E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.607E-01  0.133E+03  0.131E+03
-0.258E+03  0.153E-03  0.151E-03 -0.303E-03  0.195E+03
0.200E+01  0.184E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.154E+02  0.315E+02
0.239E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.360E-03
-0.262E-03  0.101E-02  0.000E+00 -0.255E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.107E-02  0.612E-01  0.241E+03  0.294E+02
0.154E+02  0.102E-02 -0.274E-03 -0.360E-03  0.113E+03
0.953E+02  0.103E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.100E+02  0.106E+02  0.640E+02
0.176E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.334E-03
-0.630E-05  0.682E-03  0.000E+00  0.383E-03  0.000E+00
0.000E+00  0.620E-03  0.615E-01  0.184E+03  0.559E+02
0.106E+02  0.732E-03 -0.561E-04 -0.334E-03  0.868E+02
0.836E+02  0.735E+02
  0.100E+02  0.000E+00  0.165E+02  0.891E+01  0.828E+02
0.133E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.303E-03
0.151E-03  0.459E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.607E-01  0.133E+03  0.828E+02
0.891E+01  0.459E-03  0.151E-03 -0.303E-03  0.620E+02
0.749E+02  0.510E+02
  0.400E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.711E+02 -0.560E+02
0.375E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.294E-03
-0.201E-03  0.373E-03  0.000E+00 -0.782E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.365E-02  0.456E-01  0.379E+02 -0.564E+02
-0.711E+02  0.375E-03 -0.204E-03 -0.294E-03  0.545E+02
-0.299E+02  0.483E+02
  0.400E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.766E+02 -0.624E+02
0.403E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.313E-03
-0.226E-03  0.404E-03  0.000E+00 -0.305E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.148E-02  0.473E-01  0.404E+02 -0.625E+02
-0.766E+02  0.405E-03 -0.226E-03 -0.313E-03  0.585E+02
-0.329E+02  0.521E+02
  0.400E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.775E+02 -0.633E+02

```

```

0.408E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.317E-03
-0.229E-03  0.409E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.476E-01  0.408E+02 -0.633E+02
-0.775E+02  0.409E-03 -0.229E-03 -0.317E-03  0.591E+02
-0.333E+02  0.527E+02
    0.400E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.177E+01  0.560E+01
0.375E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.293E-03
-0.201E-03  0.569E-03  0.000E+00 -0.308E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.365E-02  0.456E-01  0.387E+02  0.437E+01
0.177E+01  0.599E-03 -0.231E-03 -0.293E-03  0.185E+02
0.149E+02  0.168E+02
    0.400E+02  0.000E+00  0.100E+02  0.179E+01  0.538E+01
0.403E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.313E-03
-0.226E-03  0.618E-03  0.000E+00 -0.120E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.148E-02  0.473E-01  0.405E+02  0.521E+01
0.179E+01  0.623E-03 -0.230E-03 -0.313E-03  0.194E+02
0.158E+02  0.175E+02
    0.400E+02  0.000E+00  0.165E+02  0.179E+01  0.539E+01
0.408E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.317E-03
-0.230E-03  0.626E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.476E-01  0.408E+02  0.539E+01
0.179E+01  0.626E-03 -0.230E-03 -0.317E-03  0.195E+02
0.160E+02  0.176E+02

```

Lampiran 2 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 1

*** LAYERS STRUCTURE

LAYER NUMBER	THICKNESS	MODULUS OF ELASTICITY	POISSON RATIO	INTERFACE CONDITION
1	4.00	1100000.00	0.40	0.00
2	6.00	1200000.00	0.40	0.00
3	30.00	500000.00	0.20	0.00
4	15.00	170000.00	0.35	0.00
5	20.00	131000.00	0.35	0.00
6		60000.00	0.45	

*** APPLIED LOADS

LOAD NUMBER	X COORD	Y COORD	LOAD MAGNITUDE	CONTACT AREA
1	0.00	0.00	199999.80	363.64
2	0.00	33.00	199999.80	363.64

*** EVALUATION POINTS

POINT NUMBER	X COORD	Y COORD
1	0.00	0.00
2	0.00	10.00
3	0.00	16.50

*** CALCULATION DEPTHS

DEPTH NUMBER	DEPTH
1	0.00
2	4.00
3	10.00
4	10.00
5	40.00
6	55.00
7	75.00
8	75.00

*** RESULTS

DEPTH	X-COORD	Y-COORD	STRESS-X	STRESS-Y

STRESS-Z	SHEAR-XZ	SHEAR-YZ	SHEAR-XY	STRAIN-X
STRAIN-Y	STRAIN-Z	SHEAR-XZ	SHEAR-YZ	SHEAR-XY
DISPLT-X	DISPLT-Y	DISPLT-Z	P.STRESS1	P.STRESS2
P.STRESS3	P.STRAIN1	P.STRAIN2	P.STRAIN3	MAX.SHEAR
OCT.STRESS	OCT.SHEAR			
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.760E+03	0.718E+03
0.550E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.230E-03
0.176E-03	-0.374E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.152E-02	0.423E-01	0.760E+03	0.718E+03
0.550E+03	0.230E-03	0.176E-03	-0.374E-04	0.105E+03
0.676E+03	0.907E+02			
0.000E+00	0.000E+00	0.100E+02	0.599E+03	0.392E+03
0.550E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.202E-03
-0.613E-04	0.140E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.264E-03	0.409E-01	0.599E+03	0.550E+03
0.392E+03	0.202E-03	0.140E-03	-0.613E-04	0.103E+03
0.514E+03	0.882E+02			
0.000E+00	0.000E+00	0.165E+02	0.261E+03	0.716E+02
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.212E-03
-0.300E-04	-0.121E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	0.385E-01	0.261E+03	0.716E+02
-0.284E-13	0.212E-03	-0.300E-04	-0.121E-03	0.131E+03
0.111E+03	0.110E+03			
0.400E+01	0.000E+00	0.000E+00	0.371E+03	0.358E+03
0.502E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.225E-04
0.749E-05	0.175E-03	0.000E+00	-0.162E-04	0.000E+00
0.000E+00	0.890E-03	0.419E-01	0.503E+03	0.371E+03
0.358E+03	0.176E-03	0.225E-04	0.710E-05	0.723E+02
0.411E+03	0.652E+02			
0.400E+01	0.000E+00	0.100E+02	0.256E+03	0.287E+03
0.302E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.172E-04
0.530E-04	0.705E-04	0.000E+00	0.394E-03	0.000E+00
0.000E+00	0.831E-03	0.406E-01	0.463E+03	0.256E+03
0.125E+03	0.259E-03	0.172E-04	-0.135E-03	0.169E+03
0.281E+03	0.139E+03			
0.400E+01	0.000E+00	0.165E+02	0.174E+03	0.258E+03
0.355E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.474E-04
0.145E-03	-0.115E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	0.391E-01	0.258E+03	0.174E+03
0.355E+02	0.145E-03	0.474E-04	-0.115E-03	0.111E+03
0.156E+03	0.918E+02			
0.100E+02	0.000E+00	0.000E+00	-0.774E+02	-0.495E+02
0.311E+03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00	-0.152E-03
-0.119E-03	0.301E-03	0.000E+00	-0.471E-04	0.000E+00
0.000E+00	0.533E-04	0.404E-01	0.312E+03	-0.507E+02

```

-0.774E+02  0.303E-03 -0.120E-03 -0.152E-03  0.195E+03
0.613E+02  0.178E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.283E+02  0.116E+03
0.200E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.129E-03
0.391E-04  0.138E-03  0.000E+00  0.142E-03  0.000E+00
0.000E+00  0.676E-03  0.400E-01  0.232E+03  0.839E+02
-0.283E+02  0.175E-03  0.203E-05 -0.129E-03  0.130E+03
0.958E+02  0.107E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.165E+02  0.103E+02  0.222E+03
0.126E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.107E-03
0.139E-03  0.274E-04  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.393E-01  0.222E+03  0.126E+03
0.103E+02  0.139E-03  0.274E-04 -0.107E-03  0.106E+03
0.119E+03  0.864E+02
  0.100E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.137E+02 -0.141E+00
0.311E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.152E-03
-0.119E-03  0.627E-03  0.000E+00 -0.970E-04  0.000E+00
0.000E+00  0.532E-04  0.404E-01  0.312E+03 -0.145E+01
-0.137E+02  0.630E-03 -0.122E-03 -0.152E-03  0.163E+03
0.990E+02  0.151E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.130E+02  0.570E+02
0.200E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.129E-03
0.391E-04  0.383E-03  0.000E+00  0.292E-03  0.000E+00
0.000E+00  0.676E-03  0.400E-01  0.222E+03  0.347E+02
-0.130E+02  0.436E-03 -0.145E-04 -0.129E-03  0.118E+03
0.814E+02  0.102E+03
  0.100E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.992E+01  0.928E+02
0.126E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.107E-03
0.139E-03  0.218E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.393E-01  0.126E+03  0.928E+02
-0.992E+01  0.218E-03  0.139E-03 -0.107E-03  0.677E+02
0.695E+02  0.577E+02
  0.400E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.105E+02 -0.552E+01
0.370E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.127E-03
-0.871E-04  0.251E-03  0.000E+00 -0.145E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.155E-02  0.327E-01  0.389E+02 -0.740E+01
-0.105E+02  0.266E-03 -0.102E-03 -0.127E-03  0.247E+02
0.700E+01  0.226E+02
  0.400E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.112E+02 -0.628E+01
0.398E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.135E-03
-0.958E-04  0.270E-03  0.000E+00 -0.552E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.626E-03  0.335E-01  0.400E+02 -0.654E+01
-0.112E+02  0.272E-03 -0.978E-04 -0.135E-03  0.256E+02
0.743E+01  0.231E+02
  0.400E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.113E+02 -0.632E+01
0.402E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.136E-03
-0.966E-04  0.273E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.337E-01  0.402E+02 -0.632E+01
-0.113E+02  0.273E-03 -0.966E-04 -0.136E-03  0.257E+02
0.751E+01  0.232E+02

```

```

0.550E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.786E+01 -0.572E+01
0.213E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.102E-03
-0.796E-04  0.199E-03  0.000E+00 -0.102E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.143E-02  0.296E-01  0.222E+02 -0.661E+01
-0.786E+01  0.208E-03 -0.887E-04 -0.102E-03  0.150E+02
0.257E+01  0.139E+02
0.550E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.824E+01 -0.654E+01
0.228E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.106E-03
-0.888E-04  0.213E-03  0.000E+00 -0.422E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.584E-03  0.302E-01  0.229E+02 -0.668E+01
-0.824E+01  0.215E-03 -0.903E-04 -0.106E-03  0.156E+02
0.267E+01  0.143E+02
0.550E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.831E+01 -0.669E+01
0.231E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.107E-03
-0.905E-04  0.216E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.303E-01  0.231E+02 -0.669E+01
-0.831E+01  0.216E-03 -0.905E-04 -0.107E-03  0.157E+02
0.269E+01  0.144E+02
0.750E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.121E+02 -0.108E+02
0.125E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.974E-04
-0.832E-04  0.157E-03  0.000E+00 -0.354E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.147E-02  0.262E-01  0.126E+02 -0.109E+02
-0.121E+02  0.158E-03 -0.845E-04 -0.974E-04  0.124E+02
-0.346E+01  0.114E+02
0.750E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.127E+02 -0.117E+02
0.131E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.100E-03
-0.906E-04  0.165E-03  0.000E+00 -0.145E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.594E-03  0.266E-01  0.131E+02 -0.118E+02
-0.127E+02  0.165E-03 -0.908E-04 -0.100E-03  0.129E+02
-0.379E+01  0.119E+02
0.750E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.128E+02 -0.119E+02
0.132E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.101E-03
-0.920E-04  0.167E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.267E-01  0.132E+02 -0.119E+02
-0.128E+02  0.167E-03 -0.920E-04 -0.101E-03  0.130E+02
-0.385E+01  0.120E+02
0.750E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.101E+00  0.683E+00
0.125E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.974E-04
-0.833E-04  0.203E-03  0.000E+00 -0.829E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.147E-02  0.262E-01  0.128E+02  0.440E+00
0.101E+00  0.209E-03 -0.892E-04 -0.974E-04  0.633E+01
0.444E+01  0.589E+01
0.750E+02  0.000E+00  0.100E+02  0.719E-01  0.476E+00
0.131E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.100E-03
-0.906E-04  0.214E-03  0.000E+00 -0.340E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.594E-03  0.266E-01  0.131E+02  0.437E+00
0.719E-01  0.215E-03 -0.916E-04 -0.100E-03  0.652E+01
0.454E+01  0.606E+01
0.750E+02  0.000E+00  0.165E+02  0.668E-01  0.436E+00
0.132E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.101E-03

```

-0.920E-04	0.216E-03	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	0.267E-01	0.132E+02	0.436E+00
0.668E-01	0.216E-03	-0.920E-04	-0.101E-03	0.655E+01
0.456E+01	0.609E+01			

Lampiran 3 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Alternatif 2

*** LAYERS STRUCTURE

LAYER NUMBER	THICKNESS	MODULUS OF ELASTICITY	POISSON RATIO	INTERFACE CONDITION
1	4.00	1100000.00	0.40	0.00
2	7.50	1200000.00	0.40	0.00
3	8.00	1200000.00	0.40	0.00
4	20.00	220000.00	0.35	0.00
5	15.00	170000.00	0.35	0.00
6	20.00	131000.00	0.35	0.00
7		60000.00	0.45	

*** APPLIED LOADS

LOAD NUMBER	X COORD	Y COORD	LOAD MAGNITUDE	CONTACT AREA
1	0.00	0.00	199999.80	363.64
2	0.00	33.00	199999.80	363.64

*** EVALUATION POINTS

POINT NUMBER	X COORD	Y COORD
1	0.00	0.00
2	0.00	10.00
3	0.00	16.50

*** CALCULATION DEPTHS

DEPTH NUMBER	DEPTH
1	0.00
2	4.00
3	11.50
4	19.50
5	19.50
6	39.50
7	54.50
8	74.50
9	74.50

*** RESULTS


```

-----
      DEPTH      X-COORD      Y-COORD      STRESS-X      STRESS-Y
STRESS-Z      SHEAR-XZ      SHEAR-YZ      SHEAR-XY      STRAIN-X
STRAIN-Y      STRAIN-Z      SHEAR-XZ      SHEAR-YZ      SHEAR-XY
DISPLT-X      DISPLT-Y      DISPLT-Z      P.STRESS1      P.STRESS2
P.STRESS3      P.STRAIN1      P.STRAIN2      P.STRAIN3      MAX.SHEAR
OCT.STRESS      OCT.SHEAR
-----
-----
-----
-----
      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.734E+03      0.684E+03
0.550E+03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.219E-03
0.155E-03      -0.156E-04      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00
0.000E+00      0.183E-02      0.450E-01      0.734E+03      0.684E+03
0.550E+03      0.219E-03      0.155E-03      -0.156E-04      0.920E+02
0.656E+03      0.776E+02
      0.000E+00      0.000E+00      0.100E+02      0.615E+03      0.432E+03
0.550E+03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.202E-03
-0.308E-04      0.119E-03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00
0.000E+00      0.562E-03      0.444E-01      0.615E+03      0.550E+03
0.432E+03      0.202E-03      0.119E-03      -0.308E-04      0.913E+02
0.532E+03      0.756E+02
      0.000E+00      0.000E+00      0.165E+02      0.297E+03      0.146E+03
0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.217E-03
0.247E-04      -0.161E-03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00
0.000E+00      0.000E+00      0.422E-01      0.297E+03      0.146E+03
0.284E-13      0.217E-03      0.247E-04      -0.161E-03      0.149E+03
0.148E+03      0.121E+03
      0.400E+01      0.000E+00      0.000E+00      0.397E+03      0.374E+03
0.517E+03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.338E-04
0.739E-05      0.174E-03      0.000E+00      -0.322E-04      0.000E+00
0.000E+00      0.106E-02      0.446E-01      0.518E+03      0.397E+03
0.373E+03      0.175E-03      0.338E-04      0.585E-05      0.725E+02
0.429E+03      0.635E+02
      0.400E+01      0.000E+00      0.100E+02      0.286E+03      0.314E+03
0.302E+03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.333E-04
0.659E-04      0.511E-04      0.000E+00      0.342E-03      0.000E+00
0.000E+00      0.946E-03      0.441E-01      0.455E+03      0.286E+03
0.161E+03      0.230E-03      0.333E-04      -0.113E-03      0.147E+03
0.301E+03      0.120E+03
      0.400E+01      0.000E+00      0.165E+02      0.206E+03      0.291E+03
0.255E+02      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      0.658E-04
0.165E-03      -0.144E-03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00
0.000E+00      0.000E+00      0.429E-01      0.291E+03      0.206E+03
0.255E+02      0.165E-03      0.658E-04      -0.144E-03      0.133E+03
0.174E+03      0.111E+03
      0.115E+02      0.000E+00      0.000E+00      0.125E+02      0.324E+02
0.281E+03      0.000E+00      0.000E+00      0.000E+00      -0.940E-04

```

```

-0.707E-04  0.219E-03  0.000E+00 -0.644E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.197E-03  0.429E-01  0.284E+03  0.294E+02
0.125E+02  0.223E-03 -0.742E-04 -0.940E-04  0.136E+03
0.109E+03  0.124E+03
    0.115E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.144E+01  0.748E+02
0.172E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.834E-04
0.556E-05  0.119E-03  0.000E+00  0.153E-03  0.000E+00
0.000E+00  0.237E-03  0.435E-01  0.205E+03  0.416E+02
-0.144E+01  0.157E-03 -0.331E-04 -0.834E-04  0.103E+03
0.817E+02  0.889E+02
    0.115E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.720E+01  0.102E+03
0.100E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.733E-04
0.535E-04  0.523E-04  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.433E-01  0.102E+03  0.100E+03
-0.720E+01  0.535E-04  0.523E-04 -0.733E-04  0.544E+02
0.649E+02  0.510E+02
    0.195E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.304E+03 -0.240E+03
0.105E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.208E-03
-0.134E-03  0.269E-03  0.000E+00 -0.380E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.149E-02  0.411E-01  0.106E+03 -0.241E+03
-0.304E+03  0.270E-03 -0.134E-03 -0.208E-03  0.205E+03
-0.146E+03  0.180E+03
    0.195E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.282E+03 -0.165E+03
0.974E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.213E-03
-0.758E-04  0.230E-03  0.000E+00  0.402E-05  0.000E+00
0.000E+00 -0.364E-03  0.422E-01  0.974E+02 -0.165E+03
-0.282E+03  0.230E-03 -0.758E-04 -0.213E-03  0.190E+03
-0.117E+03  0.159E+03
    0.195E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.265E+03 -0.124E+03
0.912E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.210E-03
-0.451E-04  0.205E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.422E-01  0.912E+02 -0.124E+03
-0.265E+03  0.205E-03 -0.451E-04 -0.210E-03  0.178E+03
-0.990E+02  0.146E+03
    0.195E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.735E+01  0.483E+01
0.105E+03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.208E-03
-0.134E-03  0.482E-03  0.000E+00 -0.200E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.149E-02  0.411E-01  0.108E+03  0.225E+01
-0.735E+01  0.498E-03 -0.149E-03 -0.208E-03  0.575E+02
0.342E+02  0.521E+02
    0.195E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.756E+01  0.148E+02
0.973E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.213E-03
-0.756E-04  0.431E-03  0.000E+00  0.208E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.365E-03  0.422E-01  0.974E+02  0.148E+02
-0.756E+01  0.431E-03 -0.758E-04 -0.213E-03  0.525E+02
0.349E+02  0.451E+02
    0.195E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.746E+01  0.193E+02
0.912E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.210E-03
-0.455E-04  0.396E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.422E-01  0.912E+02  0.193E+02

```

```

-0.746E+01  0.396E-03 -0.455E-04 -0.210E-03  0.494E+02
0.344E+02  0.417E+02
  0.395E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.946E+01 -0.464E+01
0.403E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.129E-03
-0.907E-04  0.266E-03  0.000E+00 -0.154E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.162E-02  0.347E-01  0.423E+02 -0.665E+01
-0.946E+01  0.282E-03 -0.107E-03 -0.129E-03  0.259E+02
0.873E+01  0.238E+02
  0.395E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.998E+01 -0.538E+01
0.434E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.137E-03
-0.100E-03  0.287E-03  0.000E+00 -0.598E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.658E-03  0.357E-01  0.437E+02 -0.567E+01
-0.998E+01  0.289E-03 -0.103E-03 -0.137E-03  0.268E+02
0.934E+01  0.243E+02
  0.395E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.101E+02 -0.543E+01
0.439E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.138E-03
-0.102E-03  0.290E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.359E-01  0.439E+02 -0.543E+01
-0.101E+02  0.290E-03 -0.102E-03 -0.138E-03  0.270E+02
0.945E+01  0.244E+02
  0.545E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.825E+01 -0.601E+01
0.237E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.110E-03
-0.873E-04  0.219E-03  0.000E+00 -0.114E-03  0.000E+00
0.000E+00 -0.157E-02  0.314E-01  0.247E+02 -0.701E+01
-0.825E+01  0.230E-03 -0.975E-04 -0.110E-03  0.165E+02
0.316E+01  0.153E+02
  0.545E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.861E+01 -0.688E+01
0.254E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.115E-03
-0.974E-04  0.236E-03  0.000E+00 -0.470E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.641E-03  0.321E-01  0.256E+02 -0.704E+01
-0.861E+01  0.237E-03 -0.991E-04 -0.115E-03  0.171E+02
0.332E+01  0.158E+02
  0.545E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.868E+01 -0.704E+01
0.258E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.116E-03
-0.993E-04  0.239E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.322E-01  0.258E+02 -0.704E+01
-0.868E+01  0.239E-03 -0.993E-04 -0.116E-03  0.172E+02
0.334E+01  0.159E+02
  0.745E+02  0.000E+00  0.000E+00 -0.137E+02 -0.121E+02
0.140E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.109E-03
-0.934E-04  0.176E-03  0.000E+00 -0.404E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.165E-02  0.276E-01  0.141E+02 -0.123E+02
-0.137E+02  0.177E-03 -0.949E-04 -0.109E-03  0.139E+02
-0.395E+01  0.128E+02
  0.745E+02  0.000E+00  0.100E+02 -0.143E+02 -0.132E+02
0.146E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.113E-03
-0.102E-03  0.185E-03  0.000E+00 -0.165E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.668E-03  0.281E-01  0.147E+02 -0.133E+02
-0.143E+02  0.185E-03 -0.102E-03 -0.113E-03  0.145E+02
-0.430E+01  0.134E+02

```

```

    0.745E+02  0.000E+00  0.165E+02 -0.144E+02 -0.134E+02
0.147E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.113E-03
-0.104E-03  0.187E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.282E-01  0.147E+02 -0.134E+02
-0.144E+02  0.187E-03 -0.104E-03 -0.113E-03  0.146E+02
-0.437E+01  0.135E+02
    0.745E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.475E-01  0.702E+00
0.140E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.109E-03
-0.936E-04  0.228E-03  0.000E+00 -0.946E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.165E-02  0.276E-01  0.143E+02  0.419E+00
0.475E-01  0.234E-03 -0.100E-03 -0.109E-03  0.711E+01
0.491E+01  0.662E+01
    0.745E+02  0.000E+00  0.100E+02  0.288E-01  0.478E+00
0.146E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.113E-03
-0.102E-03  0.240E-03  0.000E+00 -0.388E-04  0.000E+00
0.000E+00 -0.669E-03  0.281E-01  0.147E+02  0.432E+00
0.288E-01  0.241E-03 -0.103E-03 -0.113E-03  0.732E+01
0.504E+01  0.681E+01
    0.745E+02  0.000E+00  0.165E+02  0.268E-01  0.435E+00
0.147E+02  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00 -0.113E-03
-0.104E-03  0.242E-03  0.000E+00  0.000E+00  0.000E+00
0.000E+00  0.000E+00  0.281E-01  0.147E+02  0.435E+00
0.268E-01  0.242E-03 -0.104E-03 -0.113E-03  0.736E+01
0.507E+01  0.684E+01

```

Lampiran 4 *Output* KENPAVE untuk Perkerasan *Existing*

```

INPUT FILE NAME -D:\Kuliah\Semester 7\TA\06. Analisis
KENPAVE\Analisis Jl Yogyakarta Pakem km 14.5 sd 16 (Existing).DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Analisis Jl Yogyakarta Pakem km 14.5 sd 16 (Existing)

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC 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)----- = 4
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 6
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 6 30
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.4 0.35 0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 4 9.9995 10.0005
39.9995
40.0005
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.100E+06 2
1.200E+06
3 2.200E+05 4 6.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.76
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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT VERTICAL VERTICAL VERTICAL MAJOR MINOR
INTERMEDIATE PRINCIPAL PRINCIPAL

P. STRESS

```

NO.	COORDINATE	DISP.	STRESS	STRESS	STRESS
(HORIZONTAL			(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)
P. STRAIN)					
1	0.00000	0.06427	550.000	1054.231	585.648
1021.320					
	(STRAIN)		-2.223E-04	3.740E-04	-2.223E-04
3.322E-04					
1	4.00000	0.06311	469.689	470.858	371.413
392.133					
	(STRAIN)		1.489E-04	1.504E-04	2.383E-05
2.532E-05					
1	9.99950	0.06126	239.109	239.762	-504.947
-421.182					
	(STRAIN)		5.077E-04	5.085E-04	-3.603E-04
-3.603E-04					
1	10.00050	0.06126	239.072	241.131	15.426
29.422					
	(STRAIN)		1.012E-03	1.025E-03	-3.603E-04
-3.603E-04					
1	39.99950	0.04561	37.492	37.924	-71.081
-56.458					
	(STRAIN)		3.726E-04	3.753E-04	-2.936E-04
-2.936E-04					
1	40.00050	0.04561	37.492	38.717	1.772
4.369					
	(STRAIN)		5.696E-04	5.992E-04	-2.936E-04
-2.936E-04					
2	0.00000	0.06338	550.000	790.332	345.719
687.881					
	(STRAIN)		-2.232E-04	3.426E-04	-2.232E-04
2.122E-04					
2	4.00000	0.06251	291.692	486.556	92.272
279.241					
	(STRAIN)		5.922E-05	3.072E-04	-1.946E-04
4.337E-05					
2	9.99950	0.06153	176.133	179.871	-362.816
-85.810					
	(STRAIN)		2.951E-04	2.994E-04	-3.337E-04
-3.337E-04					
2	10.00050	0.06153	176.137	184.246	10.622
55.887					
	(STRAIN)		6.819E-04	7.317E-04	-3.337E-04
-3.337E-04					
2	39.99950	0.04732	40.336	40.396	-76.612
-62.502					
	(STRAIN)		4.046E-04	4.049E-04	-3.131E-04
-3.131E-04					
2	40.00050	0.04732	40.335	40.510	1.792
5.215					

	(STRAIN)		6.184E-04	6.226E-04	-3.131E-04
-3.131E-04					
3	0.00000	0.06190	0.000	629.249	242.688
544.330					
	(STRAIN)		-2.061E-04	2.859E-04	-2.061E-04
1.778E-04					
3	4.00000	0.06084	39.641	240.758	39.641
191.000					
	(STRAIN)		-1.210E-04	1.350E-04	-1.210E-04
7.167E-05					
3	9.99950	0.06068	132.943	132.943	-257.639
131.415					
	(STRAIN)		1.529E-04	1.529E-04	-3.028E-04
-3.028E-04					
3	10.00050	0.06068	132.943	132.943	8.912
82.886					
	(STRAIN)		4.582E-04	4.582E-04	-3.029E-04
-3.029E-04					
3	39.99950	0.04763	40.793	40.793	-77.525
-63.296					
	(STRAIN)		4.095E-04	4.095E-04	-3.166E-04
-3.166E-04					
3	40.00050	0.04763	40.792	40.792	1.794
5.407					
	(STRAIN)		6.259E-04	6.259E-04	-3.166E-04
-3.166E-04					

Lampiran 5 *Output* KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 1

```

INPUT FILE NAME -D:\Kuliah\Semester 7\TA\06. Analisis
KENPAVE\Analisis Jl Yogyakarta Pakem km 14.5 sd 16 (Alt. 6).DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Analisis Jl Yogyakarta Pakem km 14.5 sd 16 (Alt. 6)

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC 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)----- = 6
NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 8
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 6 30 15 20
POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.4 0.2 0.35 0.35
0.45
VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 4 9.9995 10.0005
40 55
74.9995 75.0005
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.100E+06 2
1.200E+06
3 5.000E+05 4 1.700E+05 5 1.310E+05 6 6.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.76
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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT VERTICAL VERTICAL VERTICAL MAJOR MINOR
INTERMEDIATE DISPL. PRINCIPAL PRINCIPAL

```

PRINCIPAL NO. STRESS (STRAIN)	COORDINATE (HORIZONTAL P. STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)
1 614.910 (STRAIN)	0.00000 1.721E-04	0.04143 1.721E-04	550.000 -5.194E-05	625.090 1.851E-04
1 368.452 (STRAIN)	4.00000 7.594E-06	0.04189 7.594E-06	502.227 1.929E-04	502.560 1.933E-04
1 2.264E-05 (STRAIN)	9.99950 -1.516E-04	0.04042 -1.516E-04	310.803 3.013E-04	311.933 3.026E-04
1 -1.204E-04 (STRAIN)	10.00050 -1.516E-04	0.04042 -1.516E-04	310.777 6.271E-04	312.085 6.302E-04
1 -1.222E-04 (STRAIN)	40.00000 -1.267E-04	0.03266 -1.267E-04	37.037 1.201E-04	37.991 1.224E-04
1 -50.285 (STRAIN)	55.00000 -1.017E-04	0.02957 -1.017E-04	21.317 1.758E-04	22.067 1.818E-04
1 -8.945E-05 (STRAIN)	74.99950 -9.758E-05	0.02618 -9.758E-05	12.533 1.570E-04	12.659 1.583E-04
1 -10.908 (STRAIN)	75.00050 -9.758E-05	0.02618 -9.758E-05	12.533 2.030E-04	12.776 2.089E-04
1 -8.457E-05 (STRAIN)	0.442 -9.758E-05	0.02618 -9.758E-05	12.533 2.030E-04	12.776 2.089E-04
2 496.049 (STRAIN)	0.00000 1.322E-04	0.04123 1.322E-04	550.000 -6.761E-05	537.511 1.850E-04
2 251.523 (STRAIN)	4.00000 1.727E-05	0.04062 1.727E-05	301.490 8.086E-05	459.649 2.822E-04
2 1.727E-05 (STRAIN)	9.99950 -1.288E-04	0.04002 -1.288E-04	200.144 1.376E-04	231.946 1.747E-04
2 83.954 (STRAIN)				

2.051E-06					
2	10.00050	0.04002	200.133	222.451	-12.983
34.686					
	(STRAIN)	-1.288E-04	3.827E-04	4.362E-04	-1.288E-04
-1.442E-05					
2	40.00000	0.03352	39.788	39.916	-70.269
-54.130					
	(STRAIN)	-1.349E-04	1.293E-04	1.296E-04	-1.349E-04
-9.612E-05					
2	55.00000	0.03019	22.802	22.920	-14.367
-12.260					
	(STRAIN)	-1.065E-04	1.887E-04	1.896E-04	-1.065E-04
-8.973E-05					
2	74.99950	0.02658	13.083	13.103	-12.721
-11.766					
	(STRAIN)	-1.007E-04	1.652E-04	1.654E-04	-1.007E-04
-9.084E-05					
2	75.00050	0.02658	13.082	13.122	0.061
0.437					
	(STRAIN)	-1.007E-04	2.140E-04	2.150E-04	-1.007E-04
-9.158E-05					
3	0.00000	0.04026	0.000	431.788	242.689
390.205					
	(STRAIN)	1.095E-04	-7.828E-05	1.624E-04	-7.828E-05
1.095E-04					
3	4.00000	0.03910	35.462	238.844	35.462
161.916					
	(STRAIN)	4.745E-05	-1.135E-04	1.454E-04	-1.135E-04
4.745E-05					
3	9.99950	0.03933	125.451	222.036	10.340
125.451					
	(STRAIN)	-1.072E-04	2.708E-05	1.398E-04	-1.072E-04
2.708E-05					
3	10.00050	0.03933	125.455	125.455	-9.924
92.985					
	(STRAIN)	-1.072E-04	2.177E-04	2.177E-04	-1.072E-04
1.398E-04					
3	40.00000	0.03368	40.155	40.155	-70.981
-54.407					
	(STRAIN)	-1.363E-04	1.305E-04	1.305E-04	-1.363E-04
-9.648E-05					
3	55.00000	0.03031	23.068	23.068	-14.492
-12.360					
	(STRAIN)	-1.073E-04	1.910E-04	1.910E-04	-1.073E-04
-9.036E-05					
3	74.99950	0.02667	13.182	13.182	-12.810
-11.914					
	(STRAIN)	-1.012E-04	1.667E-04	1.667E-04	-1.012E-04
-9.194E-05					

3	75.00050	0.02667	13.181	13.181	0.060
0.442	(STRAIN)	-1.012E-04	2.159E-04	2.159E-04	-1.012E-04
-9.194E-05					
POINT	VERTICAL	NORMAL X	NORMAL Y	SHEAR XY	SHEAR YZ
SHEAR XZ					
		STRESS	STRESS	STRESS	STRESS
STRESS					
NO.	COORDINATE	(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)
(STRAIN)					
1	0.00000	6.251E+02	6.149E+02	0.000E+00	8.460E-07
0.000E+00	(STRAIN)	1.851E-04	1.721E-04	0.000E+00	2.153E-12
0.000E+00					
1	4.00000	3.685E+02	3.566E+02	0.000E+00	-6.960E+00
0.000E+00	(STRAIN)	2.265E-05	7.594E-06	0.000E+00	-1.772E-05
0.000E+00					
1	9.99950	-7.732E+01	-4.946E+01	0.000E+00	-2.021E+01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.516E-04	-1.190E-04	0.000E+00	-4.715E-05
0.000E+00					
1	10.00050	-1.365E+01	-9.796E-02	0.000E+00	-2.021E+01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.516E-04	-1.190E-04	0.000E+00	-9.700E-05
0.000E+00					
1	40.00000	-6.579E+01	-4.933E+01	0.000E+00	-9.124E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.267E-04	-8.716E-05	0.000E+00	-4.379E-05
0.000E+00					
1	55.00000	-1.363E+01	-1.086E+01	0.000E+00	-4.967E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.017E-04	-7.972E-05	0.000E+00	-7.889E-05
0.000E+00					
1	74.99950	-1.217E+01	-1.078E+01	0.000E+00	-1.715E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-9.758E-05	-8.328E-05	0.000E+00	-3.535E-05
0.000E+00					
1	75.00050	9.314E-02	6.850E-01	0.000E+00	-1.715E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-9.758E-05	-8.328E-05	0.000E+00	-8.289E-05
0.000E+00					
2	0.00000	5.375E+02	4.961E+02	0.000E+00	7.731E-06
0.000E+00	(STRAIN)	1.850E-04	1.322E-04	0.000E+00	1.968E-11
0.000E+00					

2	4.00000	2.515E+02	2.798E+02	0.000E+00	1.686E+02
0.000E+00	(STRAIN)	1.727E-05	5.329E-05	0.000E+00	4.293E-04
0.000E+00					
2	9.99950	-2.821E+01	1.158E+02	0.000E+00	6.079E+01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.288E-04	3.915E-05	0.000E+00	1.418E-04
0.000E+00					
2	10.00050	-1.298E+01	5.700E+01	0.000E+00	6.077E+01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.288E-04	3.915E-05	0.000E+00	2.917E-04
0.000E+00					
2	40.00000	-7.027E+01	-5.400E+01	0.000E+00	-3.463E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.349E-04	-9.581E-05	0.000E+00	-1.662E-05
0.000E+00					
2	55.00000	-1.437E+01	-1.214E+01	0.000E+00	-2.040E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.065E-04	-8.879E-05	0.000E+00	-3.240E-05
0.000E+00					
2	74.99950	-1.272E+01	-1.175E+01	0.000E+00	-7.049E-01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.007E-04	-9.063E-05	0.000E+00	-1.453E-05
0.000E+00					
2	75.00050	6.114E-02	4.768E-01	0.000E+00	-7.048E-01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.007E-04	-9.063E-05	0.000E+00	-3.407E-05
0.000E+00					
3	0.00000	4.318E+02	3.902E+02	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	1.624E-04	1.095E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	4.00000	1.619E+02	2.388E+02	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	4.745E-05	1.454E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	9.99950	1.034E+01	2.220E+02	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.072E-04	1.398E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	10.00050	-9.924E+00	9.299E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.072E-04	1.398E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	40.00000	-7.098E+01	-5.441E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.363E-04	-9.648E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	55.00000	-1.449E+01	-1.236E+01	0.000E+00	0.000E+00

0.000E+00					
	(STRAIN)	-1.073E-04	-9.036E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	74.99950	-1.281E+01	-1.191E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
	(STRAIN)	-1.012E-04	-9.194E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	75.00050	6.040E-02	4.424E-01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
	(STRAIN)	-1.012E-04	-9.194E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					

Lampiran 6 *Output* KENPAVE untuk Perkerasan Alternatif 2

INPUT FILE NAME -D:\Kuliah\Semester 7\TA\06. Analisis
KENPAVE\Analisis Jl Yogyakarta Pakem km 14.5 sd 16 (Alt. 9).DAT

NUMBER OF PROBLEMS TO BE SOLVED = 1

TITLE -Analisis Jl Yogyakarta Pakem km 14.5 sd 16 (Alt. 9)

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC 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)----- = 9
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/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 4 7.5 8 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 4 11.5 19.4995
19.5005
39.5 54.5 74.4995 74.5005
ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.100E+06 2
1.200E+06
3 1.200E+06 4 2.200E+05 5 1.700E+05 6 1.310E+05 7
6.000E+04

LOAD GROUP NO. 1 HAS 2 CONTACT AREAS
CONTACT RADIUS (CR)----- = 10.76
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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT INTERMEDIATE	VERTICAL	VERTICAL	VERTICAL	MAJOR	MINOR
-----------------------	----------	----------	----------	-------	-------

PRINCIPAL NO.	COORDINATE	DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	STRESS (STRAIN)	PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.04419	550.000	621.649	438.863
608.526	(STRAIN)	1.676E-04	-4.837E-05	1.843E-04	-4.837E-05
1.676E-04					
1	4.00000	0.04455	516.788	518.091	370.770
392.802	(STRAIN)	7.489E-06	1.917E-04	1.933E-04	5.829E-06
3.387E-05					
1	11.50000	0.04290	280.727	283.763	12.512
29.467	(STRAIN)	-9.398E-05	2.189E-04	2.225E-04	-9.398E-05
-7.420E-05					
1	19.49950	0.04113	105.149	105.917	-303.856
-240.509	(STRAIN)	-2.083E-04	2.688E-04	2.697E-04	-2.083E-04
-1.344E-04					
1	19.50050	0.04113	105.145	107.731	-7.343
2.261	(STRAIN)	-2.084E-04	4.819E-04	4.978E-04	-2.084E-04
-1.494E-04					
1	39.50000	0.03471	40.295	42.030	-18.632
-14.128	(STRAIN)	-1.291E-04	2.325E-04	2.432E-04	-1.291E-04
-1.014E-04					
1	54.50000	0.03137	23.765	24.605	-14.533
-12.473	(STRAIN)	-1.105E-04	1.937E-04	2.003E-04	-1.105E-04
-9.410E-05					
1	74.49950	0.02759	13.994	14.140	-13.710
-12.296	(STRAIN)	-1.096E-04	1.759E-04	1.774E-04	-1.096E-04
-9.501E-05					
1	74.50050	0.02759	13.994	14.277	0.039
0.422	(STRAIN)	-1.096E-04	2.277E-04	2.345E-04	-1.096E-04
-1.003E-04					
2	0.00000	0.04382	550.000	483.661	270.477
452.966	(STRAIN)	1.376E-04	-9.470E-05	1.766E-04	-9.470E-05
1.376E-04					
2	4.00000	0.04412	301.428	449.797	156.684
279.327					

	(STRAIN)	3.339E-05	6.152E-05	2.504E-04	-1.227E-04
3.339E-05					
2	11.50000	0.04350	171.827	204.999	-1.394
41.693					
	(STRAIN)	-8.339E-05	1.187E-04	1.574E-04	-8.339E-05
3.312E-05					
2	19.49950	0.04216	97.440	97.451	-282.446
165.164					
	(STRAIN)	-2.128E-04	2.304E-04	2.304E-04	-2.128E-04
7.597E-05					
2	19.50050	0.04216	97.437	97.474	-7.554
14.709					
	(STRAIN)	-2.128E-04	4.315E-04	4.317E-04	-2.128E-04
7.620E-05					
2	39.50000	0.03568	43.404	43.649	-19.802
-14.087					
	(STRAIN)	-1.370E-04	2.508E-04	2.523E-04	-1.370E-04
1.020E-04					
2	54.50000	0.03207	25.441	25.575	-15.272
-13.135					
	(STRAIN)	-1.154E-04	2.079E-04	2.089E-04	-1.154E-04
9.848E-05					
2	74.49950	0.02806	14.636	14.659	-14.323
-13.266					
	(STRAIN)	-1.131E-04	1.854E-04	1.856E-04	-1.131E-04
1.022E-04					
2	74.50050	0.02806	14.636	14.681	0.018
0.433					
	(STRAIN)	-1.131E-04	2.402E-04	2.413E-04	-1.131E-04
1.030E-04					
3	0.00000	0.04258	0.000	381.093	180.488
357.477					
	(STRAIN)	1.208E-04	-1.045E-04	1.508E-04	-1.045E-04
1.208E-04					
3	4.00000	0.04294	25.458	268.330	25.458
189.870					
	(STRAIN)	6.578E-05	-1.435E-04	1.656E-04	-1.435E-04
6.578E-05					
3	11.50000	0.04326	100.393	101.622	-7.189
100.393					
	(STRAIN)	-7.333E-05	5.218E-05	5.362E-05	-7.333E-05
5.218E-05					
3	19.49950	0.04221	91.203	91.203	-264.716
123.594					
	(STRAIN)	-2.098E-04	2.054E-04	2.054E-04	-2.098E-04
4.516E-05					
3	19.50050	0.04221	91.200	91.200	-7.457
19.375					
	(STRAIN)	-2.098E-04	3.956E-04	3.956E-04	-2.098E-04

-4.516E-05					
3	39.50000	0.03587	43.858	43.858	-19.990
-13.965					
	(STRAIN)	-1.384E-04	2.534E-04	2.534E-04	-1.384E-04
-1.015E-04					
3	54.50000	0.03222	25.748	25.748	-15.399
-13.241					
	(STRAIN)	-1.163E-04	2.104E-04	2.104E-04	-1.163E-04
-9.919E-05					
3	74.49950	0.02816	14.755	14.755	-14.426
-13.438					
	(STRAIN)	-1.136E-04	1.871E-04	1.871E-04	-1.136E-04
-1.035E-04					
3	74.50050	0.02816	14.754	14.754	0.019
0.441					
	(STRAIN)	-1.136E-04	2.425E-04	2.425E-04	-1.136E-04
-1.035E-04					
POINT VERTICAL NORMAL X NORMAL Y SHEAR XY SHEAR YZ					
SHEAR XZ					
STRESS STRESS STRESS STRESS					
STRESS					
NO. COORDINATE (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN) (STRAIN)					
(STRAIN)					
1	0.00000	6.217E+02	6.085E+02	0.000E+00	-1.753E-06
0.000E+00					
	(STRAIN)	1.843E-04	1.676E-04	0.000E+00	-4.463E-12
0.000E+00					
1	4.00000	3.928E+02	3.721E+02	0.000E+00	-1.380E+01
0.000E+00					
	(STRAIN)	3.387E-05	7.489E-06	0.000E+00	-3.512E-05
0.000E+00					
1	11.50000	1.251E+01	3.250E+01	0.000E+00	-2.762E+01
0.000E+00					
	(STRAIN)	-9.398E-05	-7.066E-05	0.000E+00	-6.444E-05
0.000E+00					
1	19.49950	-3.039E+02	-2.397E+02	0.000E+00	-1.630E+01
0.000E+00					
	(STRAIN)	-2.083E-04	-1.335E-04	0.000E+00	-3.804E-05
0.000E+00					
1	19.50050	-7.343E+00	4.847E+00	0.000E+00	-1.631E+01
0.000E+00					
	(STRAIN)	-2.084E-04	-1.336E-04	0.000E+00	-2.002E-04
0.000E+00					
1	39.50000	-1.863E+01	-1.239E+01	0.000E+00	-9.716E+00
0.000E+00					
	(STRAIN)	-1.291E-04	-9.080E-05	0.000E+00	-1.192E-04
0.000E+00					

1	54.50000	-1.453E+01	-1.163E+01	0.000E+00	-5.519E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.105E-04	-8.743E-05	0.000E+00	-8.765E-05
0.000E+00					
1	74.49950	-1.371E+01	-1.215E+01	0.000E+00	-1.959E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.096E-04	-9.351E-05	0.000E+00	-4.037E-05
0.000E+00					
1	74.50050	3.938E-02	7.044E-01	0.000E+00	-1.958E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.096E-04	-9.351E-05	0.000E+00	-9.466E-05
0.000E+00					
2	0.00000	4.837E+02	4.530E+02	0.000E+00	-7.317E-06
0.000E+00	(STRAIN)	1.766E-04	1.376E-04	0.000E+00	-1.862E-11
0.000E+00					
2	4.00000	2.793E+02	3.051E+02	0.000E+00	1.465E+02
0.000E+00	(STRAIN)	3.339E-05	6.614E-05	0.000E+00	3.730E-04
0.000E+00					
2	11.50000	-1.394E+00	7.487E+01	0.000E+00	6.570E+01
0.000E+00	(STRAIN)	-8.339E-05	5.577E-06	0.000E+00	1.533E-04
0.000E+00					
2	19.49950	-2.824E+02	-1.652E+02	0.000E+00	1.732E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-2.128E-04	-7.596E-05	0.000E+00	4.041E-06
0.000E+00					
2	19.50050	-7.554E+00	1.474E+01	0.000E+00	1.727E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-2.128E-04	-7.597E-05	0.000E+00	2.120E-05
0.000E+00					
2	39.50000	-1.980E+01	-1.384E+01	0.000E+00	-3.752E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.370E-04	-1.005E-04	0.000E+00	-4.604E-05
0.000E+00					
2	54.50000	-1.527E+01	-1.300E+01	0.000E+00	-2.272E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.154E-04	-9.742E-05	0.000E+00	-3.609E-05
0.000E+00					
2	74.49950	-1.432E+01	-1.324E+01	0.000E+00	-8.051E-01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.131E-04	-1.019E-04	0.000E+00	-1.659E-05
0.000E+00					
2	74.50050	1.825E-02	4.788E-01	0.000E+00	-8.050E-01
0.000E+00	(STRAIN)	-1.131E-04	-1.019E-04	0.000E+00	-3.891E-05
0.000E+00					

3	0.00000	3.811E+02	3.575E+02	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	1.508E-04	1.208E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	4.00000	1.899E+02	2.683E+02	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	6.578E-05	1.656E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	11.50000	-7.189E+00	1.016E+02	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-7.333E-05	5.362E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	19.49950	-2.647E+02	-1.236E+02	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-2.098E-04	-4.516E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	19.50050	-7.457E+00	1.937E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-2.098E-04	-4.516E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	39.50000	-1.999E+01	-1.397E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.384E-04	-1.015E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	54.50000	-1.540E+01	-1.324E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.163E-04	-9.919E-05	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	74.49950	-1.443E+01	-1.344E+01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.136E-04	-1.035E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					
3	74.50050	1.920E-02	4.407E-01	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	(STRAIN)	-1.136E-04	-1.035E-04	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00					