TUGAS AKHIR

PENERAPAN *SOFTWARE* WINJULEA SEBAGAI PENDUKUNG ANALISIS PERKERASAN PADA RUAS JALAN PAKEM-KALIURANG KM 17 - 19 MENGGUNAKAN BINA MARGA 2017 DAN BINA MARGA 2024

(IMPLEMENTATION OF WINJULEA SOFTWARE AS A SUPPORT FOR PAVEMENT ANALYSIS ON THE PAKEM-KALIURANG KM 17 – 19 ROAD SECTION USING BINA MARGA 2017 AND BINA MARGA 2024)

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

RAHMA SYAFITRI

21511235

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

2025

TUGAS AKHIR

PENERAPAN *SOFTWARE* WINJULEA SEBAGAI PENDUKUNG ANALISIS PERKERASAN PADA RUAS JALAN PAKEM-KALIURANG KM 17 - 19 MENGGUNAKAN BINA MARGA 2017 DAN BINA MARGA 2024

(IMPLEMENTATION OF WINJULEA SOFTWARE AS A SUPPORT FOR PAVEMENT ANALYSIS ON THE PAKEM-KALIURANG KM 17 – 19 ROAD SECTION USING BINA MARGA 2017 AND BINA MARGA 2024)

Disusun Oleh

RAHMA SYAFITRI
21511235

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

Diuji pada tanggal 24 November 2025

Oleh Dewan Penguji

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

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

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

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat 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 dan sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, November 2025

Penulis



Rahma Syafitri

(2151235)

DEDIKASI

First and foremost, to Allah SWT who made me believe in all the miracles that happened, if not without Allah I would not have succeeded.

I dedicate this final project to myself (Rahma, Ama, Adek) for successfully challenging myself. Thank you for stepping out of your comfort zone, thank you for standing up and daring to take big steps, and thank you for successfully making thousands of difficult decisions. You have successfully crossed one stage into a more unpredictable life. Congratulations, Ma. You're doing great.

To my beloved, my heaven, my world, Ibu, Alm. Bapak, Kakak and Uni. I dedicate this final project to you, Bu, Pak. Thanks to your prayers and efforts, I have successfully completed this final project. Thank you for shaping me to be strong since birth, mature in every situation, and always accepting every decree of God. Ibu and Bapak are the main reason I am still in this world.

To my partner in everything, who is always there to accompany me, and to encourage me. Your presence is one of the many reasons why this final project was completed well. I made this. You can do it too. We can do it!!

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat serta karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini sebagai salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia dengan sebaik-baiknya. Shalawat serta salam selalu tercurah pula untuk junjungan Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta pengikut beliau.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, banyak dukungan, bantuan serta kritik dan saran.Berkaitan dengan itu, penulis ingin mengucapkan rasa terimasih yang mendalam kepada pihak-pihak terkait.

1. Bapak Ir. Muhamad Abdul Hadi, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, Terimakasih atas bimbingan, saran, serta dukungan yang diberikan selama penulis Menyusun Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prayogo Afang Prayitno, S.T., M.Sc. dan Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan masukan serta saran dalam memperbaiki dan menyempurnakan Tuga Akhir ini.
3. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
4. Ibuku tersayang – surgaku - duniaku, Ibu Netri Dewita. Terima kasih karena telah menjadi *superman* dan *supergirl* dalam sekali waktu, selalu mendukung dan mendoakan. Semua keajaiban hidup Ama terjadi atas doa-doa ibu.

5. Alm. Bapak Suharno, terimakasih karena membawa Ama kejalan yang tidak pernah Ama duga hingga membentuk Ama menjadi wanita kuat. Terima kasih karena selalu berusaha memberikan yang terbaik untuk Ama.
6. Teruntuk Kakak, Wiwit Hardewandes. Terima kasih karena selalu setia mendukung dan mendoakan Ama dimanapun berada. Dan Uni, Tiwwi Rahayu. Terima kasih atas setiap obrolan yang saling menguatkan, setiap semangat yang diberikan, setiap doa yang selalu dicurahkan.
7. Arfian Hanif Imaduddin, terima kasih atas semua doa, waktu, guyonan yang menghibur penulis dikala pusing, semangat yang selalu diberikan, serta yakin dan percaya atas semua yang sedang penulis usahakan.
8. Ayu Aprilia Sustriyanti, terima kasih telah menjadi sahabat dalam suka dan duka semasa perkuliahan ini, saling menguatkan, saling menasehati. Tanpamu masa perkuliahanku hampa.
9. Dioba Sadewo selaku sahabat yang selalu yang selalu memberi semangat serta memberikan tawa yang membangkitkan semangat penulis sedari putih biru.
10. Yuda Prabowo, Muhammad Rizal Firmansyah, Devano Niagara yang selalu membantu dan menciptakan tawa dimasa perkuliahan ini.
11. Semua sahabat, keluarga dan pihak terkait yang telah mendukung dan membantu penyelesaian Tugas Akhir ini dalam bentuk bantuan, doa, semangat serta kritik dan saran.

Penulis menyadari bahwa tidak ada yang sempurna didunia ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik serta saran yang sifatnya dapat mebangun dan bermanfaat demi perbaikan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi siapapun.

Yogyakarta, November 2025

Penulis

Rahma Syafitri
(21511235)

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
ABSTRACT xix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 6
2.1 Evaluasi Kondisi Perkerasan Jalan dengan Metode Bina Marga 2017 6
2.2 Evaluasi Kondisi Perkerasan Jalan dengan Metode Bina Marga 2024 7
2.3 Evaluasi Kondisi Perkerasan Jalan dengan *Software* WinJULEA 8
BAB III LANDASAN TEORI 13
3.1 Perkerasan Lentur 13
3.2 Desain Tebal Perkerasan dengan Bina Marga 2017 13
3.2.1 Data Lalu Lintas 14
3.2.2 Jenis Kendaraan 15
3.2.3 Pemilihan Struktur Perkerasan 16

3.2.4 Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas (i) 19
3.2.5 Faktor Lajur Rencana 20
3.2.6 Faktor Ekivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*) 20
3.2.7 Beban Sumbu Standar Kumulatif 22
3.3 Desain Tebal Perkerasan dengan Bina Marga 2024 22
3.3.1 Pemilihan Jenis Perkerasan 22
3.3.2 Jenis Kendaraan 26
3.3.3 Faktor Ekivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*) 27
3.4 *Software* WinJULEA 28
3.4.1 *Input Layers* 30
3.4.2 *Input Loads* 34
3.4.3 *Input Evaluation Points* 36
3.4.4 *Input Calculation Depth* 36
3.4.5 *Result At Calculations Points* 37
3.4.6 *Output* WinJULEA 39
BAB IV METODE PENELITIAN 41
4.1 Metode Penelitian 41
4.2 Pengumpulan Data 41
4.3 Lokasi Studi Kasus 42
4.4 Tahapan Penelitian 42
4.5 Bagan Alir Penelitian 43
4.6 Analisis Penelitian 44
4.6.1 Tahapan Analisis Metode Bina Marga 2017 45
4.6.2 Tahapan Analisis Metode Bina Marga 2024 45
4.6.3 Tahapan Analisis *Software* WinJULEA 45
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN 47
5.1 Analisis 47
5.1.1 Analisis Sisa Umur Pelayanan Perkerasan Eksisting 48
5.1.2 Analisis Alternatif Desain Perkerasan Bina Marga 2017 68
5.1.3 Analisis Alternatif Desain Perkerasan Bina Marga 2024 73
5.2 Pembahasan 78

5.2.1 Pembahasan Perkerasan Eksisting 78
5.2.2 Pembahasan Alternatif Bina Marga 2017 82
5.2.2 Pembahasan Alternatif Bina Marga 2024 85
5.2.3 Pembahasan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 87
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 91
6.1 Kesimpulan 91
6.2 Saran 92
DAFTAR PUSTAKA 93
LAMPIRAN 97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini 10
Tabel 3.1 Umur Rencana Perkerasan Jalan Baru 14
Tabel 3.2 Klasifikasi Jenis Kendaraan 15
Tabel 3.3 Pemilihan Jenis Perkerasan 16
Tabel 3.4 Desain Perkerasan Lentur Opsi Biaya Minimum Dengan CTB 17
Tabel 3.5 Desain Perkerasan Lentur – Aspal dengan Lapis Fondasi Berbutir 18
Tabel 3.6 Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i) (%) 19
Tabel 3.7 Faktor Distribusi Lajur (DL) 20
Tabel 3.8 Nilai VDF Masing – Masing Jenis Kendaraan Niaga 21
Tabel 3.9 Pemilihan Jenis Perkerasan 23
Tabel 3.10 Desain Perkerasan Lentur dengan 150 mm CTB (Aspal Pen 60/70 dan PG70) 24
Tabel 3.11 Desain Perkerasan Lentur – Aspal dengan Lapis Fondasi Agregat (Aspal Pen 60/70 dan PG70) 25
Tabel 3.12 Nilai VDF Daerah Istimewa Yogyakarta 28
Tabel 3.13 Nilai Modulus Elastis Bina Marga 2017 31
Tabel 3.14 Nilai Modulus Elastis Bina Marga 2024 31
Tabel 3.15 Nilai *Poisson's Ratio* Bina Marga 2017 32
Tabel 3.16 Nilai *Poisson's Ratio* Bina Marga 2024 33
Tabel 4.1 Data Kondisi Ruas Jalan Pakem-Kaliurang KM 17 - 19 42
Tabel 5.1 Kondisi Ruas Jalan Pakem - Kaliurang 48
Tabel 5.2 Data Volume Lalu Lintas Harian Tahun 2024 48
Tabel 5.3 Penggolongan Jenis Kendaraan dan Nilai LHR 2024 Untuk Bina Marga 2017 51
Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Nilai LHR Pada Tahun 2025 51
Tabel 5.5 Nilai VDF Masing-Masing Jenis Kendaraan 53

Tabel 5.6 Rekapitulasi Perhitungan Nilai $CESAL_4$ dan $CESAL_5$ Untuk Bina Marga 2017 54
Tabel 5.7 Penggolongan Jenis Kendaraan dan Nilai LHR 2024 Untuk Bina Marga 2024 55
Tabel 5.8 Rekapitulasi Perhitungan LHR 2025 dan LHR 2028 57
Tabel 5.9 Nilai VDF Masing-Masing Jenis Kendaraan 58
Tabel 5.10 Rekapitulasi Perhitungan Nilai $CESAL_4$ dan $CESAL_5$ 59
Tabel 5.11 Data Material Lapisan Eksisting Bina Marga 2017 60
Tabel 5.12 Data Material Lapisan Eksisting Bina Marga 2024 61
Tabel 5.13 *Output* Analisis WinJULEA untuk Ketebalan Eksisting Bina Marga 2017 64
Tabel 5.14 *Output* Analisis WinJULEA untuk Ketebalan Eksisting Bina Marga 2024 64
Tabel 5.15 Nilai Kontrol Beban Perkerasan Eksisting Berdasarkan *Output* WinJULEA 64
Tabel 5.16 Sisa Umur Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2017 66
Tabel 5.17 Sisa Umur Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2024 67
Tabel 5.18 Data Material Alternatif 1 Bina Marga 2017 69
Tabel 5.19 Data Material Alternatif 2 Bina Marga 2017 70
Tabel 5.20 *Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017 71
Tabel 5.21 *Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017 71
Tabel 5.22 Nilai Kontrol Beban untuk Alternatif Bina Marga 2017 Berdasarkan *Output* WinJULEA 72
Tabel 5.23 Rekapitulasi Prediksi Umur Layanan untuk Alternatif Bina Marga 2017 72
Tabel 5.24 Data Material Alternatif 1 Bina Marga 2024 74
Tabel 5.25 Data Material Alternatif 2 Bina Marga 2024 75
Tabel 5.26 *Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024 76
Tabel 5.27 *Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024 77
Tabel 5.28 Nilai Kontrol Beban Berdasarkan *Output* WinJULEA 77

Tabel 5.29 Rekapitulasi Prediksi Umur Layanan untuk Alternatif Bina Marga 2024 78
Tabel 5.30 Rekapitulasi Hasil Analisis Nilai Nf, Nr, dan Nd Untuk Bina Marga 2017 87
Tabel 5.31 Rekapitulasi Hasil Analisis Nilai Nf, Nr, dan Nd Untuk Bina Marga 2024 88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Susunan Lapis Perkerasan Lentur 13
Gambar 3.2 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan 26
Gambar 3.3 Tampilan Awal *Software* WinJULEA 29
Gambar 3.4 Konfigurasi Beban Sumbu Standar 35
Gambar 4.1 Lokasi Penelitian 42
Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian 44
Gambar 5.1 Tebal Lapis Perkerasan Eksisting 47
Gambar 5.2 Tebal Perkerasan Eksisting Dengan Kerusakan 49
Gambar 5.3 *Plan View of Multiple Wheels* 62
Gambar 5.4 Titik Tinjau Berdasarkan Konfigurasi Beban Sumbu Standar 62
Gambar 5.5 Data *Input* WinJULEA Untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017 63
Gambar 5.6 Data *Input* WinJULEA Untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024 63
Gambar 5.7 Alternatif Desain Tebal Lapis Perkerasan Untuk Bina Marga 2017 69
Gambar 5.8 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017 70
Gambar 5.9 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017 71
Gambar 5.10 Alternatif Tebal Lapis Perkerasan Untuk Bina Marga 2024 74
Gambar 5.11 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024 75
Gambar 5.12 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024 76
Gambar 5.13 Nilai Regangan Eksisting Pada Jenis Kerusakan 79
Gambar 5.14 Sisa Umur Pelayanan Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017 80
Gambar 5.15 Sisa Umur Pelayanan Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024 81
Gambar 5.16 Kerusakan *Permanent Deformation* (Alur) 81
Gambar 5.17 Kerusakan *Permanent Deformation* (Mound) 82
Gambar 5.18 Nilai Regangan Alternatif Bina Marga 2017 84

Gambar 5.19 Nilai Regangan Bina Marga 2024 Pada Jenis Kerusakan 86

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 *Ouput* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017 98
Lampiran 2 *Ouput* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024 102
Lampiran 3 *Ouput* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017 106
Lampiran 4 *Ouput* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017 110
Lampiran 5 *Ouput* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024 114
Lampiran 6 *Ouput* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024 118
Lampiran 7 Data Lalu Lintas Harian 122

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A = Luas kontak ban

AASHTO = *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AC = *Asphalt Concrete*

AC - BC = *Asphalt Concrete - Binder Course*

AC - WC = *Asphalt Concrete - Wearing Course*

Alt = Alternatif

BM = Bina Marga

CBR = *California Bearing Ratio*

CESAL = *Cumulative Equivalent Single Axle Load*

Cm = *Centimeter*

CR = *Crumb Rubber*

CTB = *Cement Treated Base*

DD = Distribusi arah

DL = Distribusi Lajur

EME = *Enrobés à Module Elevé*

ESA4 = *Equivalent Standart Axle* pangkat 4

ESA5 = *Equivalent Standart Axle* pangkat 5

ESAL = *Equivalent Standart Axle Load*

HRS = *Hot Rolled Sheet*

i = faktor pertumbuhan lalu lintas (%)

Kg = Kilogram

KM = Kiloeter

Kn = Kilonewton

kPa = Kilopascal

LFA = Lapisan Fondasi Agregat

LHR = Lalu Lintas Harian

LHR_0	= Lalu Lintas Harian Rata-Rata pada tahun survei
LHR_t	= Lalu Lintas Harian Rata-Rata pada tahun ke-t
MEPD	= *Mechanistic - Empirical Pavement Design*
mm	= Milimeter
N	= Newton
Nd	= Nilai repitisi beban lalu lintas sampai terjadi *permanent deformation*
Nf	= Nilai repitisi beban alu lintas sampai terjadi *fatigue cracking*
Nr	= Nilai repitisi beban alu lintas sampai terjadi *rutting*
p	= Tekanan ban
PCASE	= *Pavement - Transportation Computer Asssited Structural Engineering*
PCI	= *Pavement Condition Faktor*
PG	= *Performance Grad*e (kelas kinerja aspal)
R	= Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kualitatif
SADT	= *Single Axle Dual Tiar*
t	= Selisih tahun rencana dan tahun survei
UR	= Umur rencana
VDF	= *Vehicle Damage Factor*
W	= Beban roda
WIM	= *Weight - In - Motion*
WinJULEA	= *Jacob Uzan Layered Elastic Analysis*

ABSTRAK

Jalan raya memiliki peran penting dalam mendukung aktivitas sosial, ekonomi, dan mobilitas masyarakat. Kondisi lalu lintas yang padat pada ruas Jalan Pakem–Kaliurang KM 17-19, Yogyakarta, menyebabkan perlunya evaluasi struktur perkerasan untuk menjamin umur rencana dan kenyamanan berkendara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja perkerasan lentur dengan metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 menggunakan pendekatan mekanistik–empiris yang didukung oleh *software* WinJULEA.

Analisis dilakukan terhadap kondisi eksisting serta dua alternatif perbaikan desain untuk masing-masing metode dengan mempertimbangkan nilai regangan horizontal, dan vertikal akibat beban lalu lintas rencana selama 20 tahun. Penelitian menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta yang berupa data ketebalan lapisan perkerasan, sifat material, dan data lalu lintas.

Hasil analisis menunjukan bahwa kondisi perkerasan ruas jalan Pakem - Kaliurang memerlukan perbaikan atau penguatan lapisan pondasi dan tanah dasar agar kinerjanya tetap optimal karena *rutting* dan deformasi muncul jauh lebih cepat. Alternatif terbaik untuk Bina Marga 2017 adalah struktur AC-WC, AC-BC, AC Base, dan LFA Kelas A, sedangkan untuk Bina Marga 2024 adalah AC-WC, AC-BC, AC Base, serta LFA Kelas A, B, dan C. Kedua alternatif tersebut memenuhi umur rencana 20 tahun dengan kinerja optimal terhadap beban lalu lintas. Hasil menunjukkan bahwa pada Bina Marga 2024 memberikan nilai ketahanan terhadap kerusakan yang lebih tinggi dibanding Bina Marga 2017. Maka, penelitian ini merekomendasikan penggunaan alternatif desain Bina Marga 2024 untuk meningkatkan umur dan kinerja jalan di ruas tersebut.

Kata Kunci: Bina Marga 2017, Bina Marga 2024, perkerasan lentur, dan WinJULEA.

ABSTRACT

Roads play a crucial role in supporting social and economic activities, as well as community mobility. The heavy traffic conditions on the Pakem-Kaliurang KM 17-19 road section in Yogyakarta necessitate a pavement structural evaluation to ensure its design life and driving comfort. This study aims to analyze the performance of flexible pavement using the Bina Marga 2017 and Bina Marga 2024 methods, using a mechanistic-empirical approach supported by WinJULEA software.

The analysis focused on the existing condition and two alternative design improvements for each method, considering horizontal and vertical strains due to the design traffic load over a 20-year period. The study utilized secondary data obtained from the Yogyakarta Special Region Public Works, Housing, and Energy and Mineral Resources (PU-ESDM) Department, including pavement layer thickness, material properties, and traffic data.

The analysis indicates that the pavement condition of the Pakem-Kaliurang road section requires repair or strengthening of the base and subgrade layers to maintain optimal performance, as rutting and deformation occur much more rapidly. The best alternatives for Bina Marga 2017 are AC-WC, AC-BC, AC Base, and LFA Class A structures, while for Bina Marga 2024 are AC-WC, AC-BC, AC Base, and LFA Class A, B, and C. Both alternatives meet the 20-year design life with optimal performance against traffic loads. The results show that Bina Marga 2024 provides a higher damage resistance value than Bina Marga 2017. Therefore, this study recommends the use of the Bina Marga 2024 design alternative to increase the road life and performance in this section.

Keywords: Bina Marga 2017, Bina Marga 2024*, flexible pavement, and* WinJULEA.

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan raya merupakan salah satu kebutuhan penting yang digunakan masyarakat dalam kehidupan sehari-hari. Jalan raya digunakan masyarakat untuk menunjang kebutuhan aktivitas seperti penghubung banyak tempat, akses wisata serta penunjang aktivitas distribusi barang dan jasa. Peranan penting jalan menyangkut terhadap perkembangan antar wilayah, pemerataan hasil pembangunan serta pemantapan pertahanan dan keamanan dalam rangka mewujudkan pembangunan nasional. Untuk mewujudkan hal tersebut, maka dibutuhkannya peningkatan kualitas dari berbagai sisi terutama pada kualitas jalan.

Berdasarkan data proyeksi oleh Badan Pusat Statistika Provinsi Yogyakarta (2025) menyatakan bahwa Yogyakarta adalah salah satu kota besar yang memiliki luas wilayah 3,170.65 dengan total jumlah penduduk yang tercatat sebanyak 4,179.333 ribu jiwa. Yogyakarta menjadi salah satu kota dengan destinasi wisata terbanyak, hal ini menjadikannya sebagai salah satu kota dengan tingkat lalu lintas tinggi. Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta menyatakan bahwa salah satu kawasan dengan tingkat Lalu Lintas Harian (LHR) tertinggi terdapat pada ruas Jalan Pakem - Kaliurang.

Sekretariat Daerah Daerah Istimewa Yogyakarta (2023) menyatakan bahwa Ruas Jalan Pakem - Kaliurang merupakan jalan provinsi yang menjadi jalan utama menuju Daerah Wisata Kaliurang. Ruas Jalan Pakem – Kaliurang memiliki aktivitas penggunaan jalan yang tinggi. Namun, tingginya fungsi jalan tidak

selaras dengan kondisi jalan yang ada. Ariyanto dkk. (2021) menyatakan bahwa jumlah kendaraan dapat mempengaruhi kondisi aspal. Ruas jalan Pakem – Kaliurang tepatnya KM 17 – 19 telah di fungsikan sejak lama, sehingga terjadi penurunan tingkat pelayanan yang dapat dilihat secara visual yaitu seperti kerusakan jalan berupa retak, jalan berlubang, dan lainnya. Dengan berbagai kerusakan yang ada, maka akan mengganggu kenyaman serta membahayakan pengguna jalan. Dilihat dari berbagai kondisi jalan pada Ruas Jalan Pakem – Kaliurang maka perlu dilakukannya evaluasi terhadap kondisi jalan tersebut. Perkerasan jalan Pakem – Kaliurang akan mengalami pengurangan tebal perkerasan akibat kerusakan yang terjadi, sehingga sisa usia pelayanan akan diketahui.

Berdasarkan uraian di atas, maka perlu dilakukan evaluasi kondisi perkerasan jalan. Dari berbagai banyaknya metode penilaian kondisi perkerasan jalan, salah satu diantaranya yaitu dengan menggunakan metode Bina Marga. Metode Bina Marga merupakan salah satu penilaian kondisi jalan yang didasarkan pada urutan prioritas untuk mengetahui cara dalam menangani kerusakan jalan. Metode Bina Marga sudah beberapa kali mengalami revisi, yang dimulai dari Bina Marga 2013, kemudian 2017 yang diperbaharui menjadi Bina Marga 2024. Pada metode ini akan memerlukan input parameter berupa ketebalan eksisting perkerasan dan beban lalu lintas harian (LHR). Mengingat Bina Marga 2017 yang sudah diperbaharui menjadi Bina Marga 2024 maka akan dilakukan perbandingan diantara kedua metode tersebut.

Dengan membandingkan hasil analisis perkerasan menggunakan metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024, penelitian ini dapat memvalidasi perubahan dalam metodologi baru memberikan hasil yang signifikan. Hal ini penting dilakukan untuk memahami seberapa besar dampak pembaruan tersebut terhadap desain dan analisis perkerasan jalan. Pada penelitian ini bukan hanya untuk menerapkan Bina Marga 2024 saja, tetapi membandingkan hasilnya dengan berbagai metode seperti Bina Marga 2017 sebelumnya. Tanpa perbandingan, maka akan sulit mengukur manfaat atau perubahan yang dibawa oleh pedoman

baru. Perbandingan kemudian akan diverifikasi menggunakan metode mekanistik empiris dengan menggunakan *software* yang bernama WinJULEA

Setelah melakukan penilaian terhadap kondisi jalan, maka perlu dilakukan penerapan dengan metode mekanistik-empiris menggunakan *Software*. Berbagai macam *software* tersedia seperti KENPAVE, yang sebelumnya telah digunakan oleh Pambudi dan Fauziah (2021), Luh (2023), serta Kurniawan dan Hadi (2024) dan *software* WinJULEA yang sebelumnya juga telah digunakan oleh Rojas dan Sandoval (2020), Alaye dkk. (2023) dan Hernandez dkk. (2024). Pada penelitian ini *software* yang akan digunakan dalam evaluasi kondisi perkerasan jalan yaitu adalah *Software* WinJULEA. Menurut Adedeji dkk. (2024) *software* WinJULEA merupakan perangkat lunak yang dikembangkan di Amerika serikat untuk menganalisis lapisan perkerasan lentur. Perangkat ini dapat menghitung nilai tegangan, regangan serta defleksi yang diakibatkan oleh beban kendaraan (Elsa, 2022). Di Indonesia perkembangan penelitian yang menggunakan *Software* WinJULEA masih jarang ditemukan, sehingga penelitian ini sangat menarik untuk dilakukan karena analisis yang dapat dilakukan oleh perangkat ini tidak terbatas oleh jumlah lapis perkerasan, serta sistem penggunaan perangkat yang lebih sederhana. Harapannya, penggunaan *Software* WinJULEA dapat menjadi tolak ukur pemangku kebijakan dalam mengambil Keputusan. Berbagai macam metode ini digunakan untuk mempermudah analisis, lalu hasil perhitungannya akan dibandingkan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka didapatkan rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Bagaimana kondisi perkerasan jalan berdasarkan sisa umur pelayanan pada ruas Jalan Pakem – Kaliurang?
2. Bagaimana hasil evaluasi nilai regangan pada setiap lapis perkerasan jalan akibat beban lalu lintas yang dihitung menggunakan *Software* WinJULEA berdasarkan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024?

3. Berdasarkan ketentuan Bina Marga tahun 2017 dan Bina Marga 2024, perbaikan apa yang dapat dilakukan untuk mengatasi kerusakan di Jalan Pakem–Kaliurang?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang dihasilkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui kondisi perkerasan jalan yang didasarkan pada kerusakan permukaan pada ruas jalan Pakem – Kaliurang,
2. Mengetahui nilai respon tegangan dan regangan yang terjadi akibat beban lalu lintas menggunakan *Software* WinJULEA berdasarkan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024, dan
3. Menentukan upaya perbaikan perkerasan jalan berdasarkan hasil evaluasi kondisi perkerasan berdasarkan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024

1.4 Manfaat Penelitian

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh berbagai manfaat sebagaimana dijabarkan berikut ini.

1. Memberikan informasi terbaru terhadap kondisi kelayakaan perkerasan jalan saat ini,
2. Menambah alternatif penggunaan metode perhitungan tebal perkerasan jalan terbaru,
3. Memberikan wawasan mengenai metode baru analisis pekerasan menggunakan metode Bina Marga 2024,
4. Menambah pengetahuan serta informasi mengenai *Software* terbaru yaitu WinJULEA untuk menghitung tegangan dan regangan perkerasan jalan, dan
5. Memberikan masukan serta saran kepada pihak atau instansi terkait dalam pengelolaan dan pemeliharaan jalan nasional dalam menentukan teknik penanganan atau upaya perbaikan Ruas Jalan Pakem – Yogyakarta.

1.5 Batasan Penelitian

Adapun batasan penelitian yang akan dilakukan berdasarkan masalah yang ada yaitu sebagai berikut.

1. Lokasi penelitian berada pada ruas Jalan Pakem – Kaliurang tepatnya pada KM 17 – 19,
2. Perhitungan tebal perkerasan serta penentuan kondisi perkerasan jalan menggunakan metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024,
3. Perhitungan nilai tegangan dan regangan yang terjadi akibat beban lalu lintas menggunakan *software* WinJULEA
4. Perhitungan pada penelitian ini dilakukan berdasarkan ketentuan yang tercantum dalam pedoman Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) tanpa menggunakan perhitungan kondisi aktual dilapangan.
5. Data yang digunakan dalam analisis merupakan data sekunder terbaru yang diperoleh dari Bidang Bina Marga, Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta.
6.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Evaluasi Kondisi Perkerasan Jalan dengan Metode Bina Marga 2017

Dalam melakukan sebuah evaluasi kinerja perkerasan akan memerlukan panduan yang digunakan sebagai pedoman dasar dalam mengevaluasi. Bina Marga 2017 merupakan panduan yang berupa standar dari perencanaan dan pelaksanaan konstruksi yang diberlakukan di Indonesia (Priambudi dkk, 2024).

Menurut Lia dan Mahardi (2022), kegagalan dan kerusakan pada struktur perkerasan jalan disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah beban kendaraan yang melebihi kapasitas serta meningkatnya volume lalu lintas. Penelitian ini melakukan evaluasi dengan pendekatan mekanistik-empirik menggunakan perangkat lunak KENPAVE, serta merancang struktur perkerasan menggunakan tiga metode, yaitu AASHTO 1993, Analisis Komponen, dan Bina Marga 2017, untuk membandingkan kinerja dari masing-masing metode perkerasan. Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa retak lelah (*fatigue cracking*) teridentifikasi pada analisis menggunakan metode AASHTO 1993 dan Bina Marga 2017, sedangkan metode Analisis Komponen tidak menunjukkan adanya retak lelah. Sementara itu, retak alur (*rutting*) hanya muncul pada perhitungan dengan metode Bina Marga 2017, dan tidak terdeteksi pada dua metode lainnya. Selain itu, ketiga metode tersebut tidak menunjukkan adanya deformasi permanen (*permanent deformation*).

Pada ruas Jalan Sampang – Oben terjadi peningkatan jumlah kendaraan bermuatan berlebih yang membuat kerusakan lapisan pada jalan tersebut. Hollila dkk. (2023) melakukan studi pada ruas jalan tersebut untuk menentukan ketebalan lapisan perkerasan pada setiap permukaan menggunakan metode Bina Marga 2017, serta melakukan evaluasi kekuatan struktur jalan di tiap segmen dengan bantuan perangkat lunak KENPAVE. Hasil penelitian menunjukkan total ketebalan lapisan perkerasan pada masing-masing segmen adalah sebagai berikut:

I = 7 cm; II = 39 cm; III = 38,5 cm; IV = 37 cm; V = 38 cm; VI = 37 cm; VII = 38,5 cm. Berdasarkan hasil kontrol menggunakan aplikasi KENPAVE, segmen 1 hingga 6 tidak mampu menahan beban lalu lintas sebesar 4.113.298,39 ESAL, sedangkan segmen 7 dinyatakan mampu menahan beban tersebut. Salah satu solusi untuk mengatasi ketebalan perkerasan yang tidak memenuhi kapasitas beban lalu lintas adalah dengan melakukan penyesuaian dan pengujian kembali menggunakan KENPAVE. Dari proses tersebut diperoleh ketebalan perkerasan akhir pada masing-masing segmen sebagai berikut: I = 40,5 cm; II = 44 cm; III = 41,5 cm; IV = 40,5 cm; V = 41 cm; VI = 44 cm; VII = 39,5 cm.

Kasus serupa juga diteliti oleh Marlina dkk. (2023) dengan judul analisis tebal perkerasan lentur dengan metode Bina Marga dan program *KENPAVE.* Penelitian ini dilakukan pada ruas Jalan Pulau Indah, Oesapa Barat, Kota Kupang, Nusa Tenggara Timur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis besarnya nilai regangan pada lapisan perkerasan, khususnya nilai regangan vertikal *(vertical strain*) dan regangan utama horizontal (*horizontal principal strain*) pada lokasi yang diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daya dukung terhadap beban lalu lintas, yang ditunjukkan melalui nilai repetisi beban, jauh lebih tinggi ketika menggunakan metode Bina Marga 2017 dan metode Analisis Komponen dibandingkan dengan ketebalan perkerasan yang direncanakan semula. Semakin besar ketebalan lapisan perkerasan, maka regangan yang terjadi pada lapisan permukaan maupun yang diteruskan ke lapisan tanah dasar akan semakin kecil.

2.2 Evaluasi Kondisi Perkerasan Jalan dengan Metode Bina Marga 2024

Bina Marga 2024 merupakan pengembangan dari Bina Marga 2017 yang diperbaharui untuk menyesuaikan dengan perkembangan terhadap teknologi dan ketersediaan material. Bina Marga 2024 dibuat dengan menggunakan pendekatan mekanistik empirik untuk perkerasan lentur. Karena Bina Marga 2024 merupakan terbitan baru sehingga belum ditemukan penelitian yang menggunakan Bina Marga 2024.

Terdapat perbedaan terhadap Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024. Namun tidak banyak perubahan terhadap Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024.

Nilai VDF masing-masing jenis kendaraan pada berbagai golongan yang ada pada Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 merupakan letak perbedaan diantara keduanya.

2.3 Evaluasi Kondisi Perkerasan Jalan dengan *Software* WinJULEA

Dalam mengembangkan sebuah penelitian, biasanya membutuhkan bantuan *software* tambahan untuk membantu dalam mengontrol hasil penelitian. Pada penelitian ini akan menggunakan *software* WinJULEA. *Software* WinJULEA ini sendiri belum terlalu berkembang secara luas di Indonesia sehingga penelitian yang dilakukan di Indonesia belum banyak dilakukan.

Putri dkk. (2022) dalam penelitiannya yang berjudul pekerasan *stormpay* menggunakan beban roda yang berbeda melakukan penelitian dengan *software* berupa WinJULEA dan KENPAVE untuk mendapatkan nilai lendutan, tegangan dan regangan pada setiap lapis perkerasan. Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini yaitu bahwasannya total ESAL akan meningkat ketika terdapat kendaraan berat yang berada diatas lapisan perkerasan. Perkerasan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu perkerasan lentur, kaku dan pracetak stormpav. Dari ketiga jenis perkerasan yang digunakan, perkerasan pracetak *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.

Lu dan Hajj (2021) menyatakan bahwa penambalan perkerasan lentur merupakan salah satu metode penting dalam pemeliharaan. Permodelan sudah banyak dilakukan namun pemanfaatan permodelan belum dilakukan secara signifikan pada aplikasi pemeliharaan yang meningkatkan keselamatan, kualitas berkendara dan umur pakai perkerasan. Tujuan penelitian ini yaitu untuk memodelkan sifat viskoelastis perkerasan dan bahan penambal untuk menentukan pengaruh berbagai faktor perbaikan paa kinerja perkerasan lentur yang akan dibantu menggunakan *software* WinJULEA. *Software* WinJULEA menghasilkan 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.

2.4 Perbedaan Penelitian

Setiap penelitian tentunya memiliki karakteristik yang membedakannya dengan penelitian lain. Pada penelitian ini, terdapat beberapa perbedaan dibandingkan dengan studi sebelumnya, antara lain dari segi lokasi penelitian, metode yang digunakan, serta hasil yang diharapkan. Lokasi yang menjadi fokus penelitian adalah ruas Jalan Pakem – Kaliurang, tepatnya pada kilometer 17 hingga 19 di Sleman, Yogyakarta. Metode yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 untuk mengevaluasi kondisi perkerasan jalan berdasarkan tingkat kerusakan yang terjadi pada ruas tersebut, serta penggunaan *software* WinJULEA sebagai pendekatan mekanistik-empiris untuk memperoleh nilai tegangan dan regangan pada setiap lapisan perkerasan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk merumuskan solusi atau upaya perbaikan terhadap perkerasan jalan yang mengalami kerusakan. Perbandingan antara penelitian ini dengan beberapa penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini

Penelitian Terdahu							Penelitian Saat Ini
Nama Peneliti	Pambudi dan Fauziah	Lu dan Hajj	Zariah, dkk	Aji dan Susilo	Putri, dkk	Roja, dkk	Syafitri
Tahun	2021	2021	2023	2023	2022	2023	2025
Judul	Evaluasi Perancangan Strukttur Perkerasan Dengan Metode Bina Marga 2017 dan Program *KENPAVE* Menggunakan Pendekatan Elastik dan Viskoelastik	*Investigation of flexible pavement maintenance patching factors using a finite element model.*	Evaluasi Tebal Perkerasan Lentur dengan Metode Bina Marga 2017 Pada Ruas jalan Waibangga, Nusa Tenggara Timur (STA 0+000 – STA 10+000)	Evaluasi Tebal Perkerasan Jalan Menggunakan Program *Software* KENPAVE	*Stormpay Pavement Using Different Wheel Loads*	*Analysis of performance of asphalt pavements in Qatar using mechanistic-empirical approaches*	Penerapan Software Winjulea Sebagai Pendukung Analisis Perkerasan Pada Ruas Jalan Pakem-Kaliurang Km 17 - 19 Menggunakan Bina Marga 2017 Dan Bina Marga 2024
Lokasi	Simpang Pundu – Tumbang Samba		Ruas jalan Waibangga, Nusa Tenggara Timur	Ruas jalan Dekso – Tempel	Jalan Raya Pan Borneo	Qatar	Ruas Jalan Pakem – Kaliurang KM 17-19
Metode	1. Bina Marga 2017 2. Aplikasi *KENPAVE*	Penerapan permodelan menggunakan aplikasi *WinJULEA*	1. Bina Marga 2017	1. Bina Marga 2017 2. Aplikasi *KENPAVE*	1. Aplikasi *KENPAVE* 2. Aplikasi *WinJULEA*	1. Aplikasi *WinJULEA* 2. Aplikasi *Circly* 3. AASHTO	1. Bina Marga 2017 2. Bina Marga 2024 3. *Software* WinJULEA

Sumber: Pambudi dan Fauziah (2021), Lu dan Hajj (2021), Zariah dkk. (2023), Aji dan Susilo (2023), Putri dkk. (2022), Roja dkk. (2024), Syafitri (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Rekapitulasi Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini

Nama Peneliti	Pambudi dan Fauziah	Lu dan Hajj	Zariah, dkk	Aji dan Susilo	Putri, dkk	Roja, dkk	Syafitri
Tahun	2021	2021	2023	2023	2022	2022	2025
Hasil	Respon tegangan-regangan maksimum dari keempat desain yang telah dievaluasi menggunakan *KENPAVE*, didapatkan bahwa pendekatan elastik memiliki nilai tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan pendekatan viskoelastik	Didapatkan hasilnya yaitu menunjukkan pentingnya penambalan menggunakan metode semipermanen. Nilai regangan yang besar antara bagian yang ditambal dan bagian yang tidak ditambal, hal ini menunjukkan bahwa pentingnya menambal cacat pada perkerasan	Hasil perhitungan CESAL sebesar 567.545,90 atau setraa dengan 0,56 x CESA, dan didapatkan tebal lapis perkerasan lentur adalah HRS WC = 30 mm, HRS *Base* = 25 mm	Didapatkan dari hasil penelitian, perkerasan dapat menahan beban *fatique cracking*, namun tidak dapat menahan rusak akibat *rutting*. Berdasarkan Bina Marga 2017 didapatkan perkerasan baru ACWC 4 cm, AC-BC 6 cm, AC- agregat kelas A 15 cm. Untuk *overlay* Base 10 cm, CTB 15 cm dan lapisan mampu menahan beban kerusakan	Didapatkan hasil yaitu bahwasannya total ESAL akan meningkat ketika terdapat kendaraan berat yang berada diatas lapisan perkerasan. Perkerasan *StormPav* merupakan alternatif yang layak digunakan untuk perkerasan jalan, hal ini dikarenakan waktu yang lebih singkat dalam	Didapatkan bahwa lapisan kaku lebih rentan retak ketika aspal dibawahnya memiliki kekakuan yang jauh lebih sedikit. Penggunaan aspal campuran *Crumb Rubber* (CR) dapat mengurangi biaya material. Selain itu penggunaan campuran EME *(Enrobés à Module Elevé)* di lalu lintas padat akan lebih baik karena membantu mengurangi ketebalan lapisan dan mengurangi biaya.	Didapatkan alternatif perkerasan jalan terbaik pada ruas Jalan Pakem–Kaliurang menggunakan metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 serta mendapatkan nilai tegangan – regangan pada setiap lapis yang diperoleh dari *Software* WinJULEA

Sumber: Pambudi dan Fauziah (2021), Lu dan Hajj (2021), Zariah dkk. (2023), Aji dan Susilo (2023), Putri dkk. (2022), Roja dkk. (2024), Syafitri (2025)

Lanjutan Tabel 2.1 Rekapitulasi Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Penelitian Saat Ini

Nama Peneliti	Pambudi dan Fauziah	Lu dan Hajj	Zariah, dkk	Aji dan Susilo	Putri, dkk	Roja, dkk	Syafitri
Tahun	2021	2021	2023	2023	2022	2022	2025
		jalan untuk melindungi struktur dan permukaan perkerasan dari kerusakan yang lebih parah.		*fatique cracking,* tetapi tidak dapat menahan *rutting* dan *permanent deformation* dibandingkan dengan desain perkerasan baru.	proses konstruksi dan tidak terjadi banyak kerusakan ketika memiliki beban yang lebih berat.	Ambang batas alur yang digunakan dalam MEPD terlalu ketat untuk iklim Qatar	

Sumber: Pambudi dan Fauziah (2021), Lu dan Hajj (2021), Zariah dkk (2023), Aji dan Susilo (2023), Putri dkk (2022), Roja dkk (2024), Syafitri (2025)

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur adalah tipe perkerasan yang paling umum dipakai di Indonesia. Perkerasan ini biasanya diterapkan pada jalan dengan beban lalu lintas ringan sampai sedang, khususnya di area perkotaan. Adedeji dkk. (2022) menyebutkan bahwa terdapat keunggulan dari penggunaaan perkerasan lentur yaitu kebisingan ban yang rendah, permukaan yang halus dan jalan yang ramah lingkungan. Menurut Hakim dan Farida (2021) perkerasan lentur merupakan perkerasan yang memiliki beberapa lapis, yaitu diantaranya lapisan permukaan (campuran aspal), lapis pondasi (*base course*), lapis pondasi bawah (*subbase*) dan lapis tanah dasar (*subgrade*) yang telah dipadatkan dengan cara mekanis. Berikut Gambar 3.1 merupakan struktur lapis perkerasan lentur



Gambar 3.1 Susunan Lapis Perkerasan Lentur
Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Dalam pelaksanaannya, perkerasan lentur dapat didesain dan dievaluasi menggunakan beberapa metode, yaitu diantaranya metode Bina Marga 2017, AASHTO, PCI dan lain sebagainya.

3.2 Desain Tebal Perkerasan dengan Bina Marga 2017

Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2017 merupakan revisi dari Manual Desain Perkerasan Jalan tahun 2013 yang diterbitkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga. Manual ini memuat ketentuan teknis yang harus diikuti dalam pelaksanaan desain dan

perbaikan perkerasan jalan. Perencanaan jalan membutuhkan berbagai data serta tahapan agar dapat menghasilkan desain yang optimal secara teknis. Dalam proses penentuan desain perkerasan, diperlukan data lalu lintas, nilai CBR, umur rencana, faktor pertumbuhan lalu lintas kumulatif, faktor lajur rencana, *Vehicle Damage Factor* (VDF*),* perhitungan *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL), serta penentuan tipe dan ketebalan lapisan perkerasan.

3.2.1 Data Lalu Lintas

Dalam evaluasi struktur perkerasan, data Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR) menjadi salah satu parameter krusial untuk memperkirakan beban lalu lintas yang akan diterima perkerasan sepanjang umur rencana. Mengacu pada pedoman Bina Marga 2017, ketentuan mengenai umur rencana perkerasan baru disajikan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Umur Rencana Perkerasan Jalan Baru

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (tahun)
Perkerasan Lentur	Lapisan aspal dan lapisan berbutir	20
	Fondasi jalan	40
	Semua perkerasan untuk daeah yang tidak dimungkinkan pelapisan ulang (*overlay*), seprti jalan perkotaan, underpass, jembatan, terowongan	
	Cement Treated Base (CTB)	
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 (2017)

Data lalu lintas harian didapatkan dari umlah kendaraan yang melintasi satu titik dalam satu satuan waktu. Survei LHR mengacu pada Pedoman Survei Pencacahan Lalu Lintas (Pd T-19-2004-B) yang dilakukan secara manual atau menggunakan peralatan dengan pendekatan yang sama. Data yang diperoleh dari survei yang dilakukan kemudian dikonversi kedalam satuan kendaraan/hari menggunakan Persamaan 3.1 berikut.

(3.1)

3.2.2 Jenis Kendaraan

Berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017, beban gandar kendaraan penumpang, kendaraan ringan dan sedang terbilang kecil sehingga tidak menyebabkan kerusakan struktural yang signifikan. Namun kendaraan dengan jumlah roda 6 atau lebih memberikan efek kerusakan yang cukup banyak sehingga perlu diperhitungkan dalam analisis. Ketentuan jenis kendaraan ditunjukkan pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Klasifikasi Jenis Kendaraan

Jenis Kendaraan		**Uraian**
Klasifikasi Lama	**Alternatif**	
1	1	Sepeda motor
2,3,4	2,3,4	Sedan / angkot /pickup / stasion wagon
5A	5A	Bus kecil
5B	5B	Bus besar
6A.1	6.1	Truk 2 sumbu – cargo ringan
6A.2	6.2	Truk 2 sumbu -ringan
6B1.1	7.1	Truk 2 sumbu – cargo sedang
6B1.2	7.2	Truk 2 sumbu –sedang
6B2.1	8.1	Truk 2 sumbu – berat
6B2.2	8.2	Truk 2 sumbu – berat
7A.1	9.1	Truk 3 sumbu – ringan
7A.2	9.2	Truk 3 sumbu – sedang
7A.3	9.3	Truk 3 sumbu – berat
7B	10	Truk 2 sumbu dan trailer penarik 2 sumbu
7C1	11	Truk 4 sumbu -trailer
7C2.1	12	Truk 5 sumbu -trailer
7C2.2	13	Truk 5 sumbu -trailer
7C3	14	Truk 6 sumbu -trailer

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

3.2.3 Pemilihan Struktur Perkerasan

Dalam pemilihan jenis perkerasan didasarkan oleh beberapa hal seperti volume lalu lintas, umur rencana, dan kondisi fondasi jalan. Pelaksanaan teknis struktur perkerasan jalan berdasarkan Manual Desain Perkerasan jalan 2017 mempertimbangkan faktor biaya selama umur rencana, keterbatasan, serta kemudahan pelaksanaan. Berikut Tabel 3.3 terkait pemilihan struktur perkerasan jalan.

Tabel 3.3 Pemilihan Jenis Perkerasan

Struktur Perkerasan	**Bagan Desain**	**ESA (juta) dalam 20 tahun (Pangkat 4 kecuali ditentukan lain)**				
		0 – 0,50	**0,1 – 4**	**>4 - 10**	**>10 - 30**	**>30 - 200**
Perkerasan kaku dengan lalu lintas berat (di atas tanah dengan CBR ≥ 2,5%)	4	-	-	2	2	2
Perkerasan kaku dengan lalu lintas rendah (daerah pedesaan dan perkotaan)	4A	-	1,2	-	-	-
AC WC modifikasi atau SMA modifikasi dengan CTB (ESA pangkat 5)	3	-	-	-	2	2
AC dengan CTB (ESA pangkat 5)	3	-	-	-	2	2
AC tebal ≥ 100 mm dengan lapis fondasi berbutir (ESA pangkat 5)	3B	-	1,2	1,2	2	2
AC atau HRS tipis di atas lapis fondasi berbutir (ESA pangkat 5)	3A	-	1,2	-	-	-
Burda atau Burtu dengan LFA Kelas A atau batuan asli	5	3	3	-	-	-
Lapis *Fondasi Soil Cement*	6	1	1	-	-	-
Perkerasan tanpa penutup (Japat, jalan kerikil)	7	1	-	-	-	-

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Apabila jenis perkerasan sudah diketahui, maka tebal perkerasan dapat ditentukan dengan nilai CESA5. Desain tebal perkerasan dapat dilihat dalam Tabel 3.4 dan 3.5 berikut.

Tabel 3.4 Desain Perkerasan Lentur Opsi Biaya Minimum Dengan CTB

	F1	F2	F3	F4	F5
	Untuk lalu lintas di bawah 10 juta ESA5 lihat bagan desain 3A – 3B dan 3C	Lihat Bagan Desain 4 untuk alternatif perkerasan kaku			
Repetisi beban sumbu kumulatif 20 tahun pada lajur rencana (106 ESA5)	> 10 - 30	> 30 – 50	> 50 – 100	> 100 – 200	> 200 – 500
Jenis permukaan berpengikat	AC	AC			
Jenis lapis Fondasi	Cement Treated Base (CTB)				
AC WC	40	40	40	50	50
	60	60	60	60	60
AC BC atau AC Base	75	100	125	160	220
	150	150	150	150	150
Fondasi Agregat Kelas A	150	150	150	150	150

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Tabel 3.5 Desain Perkerasan Lentur – Aspal dengan Lapis Fondasi Berbutir

	STRUKTUR PERKERASAN							
	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8
Solusi yang dipilih				Lihat Catatan 2				
Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (ESA5)	< 2	≥ 2 - 7	> 7 - 10	> 10 - 20	> 20 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 200
KETEBALAN LAPIS PERKERASAN (mm)								
AC WC	40	40	40	40	40	40	40	40
	60	60	60	60	60	60	60	60
AC Base	0	80	105	145	160	80	210	245
LFA Kelas A	400	300	300	300	300	300	300	300
Catatan	1	2		3				

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

3.2.4 Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Faktor pertumbuhan lalu lintas (i) dipengaruhi oleh adanya perkembangan suatu daerah, misalnya perkembangan masyarakat dalam bidang ekonomi maupun kesejahteraan masyarakatnya. Dalam Manual Desain Perkerasan Jalan 2017 terdapat tabel faktor lajur pertumbuhan lalu lintas apabila tidak tersedia data pertumbuhan lalu lintas yang dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut ini.

Tabel 3.6 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 Rural	3,50	3,50	3,50	3,50
Jalan Desa	1,00	1,00	1,00	1,00

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Pertumbuhan lalu lintas dapat dihitung dengan Persamaan 3.2 seperti berikut

(3.2)

Dengan:

R = faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif,

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

UR = umur rencana (tahun).

Faktor pertumbuhan lalu lintas (i) ini dapat digunakan untuk memperkirakan nilai LHR dari tahun data pengamatan menuju tahun perencanaan dengan menggunakan Persamaan 3.3 berikut.

LHR_t (3.3)

Dengan:

LHR_0 = lalu lintas harian rata-rata pada tahun survei,

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

i = faktor laju pertumbuhan lalu lintas, dan

t = selisih tahun antara tahun rencana dan tahun survei.

3.2.5 Faktor Lajur Rencana

Berdasarkan Bina Marga (2017), lajur rencana adalah salah satu lajur lalu lintas dari suatu ruas jalan yang menerima beban lalu lintas kendaraan paling besar. Beban lalu lintas pada lajur rencana dinyatakan dalam kumulatif beban gandar standar (ESA) dengan tetap mempertimbangkan faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL). Umumnya, pada jalan dua arah digunakan 0,50 untuk faktor distribusi arah (DD) kecuali pada lokasi dengan jumlah -kendaraan niaga yang lebih tinggi pada arah tertentu. Beban desain pada setiap lajur tidak boleh melewati kapasitas lajur selama umur rencana yang telah ditentukan. Tabel 3.7 berikut akan menjelaskan terkait dengan faktor distribusi lajur (DL).

Tabel 3.7 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 (2017)

3.2.6 Faktor Ekivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*)

Ottu dkk (2023) menyebutkan bahwa VDF merupakan faktor beban yang telah dikonversi ke beban standar (ESA). Nilai VDF suatu kendaraan merupakan jumlah nilai beban ESA dari seluruh kelompok sumbu kendaraan tersebut. Nilai VDF dapat mengukur kerusakan yang disebabkan oleh kendaraan. Nilai VDF pada Bina Marga 2017 terbagi menjadi VDF4 yang didasarkan pada ESA4 dan VDF5 yang didasarkan pada ESA5. ESA4 digunakan untuk desain perkerasan dengan umur rencana 20 tahun dan kurang dari 4 juta ESA. Sedangkan ESA5 digunakan untuk desain perkerasan dengan umur rencana 20 tahun dan lebih dari 4 juta ESA. Dengan adanya nilai VDF, beban lalu lintas dari berbagai jenis kendaraan dengan berbagai beban sumbu dan konfigurasi dapat dikonversi menjadi total beban. Nilai VDF didapatkan dari survei atau menggunakan Tabel 3.8 berikut.

Tabel 3.8 Nilai VDF Masing – Masing Jenis Kendaraan Niaga

Jenis Kendaraan	Sumatera				Jawa				Kalimantan				Sulawesi				Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua			
	Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal	
	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5
5B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
6A	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
6B	4,5	7,4	3,4	4,6	5,3	9,2	4,0	5,1	4,8	8,5	3,4	4,7	4,9	9,0	2,9	4,0	3,0	4,0	2,5	3,0
7A1	10,1	18,4	5,4	7,4	8,2	14,4	4,7	6,4	9,9	18,3	4,1	5,3	7,2	11,4	4,9	6,7	-	-	-	-
7A2	10,5	20,0	4,3	5,6	10,2	19,0	4,3	5,6	9,6	17,7	4,2	5,4	9,4	19,1	3,8	4,8	4,9	9,7	3,9	6,0
7B1	-	-	-	-	11,8	18,2	9,4	13,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7B2	-	-	-	-	13,7	21,8	12,6	17,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7C1	15,9	29,5	7,0	9,6	11,0	19,8	7,4	9,7	11,7	20,4	7,0	10,2	13,2	25,5	6,5	8,8	8,0	11,9	6,5	8,8
7C2A	19.8	39.0	6,1	8,1	17,7	33,0	7,6	10,2	8,2	14,7	4,0	5,2	20,2	42,0	6,6	8,5	-	-	-	-
7C2B	20,7	42,8	6,1	8,0	13,4	24,2	6,5	8,5	-	-	-	-	17,0	28,8	9,3	13,5	-	-	-	-
7C3	24,1	51,7	6,4	8,0	18,1	34,4	6,1	7,7	13,5	22,9	9,8	15,0	28,7	59,6	6,9	8,8	-	-	-	-

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

3.2.7 Beban Sumbu Standar Kumulatif

Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESAL) atau Beban Sumbu Standar Kumulatif adalah total beban sumbu kendaraan yang melintasi jalur desain sepanjang umur rencana. Sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam Bina Marga 2017, perhitungan nilai CESAL dilakukan menggunakan Persamaan 3.4 berikut

(3.4)

3.3 Desain Tebal Perkerasan dengan Bina Marga 2024

Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 No. 03/M/BM/2024 atau Bina Marga 2024 menggantikan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017 atau Bina Marga 2017 untuk menyelaraskan Bina Marga dengan beberapa pedoman teknis dan spesifikasi teknis terbaru serta perkembangan teknologi dan ketersediaan material. Manual Desain Perkerasan Jalan mengacu pada metode AASHTO 1993 dan Austroads AGPT02-2017 untuk perhitungan ekuivalen beban sumbu, serta menggunakan pendekatan mekanistik empiris untuk perancangan perkerasan lentur.

Tidak banyak perbedaan yang terdapat dalam Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024. Pada Bina Marga 2024 beberapa bagian dijelaskan lebih detail, sehingga proses pelaksanaan dapat dilaksanakan dengan semaksimal mungkin. Beberapa perbedaan antara Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 yaitu terletak pada pemilihan struktur perkerasan, jenis kendaraan, dan nilai *Vehicle Damage Factor* (VDF).

3.3.1 Pemilihan Jenis Perkerasan

Pada bagian pemilihan jenis perkerasn terdapat perbedaan yang signifikan pada bagian struktur perkerasan yang terdapat penambahan, bagan desain dan jumlah ESA5 dalam rentang waktu umur rencana. Dalam pemilihan desain harus didasarkan pada *discounted lifecycle cost* terendah. Pemilihan jenis perkerasan dinyatakan pada Tabel 3.9 berikut ini

Tabel 3.9 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	-	-	-
AC/HRS dengan lapis fondasi *Soil Cement*	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)

Setelah diketahui jenis perkerasan yang akan digunakan, maka desain perkerasan lenturnya dapat dilihat pada Tabel 3.10 dan Tabel 3.11 berikut.

Tabel 3.10 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					
Beban rencana 20 tahun (106 ESA5)	> 1 - 6	> 6 - 10	> 10 - 20	>20 - 30	> 30 - 40	> 40 - 50	> 50 - 80	> 80 - 100	> 100 - 150	> 150 - 200
Jenis permukaan berpengikat	AC									
Jenis lapis fondasi	*Cement Treated Base* (CTB)									
Tebal Perkerasan (mm)										
AC WC	40	40	40	40	40	40	40	50	40	40
AC BC	60	5	80	65	60	60	80	80	60	60
	-	-	-	70	-	-	-	-	-	-
AC Base	-	-	-	-	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	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

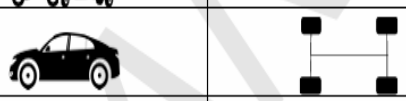
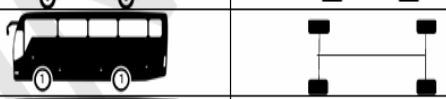
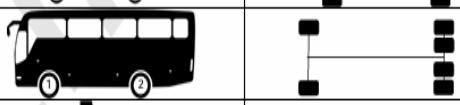
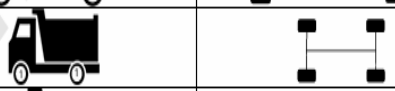
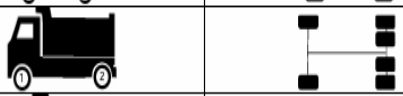
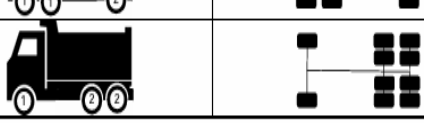
Tabel 3.11 Desain Perkerasan Lentur – Aspal dengan Lapis Fondasi Agregat (Aspal Pen 60/70 dan PG70)

	STRUKTUR PERKERASAN								
	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8	FFF9
	Untuk beban rencana < 30 juta ESA5 menggunakan Aspal Pen 60-70					Untuk beban rencana ≥ 30 juta ESA5 direkomendasikan menggunakan Aspal PG70			
Beban rencana 20 tahun (ESA5)	< 2	≥ 2 - 5	> 5 - 10	> 10 - 15	> 15 - 30	> 30 - 50	> 50 - 100	> 100 - 150	> 150 - 200
Tebal Perkerasan (mm)									
AC WC	60	40	40	40	40	40	40	50	40
AC BC	-	65	75	75	60	60	75	80	60
	-	80	80	-	-	-	-	-	-
AC Base	-	-	-	100	80	85	100	100	80
	-	-	-	-	80	100	100	100	80
	-	-	-	-	-	-	-	-	90
Lapis Fondasi Agregat Kelas A	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	-	200	200	200	200	200	200	200	200

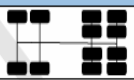
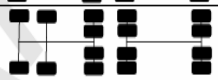
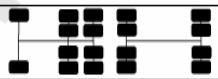
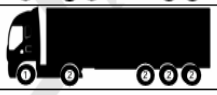
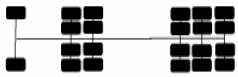
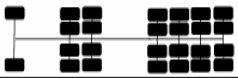
Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

3.3.2 Jenis Kendaraan

Pada dasarnya Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 untuk jenis kendaraan yang digunakan sama namun terdapat penambahan klasifikasi 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 Gambar 3.2 berikut.

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

Gambar 3.2 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan
Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok sumbu	Skema Konfigurasi	Klasifikasi Kendaraan
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				

Lanjutan Gambar 3.2 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan
Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

3.3.3 Faktor Ekivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*)

Nilai VDF merupakan faktor penting dalam proses evaluasi kerusakan jalan, yang mana nilai VDF dapat mengukur kerusakan yang disebabkan oleh kendaraan pada perkerasan jalan. Dengan adanya nilai VDF maka beban ekivalen yang dihasilkan oleh kendaraan akan mudah diketahui. Sehingga Tingkat kerusakan perkerasan jalan dapat dievaluasi dengan akurat.

Pada manual Desain Perkerasan Jalan 2024, VDF pada masing-masing kelas kendaraan dan setiap daerah diuraikan secara lebih rinci dibandingkan dengan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017. Pada studi kasus ruas jalan Pakem – Kaliurang dapat menggunakan *Vehicle Damage Factor* (VDF) Daerah Istimewa Yogyakarta yang terdapat pada Tabel 3.12 berikut.

Tabel 3.12 Nilai 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)

3.4 *Software* WinJULEA

WinJULEA merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mendapatkan nilai lendutan, tegangan, dan regangan pada setiap lapisan perkerasan. WinJULEA dapat merespon regangan yang berada diatas dasar agregat dan lapisan tanah dasar alami akibat lalu lintas kendaraan. Dari banyaknya program perangkat lunak yang dapat membantu menganalisis dan mengevaluasi perkerasan jalan, WinJULEA merupakan salah satu perangkat lunak yang belum banyak digunakan, sehingga penelitian terkait WinJULEA belum banyak ditemukan.

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (2018) menyatakan bahwa WinJULEA termasuk dalam program perangkat lunak PCASE yang merupakan modul analisis elastis linier untuk struktur berlapis yang mampu mengevaluasi pengaruh beban ban dan lebar pada perkerasan. Prinsip kerja WinJULEA yaitu dimana struktur perkerasan terdiri atas beberapa lapisan elastis yang saling menahan. Sifat isotropik dengan modul elastisitas dan *poisson's ratio* tertentu dimiliki oleh setiap lapisan.

Dalam pengoperasian *Software* WinJULEA terdapat beberapa parameter penting yang digunakan, sehingga dapat meghasilkan perhitungan respons struktur perkerasan secara spesifik berdasarkan kondisi nyata. Beberapa parameternya yaitu sebagai berikut:

1. *Layers* (Lapisan)

   Pada bagian *layers* digunakan untuk menentukan jumlah lapisan dan properti material pada setiap lapisan (modulus elastisitas, *poisson's ratio*, ketebalan).

2. *Loads* (Beban)

   Parameter *loads* digunakan untuk menentukan besaran beban kendaraan, distribusi dan jenis ban (normal atau *wide-base*).

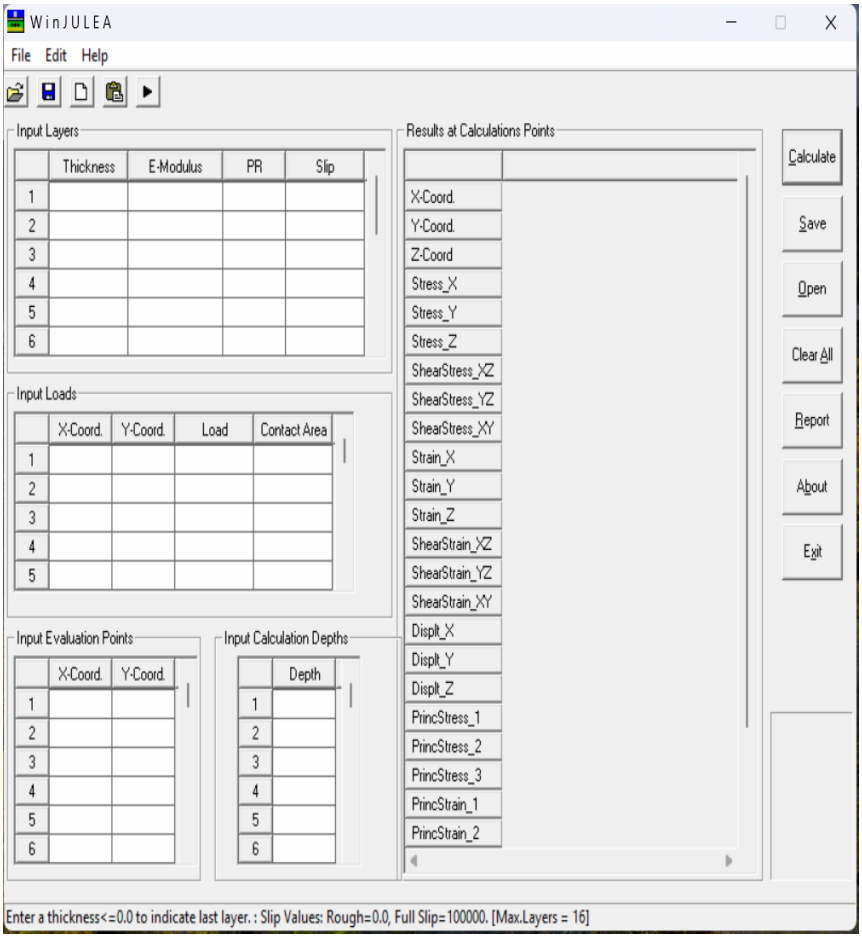
3. *Calculation Depth* (Kedalaman Perhitungan)

   Parameter ini digunakan untuk menentukan kedalaman vertical hingga yang mana tegangan, regangan dan lendutan yang akan dihitung.

4. *Calculation Points* (Titik Perhitungan)

   Parameter ini merupakan titik didalam lapisan tempat hasil dari tegangan, regangan dan lendutan dievaluasi.

Tampilan utama dari *software* WinJULEA yang memudahkan penggunanya dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Tampilan Awal *Software* WinJULEA
Sumber: *Software* WinJULEA (2025)

3.4.1 *Input Layers*

Dalam penggunaan *Software* 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 dari masing-masing lapisan perkerasan jalan wajib dimasukkan secara akurat ke dalam bagian input layer pada saat proses analisis dilakukan menggunakan *software* WinJULEA**.** Penginputan nilai ketebalan ini harus mengikuti satuan ukuran yang telah ditentukan, yaitu dapat menggunakan satuan milimeter (mm) maupun inci (inch)**,** sesuai dengan spesifikasi teknis yang berlaku. Adapun untuk lapisan perkerasan

paling bawah atau lapisan terakhir, sistem memungkinkan nilai ketebalan yang dimasukkan berupa nol (0) atau bahkan negatif**.**

Data atau informasi mengenai ketebalan setiap lapisan tersebut diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral Daerah Istimewa Yogyakarta (PUPR DIY)

2. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas, yang juga dikenal sebagai *Modulus Young* (E), merupakan rasio antara tegangan dan regangan pada suatu material. Menurut Ariawan, dkk (2021) modulus elastisitas diperlukan untuk menghasilkan suatu regangan yang juga dipengaruhi oleh sifat bahan yang menerima tegangan tersebut. Sebagian besar material yang digunakan dalam konstruksi perkerasan memiliki sifat elastis, artinya material tersebut mampu mengalami deformasi sementara ketika dikenai beban tarik maupun tekan, namun akan kembali ke bentuk semula setelah beban tersebut dihilangkan. Sifat elastis ini memungkinkan bahan-bahan tersebut untuk menyesuaikan diri terhadap tekanan lalu lintas tanpa mengalami kerusakan permanen.

Angka modulus elastisitas yang didapatkan dari Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 memiliki perbedaan, sehingga dapat dilihat pada Tabel 3.13 dan Tabel 3.14 berikut.

Tabel 3.13 Nilai Modulus Elastis Bina Marga 2017

Jenis Bahan	Modulus Tipikal (MPa)
HRS WC	800
HRS BC	900
AC WC	1100
AC BC (lapis atas)	1200
AC Base atau AC BC (sebagai base)	1600

Bahan bersemen (CTB)	500 MPa retak *(post cracking)*
Tanah dasar (disesuaikan musim)	10 x CBR

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Tabel 3.14 Nilai Modulus Elastis 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 *(pre cracking)*
Bahan bersemen (CTB)	500 MPa retak *(post cracking)*
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 (juga disebut regangan longitudinal) dan regangan vertikal (juga dikenal sebagai regangan lateral) yang disebabkan oleh beban sumbu sejajar dan regangan aksial. Suatu material akan mengalami perubahan bentuk apabila diberikan gaya satu arah, ditarik ataupun ditekan. Besarnya nilai Rasio Poisson sangat dipengaruhi oleh sifat kekakuan material. Material yang bersifat kaku cenderung memiliki nilai *Poisson's Ratio* yang rendah karena deformasi lateralnya relatif kecil. Sebaliknya, jika material memiliki karakteristik yang lebih lunak atau fleksibel, maka nilai *Poisson's Ratio*

yang dihasilkan akan cenderung lebih tinggi, karena perubahan bentuk lateralnya menjadi lebih signifikan saat mengalami pembebanan.

Nilai *Poisson's Ratio* yang digunakan dalam kasus ini yaitu sesuai dengan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 yang tertera pada Tabel 3.15 dan Tabel 3.16 berikut.

Tabel 3.15 Nilai *Poisson's Ratio* Bina Marga 2017

Jenis Bahan	Modulus Tipikal (MPa)
HRS WC	0,40
HRS BC	
AC WC	
AC BC (lapis atas)	
AC Base atau AC BC (sebagai base)	
Bahan bersemen (CTB)	0,20 (mulus) 0,35 (retak)
Tanah dasar (disesuaikan musim)	0,45 (tanah kohesif)
	0,35 (tanah non kohesif)

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Tabel 3.16 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 (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 *Software* WinJULEA, terdapat instruksi pada halaman utama yaitu untuk memasukan 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.*

3.4.2 *Input Loads*

Input loads merupakan bagian penting dalam penggunaan WinJULEA yang akan menentukan tegangan, regangan serta defleksi yang tersebar ke dalam struktur perkerasan. *Input loads* merupakan data gaya (beban) yang diberikan oleh roda kendaraan pada permukaan jalan. Terdapat beberapa komponen yang ada didalam *input loads*, diantaranya yaitu.

1. *X-Coord*

   X-Coord merupakan posisi beban dalam arah horizontal X pada permukaan perkerasan yang ditulis dala satuan inci atau mm yang bergantung pada pengaturan satuan yang digunakan. *X-Coord* digunakan untuk menentukan titik masuk beban pada permodelan

2. *Y-Coord*

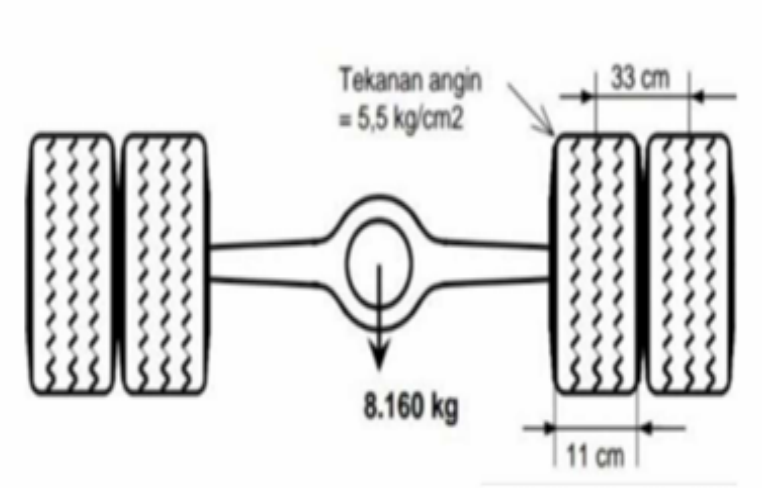
   Y-Coord merupakan posisi beban dalam arah horizontal Y yang ditulis dalam satuan inci atau mm. Kombinasi *X-Coord* dan *Y-Coord* dapat menentukan Lokasi pusat kontak roda terhdapat permukaan jalan, yang aka memepengaruhi ditsribusi tegangan dibawah lapisan perkerasan

3. *Load*

   Load atau beban merupakan besar gaya vertikal yang dihasilkan dari roda kendaraan pada perkerasan dalam satuan *Newton* (N). Besarnya nilai beban menjadi parameter utaman karena akan mempengaruhi tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan.

4. *Contact Area*

   Contact area merupakan luas kontak antara ban dan permukaan perkerasan, tidak dihitung secara langsung namun dihitung berdasarkan beban roda dan tekanan kontak yang bekerja antara ban dan permukaan jalan. Biasanya satuan yang digunakan yaitu atau . Gambar 3.4 berikut ini merupakan konfigurasi beban sumbu standar.



Gambar 3.4 Konfigurasi Beban Sumbu Standar
Sumber: Sukirman (2010)

Pada Gambar 3.4 terlihat bahwa jarak antar roda ban ganda sebesar 33 cm. Beban total pada *Single Axle Dual Tier* (SADT) ini adalah 8.160 kg. Setiap ban akan mendapatkan nilai beban standar sebesar 20 Kn dan nilai tekanan

ban akan menggunakan beban standar sebesar 550 kPa atau setara dengan 0,055 Kn/cm2. Apabila sudah diketahui nilai beban pada setiap ban, maka perhitungan *contact area* dapat dilakukan. *Contact area* akan mempengaruhi distribusi tekanan pada perkerasan. Apabila *contact area* semakin besar maka akan semakin tersebar gaya pada lapisan bawah, sehingga akan megurangi deformasi lokal. Perhitungan *contact area* dapat dilakukan menggunakan Persamaan 3.5 berikut.

A = (3.5)

dengan:

A = luas kontak ban (cm^2),
W = beban roda (Kn), dan
P = tekanan ban (kN/cm2).

Penginputan data *loads* pada *software* WinJULEA yang benar akan menghasilkan hasil perhitungan yang lebih akurat, seperti memprediksi deformasi, regangan, dan tegangan pada setiap titik yang akan di ukur.

3.4.3 *Input Evaluation Points*

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

1. Kebutuhan desain (misalnya untuk mengevaluasi teganan didasar 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 dipermukaan (untuk defleksi total).

3.4.4 *Input Calculation Depth*

Calculation depth tidak digunakan untuk menentukan titik evaluasi tertentu, melainkan sebagai batas kedalaman maksimum struktur perkerasan yang akan dianalisis dalam proses perhitungan. Nilai ini dinyatakan dalam satuan inci (*inch*) atau meter, tergantung pada sistem satuan yang digunakan dalam analisis.

Penentuan *calculation depth* memiliki peran penting dalam proses perancangan struktur perkerasan, karena secara langsung dapat memengaruhi akurasi dan efisiensi hasil analisis. Jika nilai *calculation depth* yang ditetapkan terlalu dangkal, maka regangan atau deformasi yang terjadi pada lapisan subgrade bagian bawah tidak akan terdeteksi, padahal informasi tersebut sangat krusial dalam perhitungan rutting atau penurunan permanen pada jalur roda. Sebaliknya, jika nilai *calculation depth* ditentukan terlalu dalam, meskipun tidak secara signifikan memengaruhi ketepatan hasil analisis, hal ini dapat menyebabkan proses komputasi menjadi lebih lambat. Dengan demikian, pemilihan nilai *calculation depth* yang tepat menjadi aspek yang perlu dipertimbangkan secara cermat dalam desain struktur perkerasan.

3.4.5 *Result At Calculations Points*

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

1. *Coord X, Y dan Z*

   Titik koordinat ini merupakan posisi titik dalam arah horizontal (X dan Y), dan kedalam dari permukaan arah vertikal kebawah (Z). koodinat ini digunakan untuk menandai lokasi titik evaluasi.

2. *Stress* X, Y dan Z

   Nilai tegangan arah horizontal (X dan Y), dan tegangan arah vertikla (Z). Nilai *stress* Z digunakan untuk evaluasi tekanan ke tanah dasar (subgrade) yang akan digunakan sebagai parameter dalam menilai kapasitas dukung perkerasan.

3. *Shear Stress* XZ, YZ dan XY

   Nilai tegangan geser dibidang X-Z, Y-Z dan X-Y. Nilai ini digunakan untuk mengetahui kemungkinan terjadinya deformasi geser antar lapisan, serta memprediksi kegagalan geser lokal.

4. *Strain* X, Y dan Z

   Nilai regangan arah X, Y dan Z. Nilai strain Z digunakan untuk evaluasi regangan vertical (*rutting*). Regangan merupakan perubahan Panjang relative terhadapat panjang awal akibat dari gaya yang bekerja.

5. *Shear Strain* XZ, YZ dan XY

   Nilai regangan geser dibidang XZ, YZ dan XY. Nilai ini digunakan untuk mengetahui nilai deformasi geser pada setiap lapisan, beserta interaksi antar lapisannya akibat beban lalu lintas.

6. *Displacement* X, Y dan Z

   Perpindahan (defleksi) titik dalam arah X, Y dan perpindahan titik arah vertikal (defleksi kebawah). Nilai ini menunjukkan seberapa jauh titik yang diamati bergeser akibat beban.

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

   Nilai tegangan utama maksimum, menengah dan minimum dari tegangan normal yang dialami tanpa adanya tegangan geser. Nilai tegangan ini merupakan nilai tegangan utama yang dialami oleh material perkerasan pada titik tertentu yang didapatkan dari kombinasi tegangan normal dan tegangan geser pada titik tersebut. Tegangan ini diukur pada arah dimana tegangan geser bernilai nol.

   a. Nilai *Princ stress* 1: Nilai tegangan utama maksium ini akan menunjukan besarmya tegangan tarik atau tekan terbesar. Pada princ stress 1 akan menilai risiko retak tarik (*tensile cracking*) serta potensi kegagalan material akibat beban berlebih

   b. Nilai *Princ stress* 2: Nilai tegangan utama menengah ini akan digunakan untuk referensi pada distribusi tegangan dalam sebuah material. Nilai ini akan digunakan untuk analisa perilaku *multi-axial* material serta distribusi tegangan antar lapis.

c. Nilai *Princ stress* 3: Nilai tegangan utama minimum yang merupakan nillai tegangan tekan terbesar dalam kondisi kompresi. Yang akan digunakan untuk evaluasi potensi terjadinya retak tekan atau deformasi permanen dilapisan bawah permukaan, dan 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*), untuk lapisan permukaan, *Princ Strain* 2 akan mencerminkan regangan menengah yang aka digunakan sebagai referensi tambahan ketika menilai distribusi regangan secara keseluruhan. *Princ Strain* 3 untuk analisis retak tekan (*bottom-up cracking*). *Princ Strain* 1,2, dan 3 digunakan untuk memprediksi kegagalan structural perkerasan dan merencanakan strategi pemeliharaan.

9. *Max Shear*

   Nilai tegangan geser maksimum yang digunakan untuk cek kegagalan geser antar lapisan yang akan menjadi parameter penting dalam evaluasi stabilitas structural.

10. *Oct Norm Stress*

    Nilai tegangan *octahedral (Octahedral Normal Stress)*, rata-rata 3 tegangan utama. Nilai ini digunakan dalam tegangan *multi-axial* untuk evaluasi keamanan struktur perkerasan terhadap deformasi dan retak.

11. *Oct Shear Stress*

    Tegangan geser *oktahedral (Octahedral Shear* Stress*),* digunakan dalam teori kegagalan. Nilai ini digunakan untuk menilai kemungkinan adanya retak atau kegagalan material terutama berdasarkan distribusi tegangan pada seluruh lapisan.

Nilai- nilai yang dihasilkan dapat digunakan sebagai informasi untuk menilai keamanan dan kinerja struktur perkerasan, menentukan titik lemah, serta digunakan untuk merancang tebal lapis perkerasan sesuai dengan standar yang ada seperti AASHTO, Bina Marga dan lain sebagainya.

3.4.6 *Output* WinJULEA

Output yang dihasilkan oleh Software WinJULEA akan menghasilkan nilai regangan horizontal dan regangan vertikal. Nilai yang dihasilkan akan mempengaruhi kontrol repitisi beban kendaraan. Kontrol repitisi beban ini merupakan frekuensi ataupun jumlah pengulangan beban lalu lintas yang bekerja pada perkerasan selama umur rencana. Kontrol repitisi beban kendaraan dilakukan untuk memastikan daya tahan struktural jalan terhadap jumlah lintasan selama umur rencana. Kontrol repitisi beban dilakukan berdasarkan jenis kerusakan yaitu Nf (*Fatigue cracking*), Nr (*Rutting*), Nd (*Permanent Deformation*).

1. Kontrol Nf ((*Fatigue cracking*)

   Nilai Nf didasarkan pada hubungan antara regangan tarik horizontal di dasar lapisan aspal dan jumlah siklus beban yang menyebabkan kerusakan fatigue. Jika nilai Nf yang dihasilkan besar, maka nilai tegangan tariknya akan kecil, sehingga umur layanan akan meningkat. Perhitungan nilai Nf dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.6 berikut.

   (3.6)

2. Kontrol Nr (*Rutting*)

   Kontrol Nr terjadi karena kerusakan permukaan jalan yang disebabkan oleh tekanan berulang dari beban lalu lintas berat yang memampatkan lapisan perkerasan atau lapisan tanah dasar dibawahnya. Nilai Nr berhubungan dengan *rutting*, apabila nilai Nr semakin kecil maka peluang terjadinya *rutting* akan semakin kecil pula, sehingga umur pelayanan akan meningkat. Berikut Persamaan 3.7 merupakan persamaan yang akan digunakan untuk menghitung nilai Nr.

   (3.7)

3. Kontrol Nd (*Permanent Deformation*)

   Permanent Deformation timbul karena beban lalu lintas yang berulang sehingga menghasilkan regangan atau deformasi tekan di permukaan tanah dasar. Apabila nilai Nd memiliki angka yang tinggi, maka

perkerasan dianggap tahan terhadap deformasi. Berikut Persamaan 3.8 merupakan persamaan nilai Nd.

(3.8)

Dengan dilakukan kontrol repitisi beban maka dapat diperkirakan umur layanan jalan secara lebih akurat dan mencegah performa jalan yang signifikan.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, metode penelitian yang digunakan pada ruas Jalan Pakem – Kaliurang KM 17 – 19 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 Pengumpulan Data

Dalam pelaksanaan suatu penelitian, keberadaan data pendukung sangat diperlukan sebagai dasar untuk menjawab rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya. Pada penelitian ini, jenis data yang digunakan adalah data sekunder, yaitu data yang telah tersedia sebelumnya dan bukan dikumpulkan secara langsung oleh peneliti. Data tersebut diperoleh dari sumber-sumber resmi yang telah mendokumentasikannya dalam bentuk laporan, catatan, atau arsip yang tersusun secara sistematis. Salah satu instansi yang menyediakan data tersebut adalah Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta. Selain itu, data sekunder juga dapat diakses melalui lembaga pemerintah lainnya, perusahaan terkait, maupun institusi akademik seperti perpustakaan.

Adapun data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan dari Dinas PU 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 eksisting

4.3 Lokasi Studi Kasus

Lokasi yang dipilih untuk penelitian ini terletak sepanjang 2 KM pada ruas Jalan Pakem – Kaliurang KM 17 – 19 Daerah Istimewa Yogyakarta. Berikut adalah peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Lokasi Penelitian
Sumber: QGIS (2025)

Dengan kondisi yang sudah ada, adapun data terkait lokasi penelitian yang didapatkan dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta. Sebagai berikut.

Tabel 4.1 Data Kondisi Ruas Jalan Pakem-Kaliurang KM 17 - 19

Parameter	Data Kondisi Ruas Jalan
Status Jalan	Jalan Kolektor Primer
Tipe Perkerasan	Perkerasan Lentur
Panjang Jalan Yang Diteliti	2 KM
Lebar Jalan	8 Meter

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

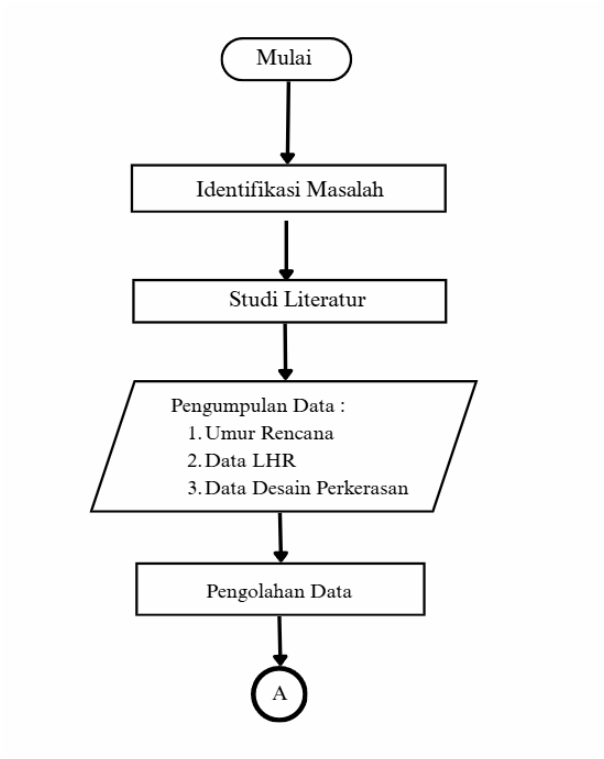
4.4 Tahapan Penelitian

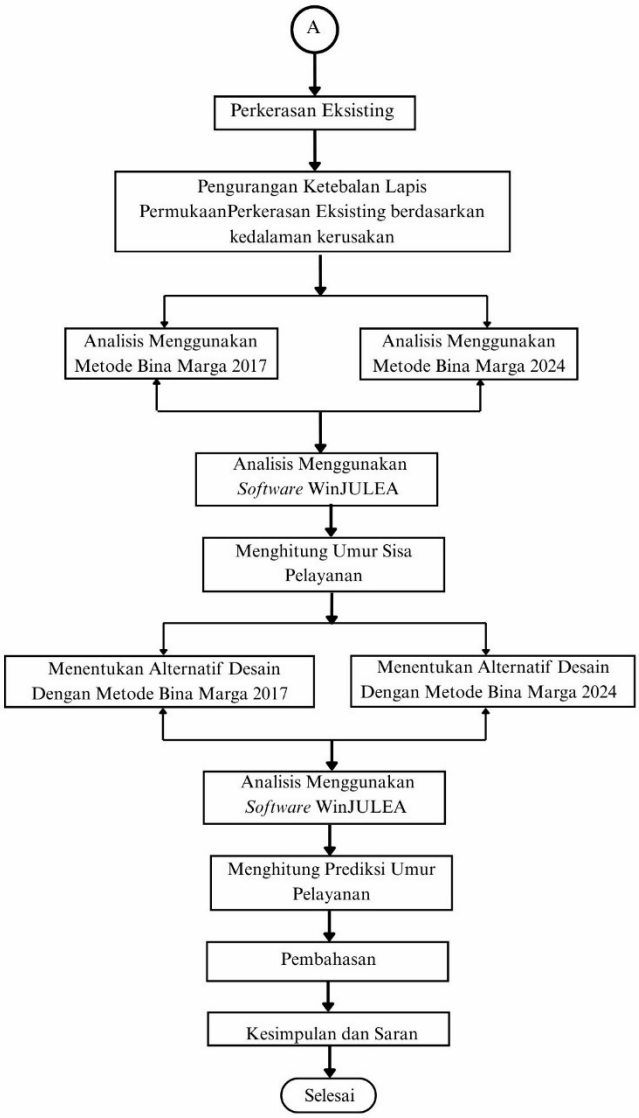
Tahapan penelitian dapat dilakukan apabila data pendukung telah didapatkan. Data yang telah diperoleh kemudian dibandingkan diantara metode-metode yang digunakan yaitu Bina Marga 2017, Bina Marga 2024, dibantu dengan *software* WinJULEA. Berikut tahapan analisis dan pengolahan datanya.

1. Pengumpulan data dari pihak terkait yaitu Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta.
2. Melakukan pengolahan data dan perbandingan analisis berdasarkan metode Bina Marga 2017, Bina Marga 2024, dan diverifikasi menggunakan *software* WinJULEA dengan data dan kondisi yang sama.
3. Hasil analisis yang didapatkan kemudian dibandingkan tebal lapis perkerasannya pada kondisi normal dan kondisi ekstrim (minimum).
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.

4.5 Bagan Alir Penelitian

Pada Gambar 4.2 merupakan bagan alir penelitian yang akan dilakuan agar proses penelitian ini dapat berjalan dengan baik.


Mulai
Identifikasi Masalah
Studi Literatur
Pengumpulan Data :
1. Umur Rencana
2. Data LHR
3. Data Desain Perkerasan
Pengolahan Data
A



Gambar 4.2 Bagan Alir Penelitian

4.6 Analisis Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan analisis metode perancangan menggunakan pedoman Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 sebagai acuan utama dalam penentuan ketebalan lapisan perkerasan beserta dengan spesifikasi material. Untuk memudahkan perhitungan serta verifikasi dan evaluasi kinerja pekerasan jalan akan menggunakan *software* Microsoft Excel, dan WinJULEA, Hasil perhitungan yang didapatkan dari metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 akan diverifikasi menggunakan *Software* WinJULEA untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

4.6.1 Tahapan Analisis Metode Bina Marga 2017

Dalam pedoman Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 telah dijelaskan tahapan dari desain perkerasan jalan yang tepat. Berikut merupakan tahapan analisis menggunakan metode Bina Marga 2017:

1. Menetukan umur rencana (R)
2. Analisis data lalu lintas dan lalu lintas harian rerata tahun (LHRT)
3. Menentukan faktor pertumbuhan lalu lintas
4. Menentukan faktor ekuivalensi beban
5. Menghitung *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL)
6. Menentukan desain pondasi jalan
7. Menentukan alternatif desain perkerasan yang akan digunakan

4.6.2 Tahapan Analisis Metode Bina Marga 2024

Berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan Bina Marga 2024 telah dijelaskan tahapan dari desain perkerasan jalan yang tepat. Berikut merupakan tahapan analisis menggunakan metode Bina Marga 2024:

1. Menentukan umur rencana (R)
2. Analisis data lalu lintas dan lalu lintas harian rerata tahun (LHRT)
3. Menentukan faktor pertumbuhan lalu lintas
4. Menentukan faktor ekuivalensi beban
5. Menghitung *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESAL)
6. Menentukan alternatif desain perkerasan yang akan digunakan

4.6.3 Tahapan Analisis *Software* WinJULEA

Setelah melalui proses perhitungan menggunakan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024, maka akan dilakukan analisis perkerasan lentur mekanistik-empiris menggunakan *Software* WinJULEA. *Software* WinJULEA digunakan untuk mengevaluasi nilai tegangan, regangan dan umur perkerasan berdasarkan bebna lau lintas. Berikut merupakan tahapan analisis menggunakan *Software* WinJULEA:

1. *Input* data lapisan perkerasan

Masukkan jumlah lapisan, ketebalan perkerasan, dan sifat material yang sudah didapatkan dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta.

2. *Input* data beban kendaraan

   Masukkan beban kendaraan, tekanan ban dan konfigurasi roda ban pada kendaraan.

3. Tentukan titik perhitungan serta kedalaman analisis.

   Hal ini dilakukan untuk mendapatkan profil tegangan, regangan dan lendutan disetiap lapisan perkerasan.

4. Proses perhitungan

   Software WinJULEA mulai melalukan perhitungan distribusi tegangan, regangan tarik dan lendutan berdasarkan teori elastis *multilave.*

5. Hasil yang didapatkan

   Software WinJULEA akan menampilkan nilai tegangan sumbu horizontal, regangan tarik, lendutan permukaan beserta grafik distribusi tegangan – regangan untuk evaluasi perkerasan.

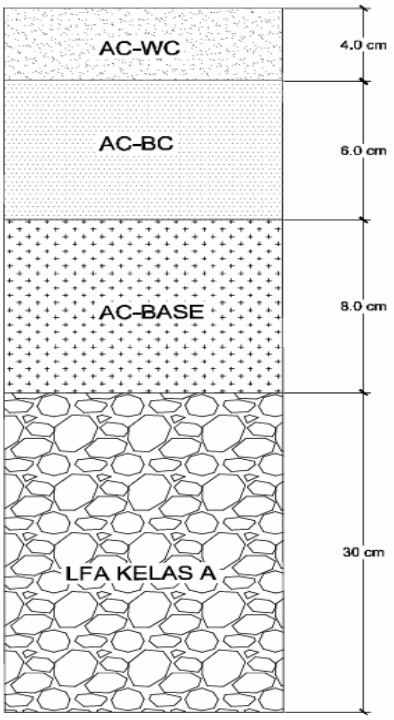
Setelah dilakukan perhitungan menggunakan metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024, serta evaluasi menggunakan *Software* WinJULEA maka setelahnya akan dilakukan perbandingan hasil evaluasi yang didapatkan dari Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada setiap metode.

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis

Dalam proses analisis perhitungan, memerlukan data-data yang digunakan untuk membantu proses perhitungan. Data yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta. Data sekunder yang didapatkan yaitu data tebal eksisting perkerasan, kondisi ruas jalan serta nilai LHR pada tahun 2024. Data sekunder digunakan sebagai data utama untuk menganalisis kondisi perkerasan jalan di ruas jalan Pakem – Kaliurang. Berdasarkan data yang didapat dari Dinas PUPESDM D.I. Yogyakarta, tebal perkerasan eksisting untuk jalan Pakem – Kaliurang KM 17 – 19 terdiri atas beberapa lapis seperti yang terlihat pada Gambar 5.1 berikut ini.



Gambar 5.1 Tebal Lapis Perkerasan Eksisting
Sumber: Dinas PUPESDM D.I. Yogyakarta (2024)

Lalu kondisi ruas jalan Pakem – Kaliurang berdasarkan data yang didapat dari Dinas PUPESDM D.I. Yogyakarta, dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Kondisi Ruas Jalan Pakem - Kaliurang

No.	Data	Keterangan
1.	Jenis Jalan	Kolektor
2.	Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas, i (%)	3,5%
3.	Distribusi Kendaraan	2 Lajur 2 Arah

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

Adapun data LHR yang digunakan pada penelitian ini merupakan data LHR ruas jalan Pakem – Kaliurang pada tahun 2024. Berikut merupakan Tabel 5.2 akan menjelaskan data LHR pada ruas jalan Pakem – Kaliuran Tahun 2024.

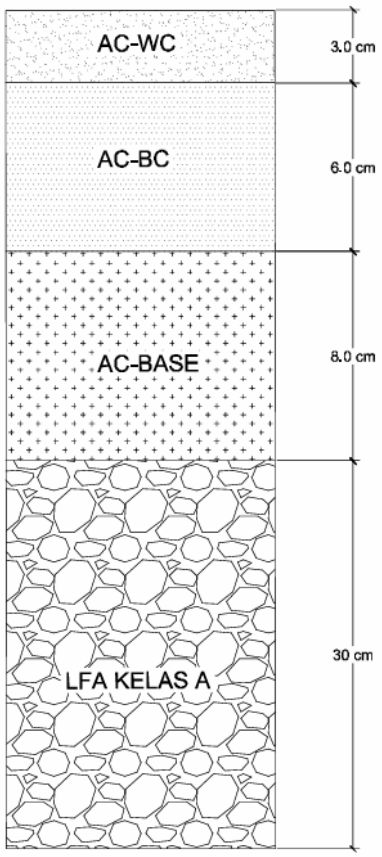
Tabel 5.2 Data Volume Lalu Lintas Harian Tahun 2024
Ruas Jalan Pakem - Kaliurang

Jenis Kendaraan	LHR (Kend/Hari)
Mobil	6108
Pikap, truk mikro	993
Bus Kecil	0
Bus Besar	248
Truk Kecil	99
Truk Sedang	199
Truk Besar	0
Truk Trailer	0
Truk Trailer Sedang	0

Sumber: Dinas PUPESDM D.I. Yogyak0arta (2024)

5.1.1 Analisis Sisa Umur Pelayanan Perkerasan Eksisting

Pada perkerasan eksisting, dianggap bahwa perkerasan eksisting bukan perkerasan baru. Sehingga, perkerasan sudah dalam kondisi telah terjadi kerusakan. Berdasarkan pendekatan terhadap evaluasi yang telah dilakukan oleh Nurumi (2020), nilai kerusakan analisis perkerasan eksisting terdalam terjadi pada kedalaman 1 cm, maka tebal perkerasan eksisting yang akan disimulasikan pada lapis permukaan AC-WC akan dikurangi sebesar 1 cm. Untuk *detail*, dapat dilihat pada Gambar 5.2 yang akan memperlihatkan tebal perkerasan eksisting dengan kerusakan.



Gambar 5.2 Tebal Perkerasan Eksisting Dengan Kerusakan
Sumber: Dinas PUPESDM D.I. Yogyakarta (2024)

Analisis perkerasan eksisting akan menggunakan dua metode, yaitu dengan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024. Proses analisis dilakukan dengan menggunakan berbagai data seperti data teknis jalan, data lalu lintas dan karakteristik tanah dasar. Terdapat beberapa perubahan dalam pedoman Bina

Marga 2024, beberapa hal ini yaitu seperti nilai VDF yang terbagi kesetiap daerah yang ada di Indonesia, penggolongan jenis kendaraan serta nilai modulus elastisitas pada beberapa jenis kendaraan. Berikut merupakan proses analisis menggunakan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024.

1. Analisis Perkerasan Eksisting Menggunakan Bina Marga 2017

   a. Menentukan Umur Rencana

      Berdasarkan Tabel 3.2 yang sudah tertera, perencanaan umur rencana perkerasan lentur telah dirancang menggunakan umur rencana 20 tahun.

   b. Penggolongan Jenis Kendaraan

      Penggolongan jenis kendaraan akan digolongkan berdasarkan pedoman Bina Marga 2017. Setelah ponggolongan dilakukan, maka data lalu lintas yang diperoleh akan dikonversi kedalam satuan kendaraan/hari. Perhitungan data lalu lintas harian menjadi hal penting dalam proses analisis karena akan mempengaruhi kinerja perkerasan masa layanannya. Data lalu lintas diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum, Perumahan, dan Energi Sumber Daya Mineral (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta dengan durasi pengamatan selama 29 menit. Pada penelitian ini, durasi waktu pengamatan berlangsung selama 29 menit, maka akan dilakukan perhitungan kedalam satuan hari sebagai berikut.

      Durasi survei = 29 Menit

      =

      = 0,020 hari

      Setelah didapatkan waktu durasi survei dalam satuan hari, maka perhitungan LHR tahun 2024 dalam satuan kendaraan/hari untuk setiap golongan dapat dilakukan. Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan LHR menggunakan Persamaan 3.1.

      $LHR\ 2024_{Gol2}$ =

      = 6108 kend/hari

Berikut Tabel 5.3 yang merupakan penggolongan jenis kendaraan berdasarkan data LHR yang melintas diruas jalan Pakem – Kaliurang KM 17 -19 pada tahun 2024.

Tabel 5.3 Penggolongan Jenis Kendaraan dan Nilai LHR 2024 Untuk Bina Marga 2017

Jenis Kendaraan	Golongan	Data Lalu Lintas	LHR 2024 (Kend/Hari)
Mobil	2	123	6108
Pikap, truk mikro	4	20	993
Bus Kecil	5A	0	0
Bus Besar	5B	5	248
Truk Kecil	6A	2	99
Truk Sedang	6B	4	199
Truk Besar	7A2	0	0
Truk Trailer	7B	0	0
Truk Trailer Sedang	7C1	0	0

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

c. Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Faktor laju pertumbuhan lalu lintas (i) berperan penting dalam pernecangan perkerasan. Pada ruas jalan Pakem – Kaliurang KM 17 – 19 termasuk pada kategori kolektor rural. Maka pada Tabel 3.6 kategori kolektor rural untuk daerah Jawa memiliki nilai faktor pertumbuhan lalu lintas (i) sebesar 3,5% per tahun. Nilai ini berbeda dengan jalan yang memiliki kategori arteri karena pertumbuhan pada kategori kolektor rural tidak sepesat jalan arteri.

Pada penelitian ini, survei lalu lintas telah dilaksanakan pada tahun 2024. Proyeksi LHR dilakukan pada saat penelitian dilakukan yaitu tahun 2025. Sehingga perkembangan lalu lintas yang terjadi dapat diukur dengan akurat menggunakan metode ini. Berikut Tabel 5.4 rekapitulasi terkait proyeksi LHR pada tahun 2025 menggunakan Persamaan 3.3

Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Nilai LHR Pada Tahun 2025

Golongan	Data Lalu Lintas	LHR 2024 (Kend/Hari)	LHR 2025 (Kend/Hari)
2	123	6108	6321
4	20	993	1028
5A	0	0	0

Lanjutan Tabel 5.4 Rekapitulasi Perhitungan Nilai LHR Pada Tahun 2025

Golongan	Data Lalu Lintas	LHR 2024 (Kend/Hari)	LHR 2025 (Kend/Hari)
5B	5	248	257
6A	2	99	103
6B	4	199	206
7A2	0	0	0
7B	0	0	0
7C1	0	0	0

d. Faktor Distribusi Lajur ($D_{L)}$

Berdasarkan Tabel 3.7, nilai faktor distribusi lajur untuk setiap kendaraan niaga pada lajur desain adalah 1.

e. Faktor Distribusi Arah ($D_{D)}$

Untuk distribusi arah dengan kondisi jalan dua arah seperti yang digunakan pada ruas jalan Pakem – Kaliurang, faktor distribusi arah ($D_{D)}$ sebesar 0,5.

f. Nilai Faktor Pengali Pertumbuhan Lalu Lintas (R)

Nilai faktor pengali pertumbuhan lalu lintas ini terbagi menjadi dua yakni $R_{faktual}$ yang akan digunakan untuk perhitungan dibawah tahun 2020, serta R_{normal} akan digunakan untuk perhitungan diatas tahun 2020. Sehingga, pada penelitian pada ruas jalan Pakem – Kaliurang hanya akan menggunakan $R_{nornmal,}$ hal ini disebabkan karna data yang diperoleh dari Dinas (PU-ESDM) Daerah Istimewa Yogyakarta sudah berada diatas tahun 2020 yaitu pada tahun 2024. Berdasarkan Persamaan 3.1, berikut nilai R_{normal} yang didapatkan.

R_{normal}

= 28,28 %

Sehingga nilai R yang digunakan adalah nilai $R_{(2024-2044)}$ sebesar 28,28%

g. VDF (*Vehicle Damage Factor*)

Nilai VDF dalam proses perhitungan diperlukan untuk mendapatkan gambaran terkait dengan sumbu kendaraan dan konfigurasi sumbu kendaraan yang ada. Terdapat VDF_4 dan VDF_5, keduanya akan membedakan hasil beban sumbu kumulatif atau CESA (*Cumulative Equivalent Single Axle Load*) menjadi $CESA_4$ dan $CESA_5$. Penentuan tebal perkerasan jalan lentur akan dilihat berdasarkan nilai $CESA_5$ yang didapatkan berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017. Nilai VDF setiap golongan di daerah Jawa telah tersedia pada Tabel 3.8. Sehingga, pada Tabel 5.5 berikut merupakan nilai VDF_4 dan VDF_5 yang digunakan dalam menghitung ESA pada penelitian ini berdasarkan golongannya.

Tabel 5.5 Nilai VDF Masing-Masing Jenis Kendaraan

Golongan	Jenis Kendaraan	Normal	
		VDF_4	VDF_5
2	Mobil	-	-
4	Pikap, truk mikro	-	-
5A	Bus Kecil	-	-
5B	Bus Besar	1,0	1,0
6A	Truk Kecil	0,55	0,5
6B	Truk Sedang	4	5,1
7A2	Truk Besar	4,3	5,6
7B	Truk Trailer	9,4	13,0
7C1	Truk Trailer Sedang	7,4	9,7

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Setelah diperoleh data VDF pada Tabel 5.5, maka dapat dilakukan perhitungan rencana jumlah kendaraan dalam periode 20 tahun.

Perhitungan nilai CESA dapat dilakukan menggunakan persamaan 3.4. Contoh perhitungan nilai ESA_4 dan ESA_5 akan diberikan pada golongan 6A dan dapat dilihat dibawah ini.

$CESA_4$ Normal

=

= 291766,15 ESAL

$CESA_5$ Normal

=

= 265241,96 ESAL

Berikut merupakan rekapitulasi perhitungan beban kendaraan golongan lainnya beserta nilai $CESA_4$ dan $CESA_5$ golongan lainnya yang dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5.6 Rekapitulasi Perhitungan Nilai $CESAL_4$ dan $CESAL_5$ Untuk Bina Marga 2017

Gol	Jenis Kendaraan	LHR 2025	VDF_4	VDF_5	$CESA_4$	$CESA_5$
2	Mobil	6321	0	0	0	0
4	Pikap, truk mikro	1028	0	0	0	0
5A	Bus Kecil	0	0	0	0	0
5B	Bus Besar	257	1,0	1,0	1326209,80	1326209,80
6A	Truk Kecil	103	0,55	0,5	291766,15	265241,96
6B	Truk Sedang	206	4	5,1	4243871,39	5410936,02
7A2	Truk Besar	0	4,3	5,6	0	0
7B	Truk Trailer	0	9,4	13,0	0	0
7C1	Truk Trailer Sedang	0	7,4	9,7	0	0
Jumlah (ESAL)					5861847,36	7002387,79

Berdasarkan hasil perhitungan seperti yang tertera pada Tabel 5.6 di atas, maka didapatkan nilai CESA sebagai berikut.

$CESAL_4$ = 5861847,36 ESAL

$CESAL_5$ = 7002387,79 ESAL

Berdasarkan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ), $CESAL_4$ diterapkan untuk perencanaan tebal lapisan tipis, perkerasan berbutir tanpa penutup, serta *overlay*. $CESAL_5$ digunakan untuk desain perkerasan lentur (berkaitan dengan pendekatan Mekanistik Empiris). $CESAL_5$ lebih memiliki hubungan yang lebih sensitif terhadap kendaraan berat. $CESAL_5$ digunakan untuk proyeksi jangka panjang, menghitung kumulatif beban berdasarkan proyeksi pertumbuhan lalu lintas hingga tahun normal. Dalam MDP, $CESAL_5$ digunakan untuk menentukan jenis perkerasan. Meskipun $CESAL_5$ yang digunakan untuk perencanaan jangka panjang dan menentukan ketebalan perkerasan jalan, CESAL4 tetap dihitung, 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.

2. Analisis Perkerasan Eksisting Menggunakan Bina Marga 2024

   a. Penentuan Umur Rencana

      Sama seperti Bina Marga 2017, pada Bina Marga 2024 umur rencana akan ditetapkan selama 20 tahun. Penetapan umur rencana ini akan mempengaruhi ketebalan lapisan perkerasan serta menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi perhitungan beban.

   b. Penggolongan Jenis Kendaraan

      Pada Bina Marga 2024 terdapat perbedaan dalam penggolongan jenis kendaraan. Berikut Tabel 5.7 yang akan memberikan penggolongan kendaraan dan nilai LHR untuk Bina Marga 2024.

Tabel 5.7 Penggolongan Jenis Kendaraan dan Nilai LHR 2024 Untuk Bina Marga 2024

Jenis Kendaraan	Golongan	Data Lalu Lintas	LHR 2024 (Kend/Hari)
Mobil	2	123	6108
Pikap, truk mikro	4	20	993
Bus Kecil	5A	0	0

Bus Besar	5B	5	248
Truk Kecil	6A	2	99
Truk Sedang	6B	4	199
Truk Besar	7A1	0	0
Truk Trailer	7B1	0	0
Truk Trailer Sedang	7C1	0	0

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

c. Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (i)

Pada Bina Marga 2024, nilai faktor laju pertumbuhan lalu lintas untuk daerah Jawa dengan kategori kolektor rural yaitu sebesar 3,5% pertahun, sama dengan nilai yang digunakan pada metode Manual Desain Perkerasan Jalan 2017. Nilai faktor laju pertumbuhan akan digunakan untuk mendapatkan proyeksi nilai LHR dari tahun pengamatan menuju tahun rencana. Proyeksi ini dilakukan dengan menggunakan nilai Persamaan 3.3.

Pada penelitian ini, survei lalu lintas telah dilaksanakan pada tahun 2024. Proyeksi LHR dilakukan pada saat penelitian dilakukan yaitu tahun 2025 dan tahun normal terjadi pada tahun 2028 dengan menggunakan faktor laju pertumbuhan (i) senilai 3,5%.

Terdapat 2 periode yang digunakan dalam analisis lalu lintas dengan metode Manual Desain Perkerasan Jalan 2024, yaitu periode faktual dan normal. Periode yang menjelaskan terkait kondisi lalu lintas dalam kurun waktu yang masih dekat dengan data survei diartikan sebagai periode faktual, sehingga periode faktul terjadi sejak tahun 2025 hingga tahun 2028. Periode faktual digunakan untuk melihat kemajuan volume lalu lintas sejak tahun survei dilakukan yaitu tahun 2024. Sedangkan, periode normal yang ditetapkan sejak 2028 hingga tahun 2045 merupakan periode yang digunakan untuk melihat perkembangan lalu lintas sesuai dengan umur rencana.

LHR dengan Periode faktual dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.3 seperti contoh pada golongan 2 berikut.

LHR_{2025}

= 6321 kend/hari

Sedangkan untuk LHR periode normal yang terjadi pada tahun 2028 dapat dihitung dengan Persamaan 5.3 yang ada di bawah ini.

LHR_{2028}

= 7009 kend/hari

Setelah melakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 3.3. maka proyeksi data LHR untuk periode faktual (2025) dan periode normal (2028) dapat dilihat secara menyeluruh pada Tabel 5.8 di bawah ini.

Tabel 5.8 Rekapitulasi Perhitungan LHR 2025 dan LHR 2028

Gol	Data Lalu Lintas	LHR 2024 (Kend/Hari)	i (%)	LHR 2025 (Kend/Hari)	LHR 2028 (Kend/Hari)
2	123	6108	3,5	6321	7009
4	20	993	3,5	1028	1140
5B	5	248	3,5	257	285
6A	2	99	3,5	103	114
6B	4	199	3,5	206	228

Berdasarkan Tabel 5.8 di atas dapat terlihat bahwa adanya kenaikan jumlah LHR pada setiap masa proyeksi. Terlihat selisih kenaikan dari tahun 2024 ke tahun 2025 untuk golongan 2 sebesar 213 kendaraan/hari, sedangkan selisih proyeksi tahun 2025 ke tahun 2028 sebesar 688 kendaraan/hari. Hal ini dipengaruhi oleh panjang periode proyeksi. Dengan adanya perbedaan ini, maka dapat dinyatakan bahwa semakin panjang periode proyeksi, akan semakin menambah kenaiklan lalu lintas yang diakibatkan oleh perumbuhan.

d. Faktor Distribusi Lajur (D_L) dan Distribusi Arah (D_D)

Menggunakan Tabel 3.7 yang sama dengan Bina Marga 2017 distribusi lajur bernilai 1 dan distribusi arah bernilai 0,5.

e. Nilai Faktor Pengali Pertumbuhan Lalu Lintas (R)

Berdasarkan metode Bina Marga 2024, faktor pengali pertumbuhan lalu lintas (R) akan terbagi menjadi 2 periode, yaitu $R_{faktual}$ untuk tahun 2025-2028 dan R_{normal} untuk periode 2028-2045. Perhitungan nilai R dapat menggunakan persamaan yang sama dengan Manual Desain Perkerasan Jalan 2017 yaitu Persamaan 3.1. berikut perhitungan untuk $R_{faktual}$

R_{normal}

= 3,11 %

Selanjutnya yaitu perhitungan $R_{faktual}$ yang akan diberikan dibawah ini.

$R_{faktual}$

=22,71 %

Maka, dapat ditarik kesimpulan bahwa apabila periode perencanaan semakin panjang, maka nilai R akan semakin tinggi, sehingga beban lalu lintas kumulatif yang diterima pun akan semakin besar.

f. VDF (*Vehicle Damage Factor*)

Pada Bina Marga 2024, pengelompokan nilai VDF dibedakan per provinsi. Nilai VDF ini disusun berdasarkan studi penimbangan beban gandar atau *Weight–In–Motion (WIM)* yang telah dilakukan oleh Direktorat Jenderal Bina Marga pada tahun 2023-2025. Dalam perancangan desain yang akurat akan memerlukan perhitungan beban lalu lintas yang baik juga.

Pada penelitian ini, lokasi penelitian berada di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Sehingga, nilai VDF yang digunakan telah tersedia pada Tabel 3.32. Berikut Tabel 5.9 akan memberikan rekapitulasi nilai VDF yang digunakan setiap golongan pada penelitian ini.

Tabel 5.9 Nilai VDF Masing-Masing Jenis Kendaraan

Golongan	Jenis Kendaraan	VDF_4		VDF_5	
		Faktual	Normal	Faktual	Normal
2	Mobil	-	-	-	-
4	Pikap, truk mikro	-	-	-	-

5A	Bus Kecil	-	-	-	-

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

Lanjutan Tabel 5.9 Nilai VDF Masing-Masing Jenis Kendaraan

Golongan	Jenis Kendaraan	VDF_4		VDF_5	
		Faktual	Normal	Faktual	Normal
5B	Bus Besar	1,2	1,2	1,3	1,3
6A	Truk Kecil	0,5	0,5	0,4	0,4
6B	Truk Sedang	3,8	1,1	5,3	1
7A1	Truk Besar	-	-	-	-
7B1	Truk Trailer	-	-	-	-
7C1	Truk Trailer Sedang	6,4	4,3	9,0	5,3

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

Setelah diperoleh data diatas, maka dapat dilakukan perhitungan nilai ESA dan CESAL. Perhitungan nilai CESA dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.4. Berikut merupakan rekapitulasi perhitungan nilai $CESAL_4$ dan $CESAL_5$ yang dapat di lihat pada Tabel 5.10 berikut.

Tabel 5.10 Rekapitulasi Perhitungan Nilai $CESAL_4$ dan $CESAL_5$

Golongan	$CESA_4$		$CESA_5$	
	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	145670,17	1416647,5	189371,22	1534701,53
6A	58268,06	236107,92	23307,22	188886,34
6B	116536,13	1038874,88	617641,52	5005488,06
7A1	0	0	0	0
7B1	0	0	0	0
7C1	0	0	0	0
Total ESA	320474,37	2691630,37	830319,97	6729075,94
Jumlah (ESAL)	3012104,75		7559395,91	

Berdasarkan hasil perhitungan seperti yang tertera pada Tabel 5.11 diatas, maka didapatkan nilai CESAL sebagai berikut.

$CESAL_4$ = 3012104,75 ESAL

$CESAL_5$ = 7559395,91 ESAL

3. Evaluasi menggunakan *software* WinJULEA

Evaluasi perkerasan jalan menggunakan *software* WinJULEA merupakan verifikasi perkerasan dengan pendekatan mekanistik-empiris. Dengan penggunaan *software* WinJULEA akan menghasilkan nilai respons tegangan dan regangan. *Sotware* WinJULEA dilakukan dengan metode analisis elastis berlapis (*Layered elastic analysis*). Pada proses evaluasi dengan *Software* WinJULEA, akan membutuhkan beberapa data teknis seperti ketebalan perkerasan pada setiap lapisan, modulus elastis, *poisson's ratio* dan beban kendaraan.

a. Data *Input Software* WinJULEA

Data teknis yang akan diinput berupa nilai tebal perkerasan pada setiap lapisan, modulus elasitis yang akan memberikan tingkat kekakuan material tiap lapis perkerasan, *poisson's ratio* yang akan merupakan perbandingan antara regangan lateral dan regangan aksial saat material menerima tekanan oleh beban kendaraan, data lalu lintas yang berupa beban sumbu ekivalen standar juga akan dinput kedalam data sebagai nilai pembebanan. Berikut Tabel 5.11 dan 5.12 merupakan data material lapisan eksisting Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024.

Tabel 5.11 Data Material Lapisan Eksisting Bina Marga 2017

Lapisan	**Eksisting Bina Marga 2017**	
	Modulus (kPa)	***Poisson's Ratio***
AC-WC	1.100.000	0,4
AC-BC	1.200.000	0,4
AC-BASE	1.600.000	0,4
LFA Kelas A	220.000	0,35
Subgrade	60.000	0,45

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Tabel 5.12 Data Material Lapisan Eksisting Bina Marga 2024

Lapisan	Eksisting Bina Marga 2024	
	Modulus (kPa)	***Poisson's Ratio***
AC-WC	1.100.000	0,4
AC-BC	1.200.000	0,4
AC-BASE	1.500.000	0,4
LFA Kelas A	220.000	0,35
AC-WC	60.000	0,45

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

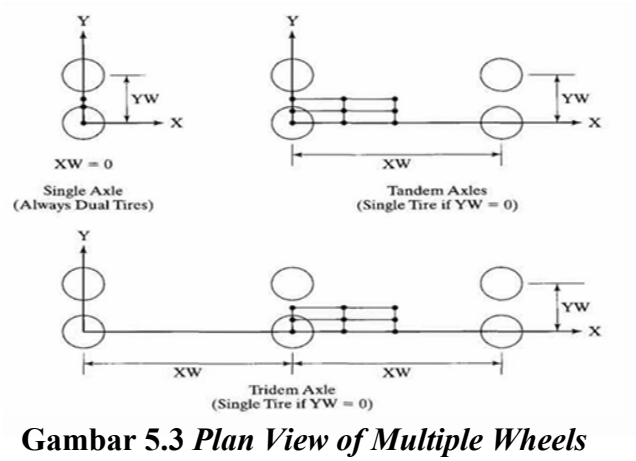
Setelah diketahui data ketebalan dan data material berupa modulus elastis dan *poisson's ratio*, maka diperlukan juga data *input* pembebanan standar suatu kendaraan. Setelah diketahui nilai beban setiap ban maka selanjutnya akan dilakukan perhitungan luas *contact area* menggunakan persamaan 3.5 berikut.

A =

=

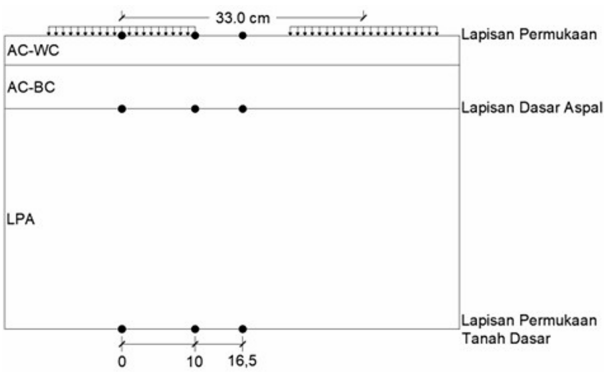
= 363,636 cm^2

Langkah selanjutnya yaitu menentukan titik yang akan dilakukan evaluasi dan pengamatan. Ada 3 titik yang akan dievaluasi nilai tegangan, regangan dan lendutannya yaitu pada titik koordinat 0 mm yang merupakan posisi tengah ban, 10 mm yang merupakan tepi ban, dan 16,5 mm yang merupakan tengah gandar (antara roda ganda). Dengan menentukan titik evaluasi ini, maka 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. Berikut Gambar 5.3 merupakan gambaran titik evaluasi.



Gambar 5.3 *Plan View of Multiple Wheels*
Sumber: Huang (2004)

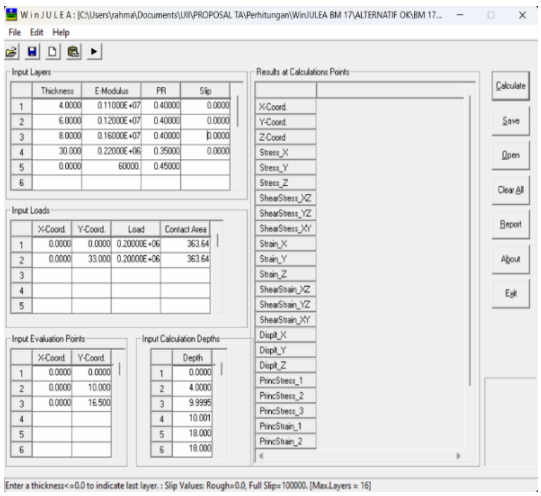
Terdapat dua titik tinjau yang akan berpengaruh pada jenis kerusakan yang akan di evaluasi. Kedua titik tinjau itu yaitu ada retak lelah (*fatigue cracking*) yang terjadi akibat repitisi beban, yang akan ditinjau pada dasar lapisan aspal. Lalu titik tinjau deformasi permanen yang terjadi akibat beban kendaraan berat dan akan ditinjau pada permukaan tanah dasar. Berikut Gambar 5.4 akan menjelaskan titik evaluasi dan titik tinjau yang digunakan dalam penelitian.



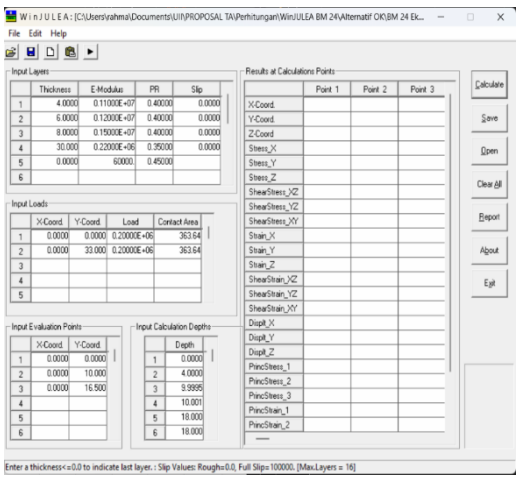
Gambar 5.4 Titik Tinjau Berdasarkan Konfigurasi Beban Sumbu Standar

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. Pada *interface* akan menampilkan ringkasan data dan 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. Maka setelahnya akan didapatkan hasil berupa nilai tegangan, regangan dan lendutan pada titik yang telah ditentukan sebelumnya. Berikut Gambar 5.5 dan Gambar 5.6 akan memberikan tampilan S*oftware* WinJULEA berupa data ataupun parameter yang digunakan untuk analisis.



Gambar 5.5 Data *Input* WinJULEA Untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017



Gambar 5.6 Data *Input* WinJULEA Untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024

b. Hasil Evaluasi Perkerasan Eksisting Menggunakan *Software* WinJULEA

Jika seluruh proses dari input data dan *calculation* telah dilakukan, maka setelahnya akan menghasilkan *output* perhitungan berupa nilai respons struktur pada setiap lapisan perkerasaan. Tabel 5.13 dan Tabel 5.14 berikut akan memberikan *output* yang dihasilkan dari analisis *software* WinJULEA.

Tabel 5.13 *Output* Analisis WinJULEA untuk Ketebalan Eksisting Bina Marga 2017

No. Koordinat		Reg. Horizontal	Reg. Vertikal	Reg. Vertikal
X	Y	Kedalaman 17,9995	Kedalaman 17,9995	Kedalaman 48,0005
0	0	0,000213	0,000267	0,000378
0	10	0,000215	0,000221	0,000408
0	16,5	0,000211	0,000193	0,000413
Nilai Max		0,000215	0,000267	0,000413

Tabel 5.14 *Output* Analisis WinJULEA untuk Ketebalan Eksisting Bina Marga 2024

No. Koordinat		Reg. Horizontal	Reg. Vertikal	Reg. Vertikal
X	Y	Kedalaman 17,9995	Kedalaman 17,9995	Kedalaman 48,0005
0	0	0,000217	0,000274	0,000380
0	10	0,000220	0,000228	0,000410
0	16,5	0,000215	0,000198	0,000416
Nilai Max		0,000220	0,000274	0,000416

c. Kontrol Repitisi Beban

Dengan menggunakan persamaan 3.6 hingga 3.8, maka didapatkan rekapitulasi nilai Nf, Nr, Nd seperti yang tertera pada Tabel 5.15 berikut.

Tabel 5.15 Nilai Kontrol Beban Perkerasan Eksisting Berdasarkan *Output* WinJULEA

Lapis Perkerasan	Hasil Nilai Nf (ESA5)	Hasil Nilai Nr (ESA5)	Hasil Nilai Nd (ESA5)
Eksisting Bina Marga 2017	80.479.811,23	8.204.240,31	1.561.623,51
Eksisting Bina Marga 2024	78.018.264,89	7.247.705,35	1.529.735,16

Berdasarkan hasil nilai Nf, Nr, dan Nd, pengulangan beban sampai terjadinya kerusakan pada deformasi terjadi lebih dahulu karena nilainya lebih kecil dari nilai CESAL yang didapatkan, selanjutnya dilanjutkan oleh *rutting*

d. Sisa Umur Layanan Perkerasan Eksisting Berdasarkan *Output* WinJulea

Sisa umur layanan merupakan estimasi sisa masa pakai suatu struktur perkerasan. Dalam hal ini, sisa masa layanan untuk perkerasan eksisting dilakukan untuk mengetahui sisa umur hingga terjadinya kerusakan.

Salah satu faktor penting dalam menganalisis sisa umur pelayanan adalah nilai CESAL, yang merupakan jumlah total beban lalu lintas yang diterima perkerasan selama umur rencana. Dalam perhitungan sisa umur rencana, terdapat penyesuain ketebalan perkerasan seperti yang terlihat pada Gambar 5.2. Penyesuaian ini disebabkan karena mempertimbangkan kedalaman kerusakan yang terjadi sebesar 1 cm. Nilai Nf, Nr, dan Nd juga mempengaruhi sisa umur pelayanan perkerasan, ketiga nilai ini dapat menjadi indikator daya tahan struktur terhadap berbagai jenis kerusakan. Dalam perhitungannya, sisa umur pelayanan dihitung dari tahun 2025-2044. Dengan menggunakan Persamaan 5.1 maka dapat dilakukan perhitungan sisa umur pelayanan jalan.

RL = (5.1)

dengan :

RL = Remaining Life (%),

Np = nilai lalu lintas pertahun (ESAL), dan

N 1,5 = nilai repetisi beban (ESA5)

Berikut merupakan salah satu contoh perhitungan untuk sisa umur untuk jenis kerusakan *fatigue* menggunakan Bina Marga 2017.

$RL_{fatigue}$ =

=

= 99,56 %

Tabel 5.16 Sisa Umur Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2017

Tahun	Nilai Lalu Lintas Pertahun Bina Marga 2017 (ESAL)	Sisa Umur Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2017 (%)			Sisa Umur Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2017 (Tahun)		
		RL *Fatigue*	RL *Rutting*	RL *Deformation*	RL *Fatigue*	RL *Rutting*	RL *Deformation*
2025	350,119.39	99.56	95.73	77.58	20	19	16
2026	700,238.78	99.13	91.46	55.16	20	18	11
2027	1,050,358.17	98.69	87.20	32.74	20	17	7
2028	1,400,477.56	98.26	82.93	10.32	20	17	2
2029	1,750,596.95	97.82	78.66	-12.10	20	16	
2030	2,100,716.34	97.39	74.39	-34.52	19	15	
2031	2,450,835.73	96.95	70.13	-56.94	19	14	
2032	2,800,955.12	96.52	65.86	-79.36	19	13	
2033	3,151,074.51	96.08	61.59	-101.78	19	12	
2034	3,501,193.90	95.65	57.32	-124.20	19	11	
2035	3,851,313.29	95.21	53.06	-146.62	19	11	
2036	4,201,432.68	94.78	48.79	-169.04	19	10	
2037	4,551,552.07	94.34	44.52	-191.46	19	9	
2038	4,901,671.46	93.91	40.25	-213.88	19	8	
2039	5,251,790.84	93.47	35.99	-236.30	19	7	
2040	5,601,910.23	93.04	31.72	-258.72	19	6	
2041	5,952,029.62	92.60	27.45	-281.14	19	5	
2042	6,302,149.01	92.17	23.18	-303.56	18	5	
2043	6,652,268.40	91.73	18.92	-325.98	18	4	
2044	7,002,387.79	91.30	14.65	-348.40	18	3	

Tabel 5.17 Sisa Umur Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2024

Tahun	Nilai Lalu Lintas Pertahun Bina Marga 2024(ESAL)	Umur Sisa Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2024 (%)			Umur Sisa Pelayanan Jalan Berdasarkan Bina Marga 2024 (Tahun)		
		RL *Fatigue*	RL *Rutting*	RL *Deformation*	RL *Fatigue*	RL *Rutting*	RL *Deformation*
2025	377,969.80	99.52	94.78	75.29	19.90	18.96	15.06
2026	755,939.59	99.03	89.57	50.58	19.81	17.91	10.12
2027	1,133,909.39	98.55	84.35	25.88	19.71	16.87	5.18
2028	1,511,879.18	98.06	79.14	1.17	19.61	15.83	0.23
2029	1,889,848.98	97.58	73.92	-23.54	19.52	14.78	
2030	2,267,818.77	97.09	68.71	-48.25	19.42	13.74	
2031	2,645,788.57	96.61	63.49	-72.96	19.32	12.70	
2032	3,023,758.37	96.12	58.28	-97.67	19.22	11.66	
2033	3,401,728.16	95.64	53.06	-122.37	19.13	10.61	
2034	3,779,697.96	95.16	47.85	-147.08	19.03	9.57	
2035	4,157,667.75	94.67	42.63	-171.79	18.93	8.53	
2036	4,535,637.55	94.19	37.42	-196.50	18.84	7.48	
2037	4,913,607.34	93.70	32.20	-221.21	18.74	6.44	
2038	5,291,577.14	93.22	26.99	-245.91	18.64	5.40	
2039	5,669,546.93	92.73	21.77	-270.62	18.55	4.35	
2040	6,047,516.73	92.25	16.56	-295.33	18.45	3.31	
2041	6,425,486.53	91.76	11.34	-320.04	18.35	2.27	
2042	6,803,456.32	91.28	6.13	-344.75	18.26	1.23	
2043	7,181,426.12	90.80	0.91	-369.46	18.16	0.18	
2044	7,559,395.91	90.31	-4.30	-394.16	18.06		

Sehingga didapatkan bahwa pada Bina Marga 2017, pada tahun 2044 *fatigue* masih mampu menahan hingga 18 tahun, *rutting* pada tahun 2044 masih mampu melayani perkerasan hingga 3 tahun kedepan, dan deformasi pada tahun 2028 hanya memiliki sisa umur 2 tahun. Sedangkan pada Bina Marga 2024, rutting hanya memiliki sisa usia 1 tahun pada tahun 2042, dan deformasi hanya memiliki sisa usia 5 tahun pada tahun 2027.

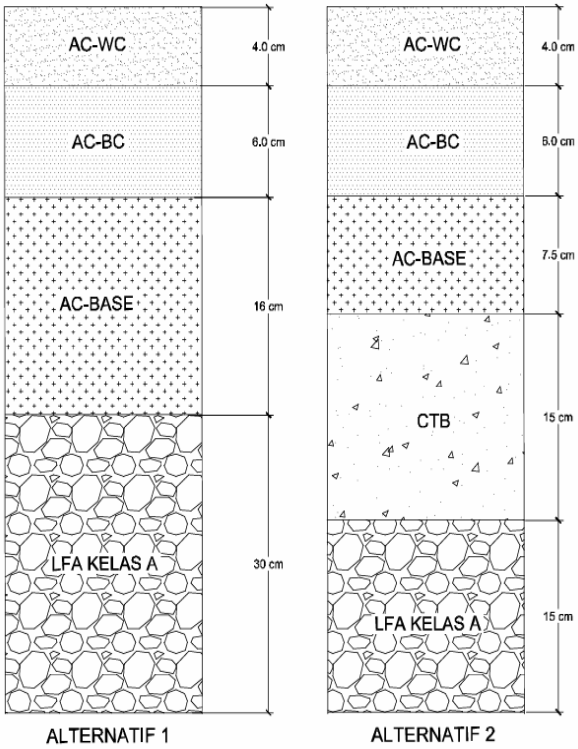
5.1.2 Analisis Alternatif Desain Perkerasan Bina Marga 2017

Setelah dilakukan perhitungan perkerasan Bina Marga 2017 sebagaimana yang telah dijelaskan pada analisis perkerasan eksisting menggunakan Bina Marga 2017, didapatkan bahwa prediksi umur layanan tidak memenuhi syarat yaitu berada dibawah umur rencana sebesar 20 tahun. Maka, dapat menggunakan alternatif desain yang diperoleh dari Bagan desain. Berikut merupakan dua alternatif desain perkerasan untuk Bina Marga 2017.

1. Menentukan Tebal Lapis Perkerasan

Berdasarkan pedoman Manual Desain Perkerasan Jalan 2017, penentuan tebal lapis perkerasan ditentukan berdasarkan nilai $CESAL_5$ yang terdapat pada Tabel 5.6. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan nilai $CESAL_4$ sebesar 5861847,36 ESAL dan nilai $CESAL_5$ yaitu sebesar 7002387,79 ESAL. Nilai $CESAL_5$ akan digunakan untuk memilih tebal suatu lapis perkerasan. Sehingga berdasarkan Tabel 3.3 akan digunakan tebal perkerasan dengan jenis perkerasan lentur dengan lapisan fondasi agregat pada bagan desain 3B. Dari pemilihan jenis perkerasan serta nilai ketebalan struktur perkerasan pada Manual Desain Perkerasan 2017 maka akan terpilih 2 alternatif ketebalan.

Pada alternatif pertama (1) akan menggunakan bagan desain 3B dengan jenis lapisan struktur AC dengan LFA. Lalu, untuk alternatif kedua (2) akan menggunakan bagan desain 3 dengan jenis lapisan perkerasan struktur AC serta CTB dengan pertimbangan efisiensi desain. Berikut Gambar 5.7 merupakan tebal alternatif perkerasannya untuk Bina Marga 2017.



Gambar 5.7 Alternatif Desain Tebal Lapis Perkerasan Untuk Bina Marga 2017

2. Evaluasi menggunakan *software* WinJULEA

Sama halnya dengan proses evaluasi yang dilakukan pada perkerasan eksisting, maka untuk proses evaluasi menggunakan *software* WinJULEA adalah sebagai berikut.

a. Data *Input Software* WinJULEA

Berikut Tabel 5.18 dan Tabel 5.19 merupakan data material lapisan untuk alternatif 1 dan alternatif 2 Bina Marga 2017.

Tabel 5.18 Data Material Alternatif 1 Bina Marga 2017

Lapisan	**Alternatif 1 Bina Marga 2017**	
	Modulus (kPa)	***Poisson's Ratio***
AC-WC	1.100.000	0,4
AC-BC	1..200000	0,4
AC-BASE	1.600.000	0,4
LFA Kelas A	220.000	0,35
Subgrade	60.000	0,45

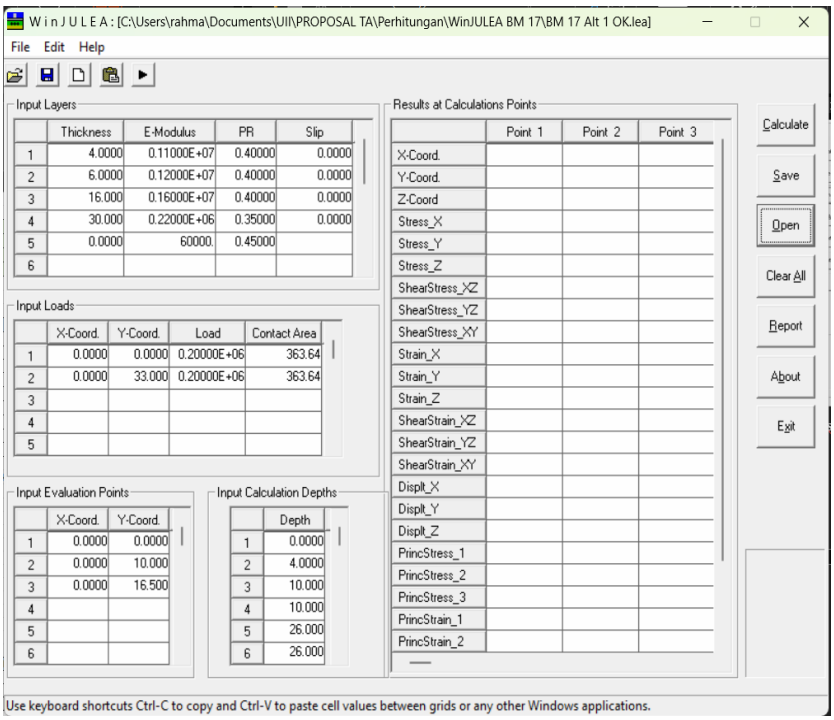
Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Tabel 5.19 Data Material Alternatif 2 Bina Marga 2017

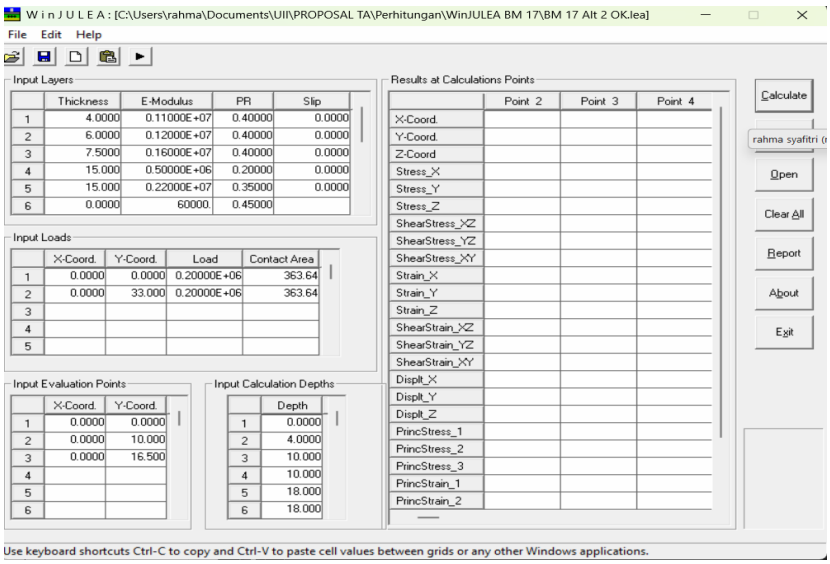
Lapisan	Alternatif 2 Bina Marga 2017	
	Modulus (kPa)	*Poisson's Ratio*
Lapisan AC-WC	1.100.000	0,4
AC-BC	1.200.000	0,4
AC-BASE	1.600.000	0,4
CTB	500.000	0,2
LFA Kelas A	220.000	0,35
Subgrade	60.000	0,45

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Berikut Gambar 5.8 dan Gambar 5.9 akan memberikan tampilan S*oftware* WinJULEA berupa data ataupun parameter yang digunakan untuk analisis.



Gambar 5.8 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017



Gambar 5.9 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017

b. Hasil Evaluasi Alternatif Bina Marga 2017 Menggunakan *Software* WinJULEA

Berikut Tabel 5.20 dan Tabel 5.21 merupakan *output* nilai regangan horizontal, dan vertikal yang dihasilkan dari *Software* WinJULEA untuk alternatif 1 dan 2 Bina Marga 2017.

Tabel 5.20 *Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017

No. Koordinat		Reg. Horizontal	Reg. Vertikal	Reg. Vertikal
X	**Y**	**Kedalaman 25,9995**	**Kedalaman 25,9995**	**Kedalaman 56,0005**
0	0	0,000139	0,000293	0,000264
0	10	0,000078	0,000289	0,000282
0	16,5	0,000146	0,000281	0,000285
Nilai Max		0,000146	0,000293	0,000285

Tabel 5.21 *Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017

No. Koordinat		Reg. Horizontal	Reg. Vertikal	Reg. Vertikal
X	**Y**	**Kedalaman 17,4995**	**Kedalaman 17,4995**	**Kedalaman 47,0005**
0	0	0,000096	0,000329	0,000167
0	10	0,000094	0,000270	0,000179

0	16,5	0,000090	0,000234	0,000181
Nilai Max		0,000096	0,000329	0,000181

c. Kontrol Repitisi Beban

Pada kontrol repetisi beban kerusakan yang dikontrol akan sama seperti pada perkerasan eksisting, yaitu Nf (*Fatigue cracking*), Nr (Rutting), dan Nd (*Permanent Deformation*). Dengan menggunakan Persamaan 3.6 hingga 3.8, maka didapatkan rekapitulasi nilai Nf, Nr, Nd seperti yang tertera pada Tabel 5.22 berikut.

Tabel 5.22 Nilai Kontrol Beban untuk Alternatif Bina Marga 2017 Berdasarkan *Output* WinJULEA

Lapis Perkerasan	Hasil Nilai Nf (ESA5)	Hasil Nilai Nr (ESA5)	Hasil Nilai Nd (ESA5)
Alternatif 1 Bina Marga 2017	438.699.414,7	7.030.275,49	10.157.625,88
Alternatif 2 Bina Marga 2017	2.261.185.540	4.199.160.68	77.536.406,92

Berdasarkan nilai kontrol beban yang diperoleh pada Tabel 5.22, maka kondisi *rutting* alternatif 2 terlihat terjadi penurunan yang cukup signifikan, sehingga dengan kondisi tersebut sudah tidak memenuhi syarat. Sedangkan unutk kondisi lainnya sudah melebih batas beban lalu lintas rencana sebesar 7.002.387,79 ESAL

d. Prediksi Umur Layanan Perkerasan Berdasarkan *Output* WinJulea

Menggunakan data yang sama seperti Tabel 5.16, berikut Tabel 5.23 merupakan rekapitulasi prediksi umur layanan untuk alternatif 1 dan 2 Bina Marga 2017.

Tabel 5.23 Rekapitulasi Prediksi Umur Layanan untuk Alternatif Bina Marga 2017

Jenis Kerusakan	Prediksi Umur Layanan (Tahun)	
	Alternatif 1 Bina Marga 2017	Alternatif 2 Bina Marga 2017
Fatigue Cracking	120	168
Rutting	20	14
Permanent	26	72

Deformation		

Berdasarkan prediksi umur layanan yang diperoleh pada Tabel 5.23 didappatkan bahwa terdapat korelasi antara kontrol beban dan prediksi umur pelayanan. Hal ini terlihat pada komdisi kerusakan rutting yang memiliki umur pelayanan yang rendah yaitu 14 tahum, hal ini sejalan dengan nilai Nr alternatif 2 yang rendah.

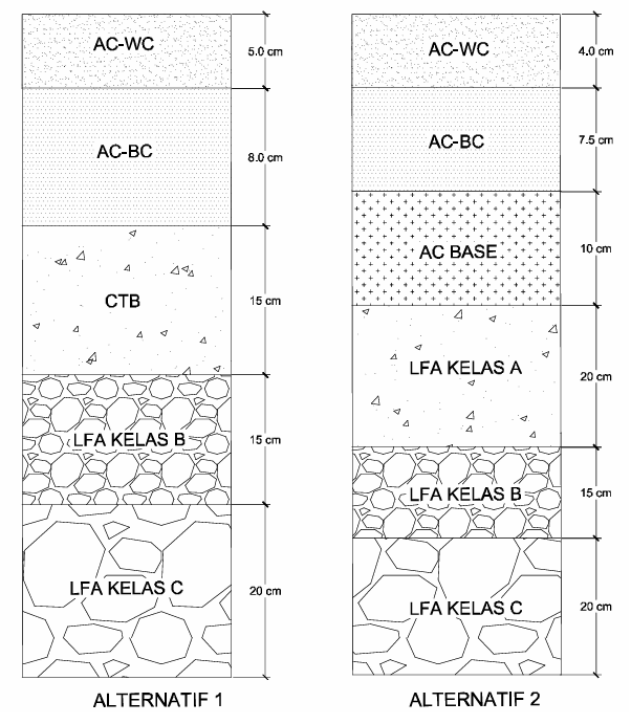
5.1.3 Analisis Alternatif Desain Perkerasan Bina Marga 2024

Setelah dilakukan perhitungan perkerasan Bina Marga 2024 sebagaimana yang telah dijelaskan pada analisis perkerasan eksisting menggunakan Bina Marga 2024, didapatkan bahwa prediksi umur layanan tidak memenuhi syarat yaitu berada dibawah umur rencana sebesar 20 tahun. Maka, dapat menggunakan alternatif desain yang diperoleh dari Bagan desain. Berikut merupakan dua alternatif desain perkerasan untuk Bina Marga 2024.

1. Menentukan Tebal Lapis Perkerasan

Dalam penentuan tebal perkerasan, pada metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 akan menggunakan nilai $CESAL_{5.}$ Dengan penggunaan $CESAL_5$ beban kumulatif serta kerusakan perkerasan yang terjadi akan lebih sensitif terhadap kendaraan berat. Maka, rancangan desain yang dibuat akan lebih akurat serta sesuai dengan kondisi lapangan saat ini.

Dengan nilai CESAL yang sudah didapatkan, maka setelahnya dapat dilakukan penentuan tebal lapis perkerasan yang dapat menahan beban kendaraan selama umur rencana. Berdasarkan Tabel 3.9 yang sudah tertera diatas, jenis perkerasan yang akan dipilih untuk nilai CESA5 sebesar 7559395,91 ESAL adalah bagan 3,3A, dan 3B yaitu dengan lapis fondasi agregat. Sehingga, terdapat dua (2) alternatif perkerasan yang akan digunakan. Pada alternatif pertama (1) akan menggunakan bagan desain 3 dengan jenis lapisan CTB dengan pertimbangan efisiensi desain. Lalu pada alternatif kedua (2) menggunakan LFA Kelas A, B dan C. Berikut Gambar 5.10 merupakan tebal alternatif perkerasannya.



Gambar 5.10 Alternatif Tebal Lapis Perkerasan Untuk Bina Marga 2024

2. Evaluasi Menggunakan *Software* Winjulea

Sama halnya dengan proses evaluasi yang dilakukan pada perkerasan eksisting, maka untuk proses evaluasi menggunakan *software* WinJULEA adalah sebagai berikut.

a. Data *Input Software* WinJULEA

Berikut Tabel 5.24 dan Tabel 5.25 merupakan data material lapisan untuk alternatif 1 dan alternatif 2 Bina Marga 2024.

Tabel 5.24 Data Material Alternatif 1 Bina Marga 2024

Lapisan	Alternatif 1 Bina Marga 2024	
	Modulus (kPa)	***Poisson's Ratio***
AC-WC	1.100.000	0,4
AC-BC	1.200.000	0,4
CTB	500.000	0,2
LFA Kelas B	170.000	0,35
LFA Kelas C	131.000	0,35
Subgrade	60.000	0,45

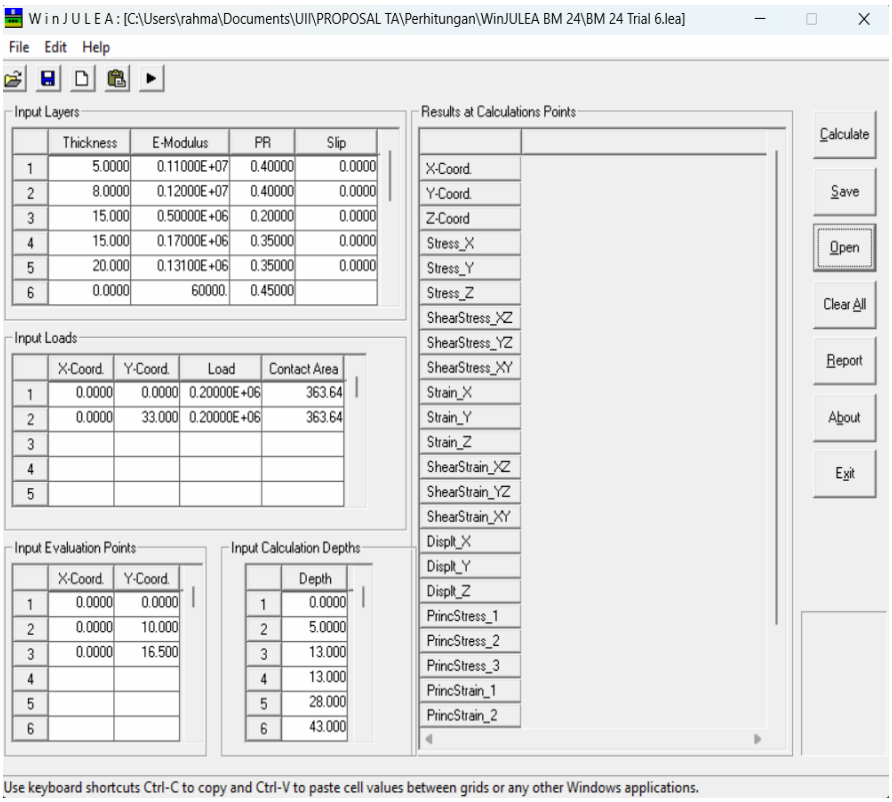
Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

Tabel 5.25 Data Material Alternatif 2 Bina Marga 2024

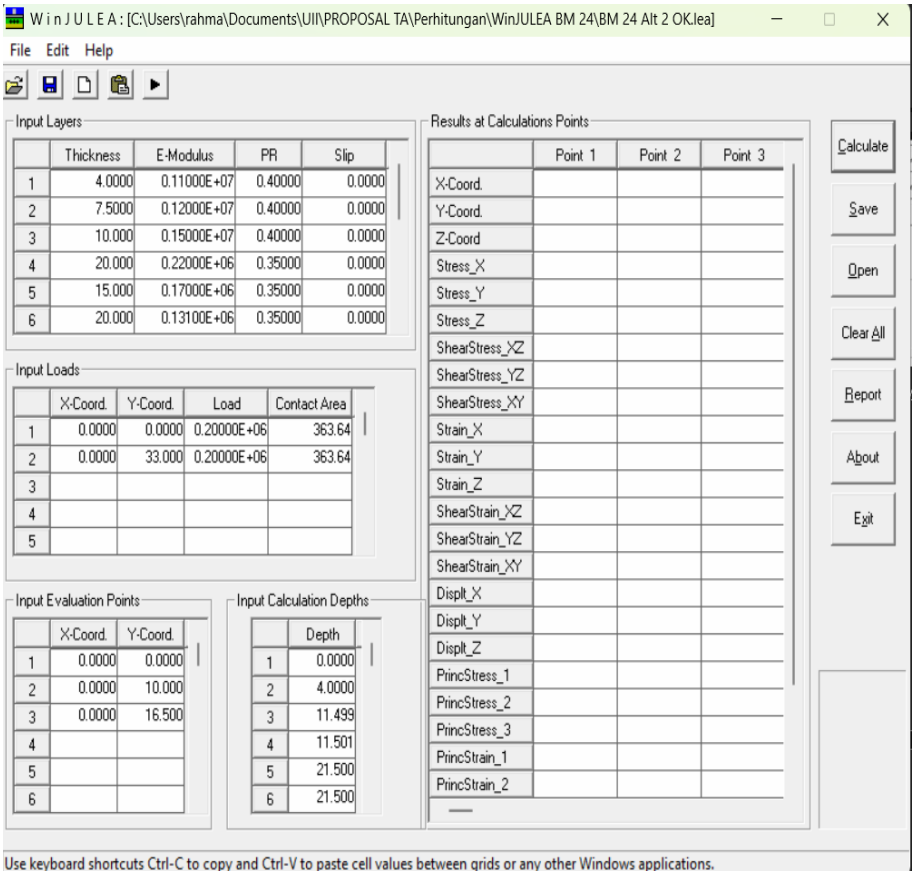
Lapisan	Alternatif 2 Bina Marga 2024	
	Modulus (kPa)	***Poisson's Ratio***
AC-WC	1.100.000	0,4
AC-BC	1.200.000	0,4
AC-BASE	1.500.000	0,4
LFA Kelas A	220.000	0,35
LFA Kelas B	170.000	0,35
LFA Kelas C	131.000	0,35
Subgrade	60.000	0,45

Sumber: Direktorat Jendral Bina Marga (2024)

Berikutnya merupakan Gambar 5.11 dan 5.12 akan memberikan tampilan S*oftware* WinJULEA berupa data ataupun parameter yang digunakan untuk analisis.



Gambar 5.11 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024



Gambar 5.12 Data *Input* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024

b. Hasil Evaluasi Alternatif Bina Marga 2024 Menggunakan *Software* WinJULEA

Berikut Tabel 5.26 dan Tabel 5.27 merupakan *output* nilai regangan horizontal, dan vertikal yang dihasilkan dari *Software* WinJULEA untuk alternatif 1 dan 2 Bina Marga 2017.

Tabel 5.26 *Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024

No. Koordinat		Reg. Horizontal	Reg. Vertikal	Reg. Vertikal
X	Y	Kedalaman 12,9995	Kedalaman 12,9995	Kedalaman 63,0005
0	0	0,000161	0,000479	0,000281
0	10	0,000148	0,000324	0,000299
0	16,5	0,000136	0,000228	0,000303
Nilai Max		0,000161	0,000479	0,000303

Tabel 5.*27 Output* Analisis WinJULEA Untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024

No. Koordinat		Reg. Horizontal	Reg. Vertikal	Reg. Vertikal
X	Y	kedalaman 21,4995	kedalaman 21,4995	Dkedalaman 76,5005
0	0	0,000173	0,000217	0,000210
0	10	0,000179	0,000195	0,000220
0	16,5	0,000178	0,000180	0,000222
Nilai Max		0,000179	0,000217	0,000222

c. Kontrol Repitisi Beban

Pada kontrol repetisi beban kerusakan yang dikontrol akan sama seperti pada perkerasan eksisting, yaitu Nf (*Fatigue cracking*), Nr (Rutting), dan Nd (*Permanent Deformation*). Dengan menggunakan persamaan 3.6 hingga 3.8, maka didapatkan rekapitulasi nilai Nf, Nr, Nd seperti yang tertera pada Tabel 5.28 berikut.

Tabel 5.28 Nilai Kontrol Beban Berdasarkan *Output* WinJULEA

Lapis Perkerasan	Hasil Nilai Nf (ESA5)	Hasil Nilai Nr (ESA5)	Hasil Nilai Nd (ESA5)
Alternatif 1 Bina Marga 2024	382.232.863,3	790.097	7.721.719
Alternatif 2 Bina Marga 2024	208.494.401,6	26.723.677	31.082.102.25

Berdasarkan Tabel 5.28, kontrol beban untuk jenis kerusakan Nr pada alternatif 1 tergolong sangat kecil dibandingkan dengan altenatuf 2. hal serupa juga terjadi pada jenis kerusakan Nd yang terjadi penurunan cukup signifikan. kontrol beban akan mempengaruhi prediksi umur rencana pada perhitungan selanjutnya.

d. Prediksi Umur Layanan Perkerasan Berdasarkan Output WinJulea

Apabila sudah mendapatkan hasil Nf, Nr, dan Nd maka prediksi umur rencana dapat dilakukan. Berikut Tabel 5.29 merupakan rekapitulasi prediksi umur layanan untuk alternatif 1 dan 2 Bina Marga 2024.

Tabel 5.29 Rekapitulasi Prediksi Umur Layanan untuk Alternatif Bina Marga 2024

Jenis Kerusakan	Prediksi Umur Layanan (Tahun)	
	Alternatif 1 Bina Marga 2024	**Alternatif 2 Bina Marga 2024**
Fatigue Cracking	141	123
Rutting	7	66
Permanent Deformation	37	70

Berdasarkan Tabel 5.29 terlihat bahwasannya alternatif 1 untuk Bina Marga 2017 tidak memenuhi umur rencana, sehingga tidak optimal untuk digunakan. Sedangkan alternatif 2, telah memenuhi umur rencana perkerasan selama 20 tahun. Maka, alternatif 2 dapat dijadikan alternatif perbaikan

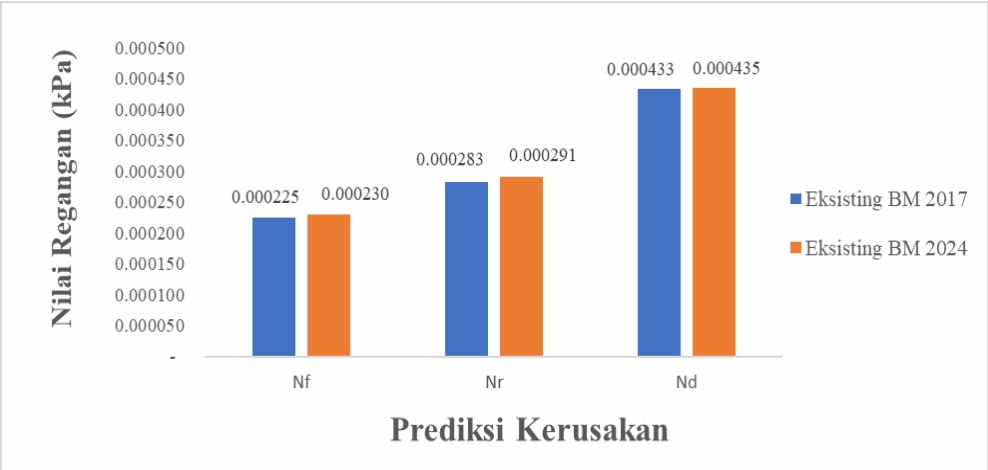
5.2 Pembahasan

Pada penelitian ini, penentuan tebal perkerasan menggunakan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 memiliki perbedaaan dibeberapa parameter, seperti nilai golongan kendaraan, nilai VDF yang digunakan, pemilihan jenis perkerasan, modulus elastisitas, dan *poisson's ratio*. Sehingga hasil yang didapatkan juga akan berbeda. Perkerasan eksisting akan dihitung sisa umur pelayanannya, sehingga akan memberikan gambaran terkait kondisi perkerasannya. Kemudian, akan diberikan alternatif untuk dijadikan sebagai solusi perbaikan eksisting. ALternatif akan dihitung menggunakan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024.Dari perhitungan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 akan dievaluasi menggunakan *Software* WinJULEA. Hasil evaluasi tebal perkerasan jalan menggunakan WinJULEA akan dilihat berdasarkan nilai regangan pada lapisan perkerasannya pada titik evaluasi yang sama. Dari nilai regangan dan tegangan yang didapatkan, maka jenis kerusakan seperti *fatigue cracking (Nf), Rutting (Nr)* dan *Permanent Deformation (Nd*) dapat diketahui.

5.2.1 Pembahasan Perkerasan Eksisting

Pada perkerasan eksisting, Tabel 5.13 dan 5.14 menunjukan *ouput* analisis WinJULEA yang memperlihatkan regangan horizontal dan regangan vertikal pada kedalaman tertentu untuk Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024. Dalam konteks *fatigue*, kerusakan ini dipicu oleh regangan horizontal (regangan tarik pada

lapisan aspal) akibat siklus beban lalu lintas yang berulang. Nilai regangan horizontal yang tinggi pada kedalaman 17,9995 cm menunjukkan potensi timbulnya *fatigue*. Pada kedua tahun, nilai regangan horizontal relatif kecil namun perlu diperhatikan karena konsistensi dan berulangnya beban dapat menyebabkan akumulasi kerusakan. Pada kondisi *rutting* dan *permanent deformation* berkaitan dengan regangan vertikal yang muncul di lapisan dekat permukaan perkerasan. Nilai regangan vertikal menunjukkan potensi terjadinya *rutting* dan deformasi akibat beban kerja. Pada ketebalan eksisting untuk Bina Marga 2024, regangan horizontal dan vertikal sedikit lebih tinggi dibanding Bina Marga 2017. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5.13 berikut ini.

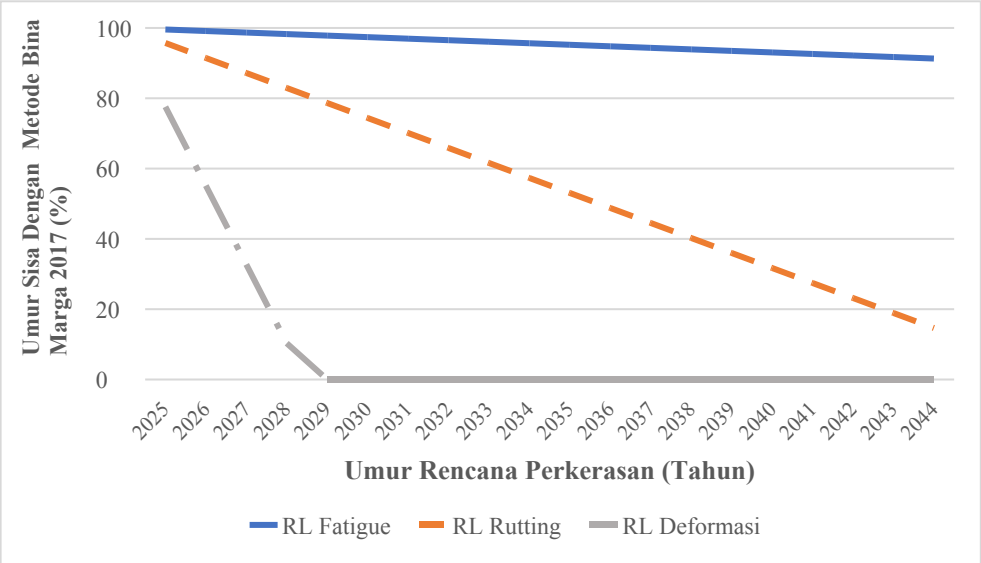


Gambar 5.13 Nilai Regangan Eksisting Pada Jenis Kerusakan

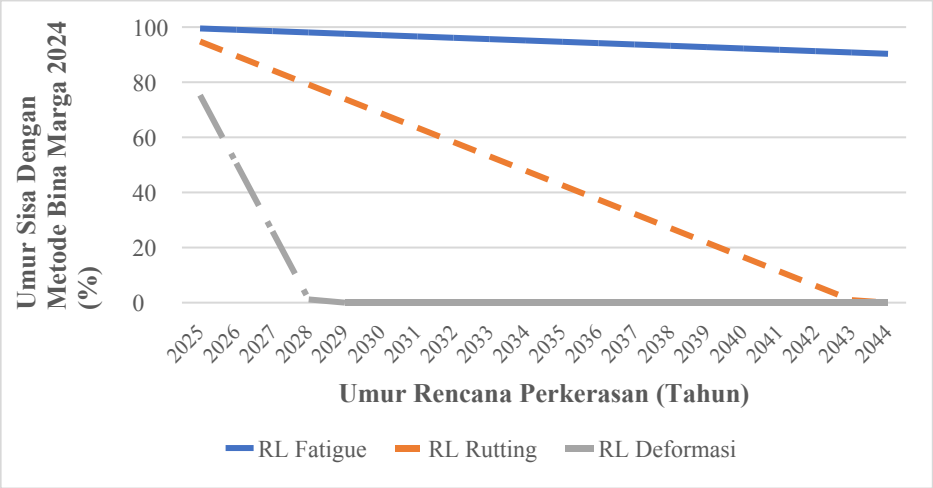
Pada perkerasan eksisting, dilakukan perhitungan antara pedoman Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 dengan menggunakan nilai modulus elastisitas (E) yang berbeda. Untuk skenario Bina Marga 2017 digunakan nilai modulus sebesar 1.600.000 kPa, sedangkan pada Bina Marga 2024 nilai modulus yang digunakan lebih rendah yaitu 1.500.000 kPa, begitupula dengan penggunaan nilai VDF yang berbeda pada setiap pedoman. Hal ini relevan terhadap penelitian yang dilakukan oleh Hadi (2024) yang menjelaskan bahwa penggunaan nilai VDF pada Bina Marga 2024 telah dieksplorasi lebih mendetail sesuai dengan Provinsi dimana lokasi perencanaan jalan berada, sedangkan Bina Marga 2017 nilai VDF hanya dibagi berdasarkan pulau-pulau besar yang ada di Indonesia. Penurunan modulus juga mempengaruhi kekakuan struktur dan distribusi regangan di bawah

beban lalu lintas. Kondisi struktur perkerasan pada tahun 2024 secara umum menunjukkan sedikit kenaikan nilai regangan dibandingkan 2017 untuk prediksi jenis kerusakan seperti *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent deformation*. Kenaikan regangan ini konsisten dengan penurunan modulus elastisitas, semakin lentur struktur (modulus lebih kecil) maka regangan akan meningkat. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Natzan, dkk (2024) yang menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas sangat berpengaruh terhadap performa struktural campuran beraspal.

Pada analisis perkerasan eksisting dilakukan perhitungan sisa umur pelayanan. Proses analisis dilakukan dengan melakukan pengurang terhadap lapisan permukaan aspal sedalam 1 cm. Perhitungan umur sisa dilakukan untuk mengetahui sisa masa pelayanan perkerasan jalan, sehingga dapat diantisipasi sebelum terjadinya kerusakan. Berikut Gambar 5.14 dan 5.15 merupakan sisa umur perkerasan jalan.



Gambar 5.14 Sisa Umur Pelayanan Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017



Gambar 5.15 Sisa Umur Pelayanan Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024

Berdasarkan grafik sisa umur pelayanan, terlihat bahwa pola kedua metode relatif sama. Kerusakan *fatigue* memiliki penurunan umur sisa yang paling lambat dan stabil, sehingga bukan menjadi faktor pembatas utama umur sisa perkerasan. Sebaliknya, kerusakan deformasi permanen menunjukkan penurunan linear yang cukup cepat hingga mendekati nol pada akhir periode analisis, menandakan bahwa deformasi alur pada lapisan permukaan lebih kritis dalam menentukan umur layanan. Kerusakan deformasi bahkan menunjukkan penurunan paling drastis pada tahun-tahun awal, sehingga menjadi faktor pembatas paling awal terutama jika kondisi lapisan bawah atau tanah dasar kurang baik. Hal ini sejalan dengan hasil pengamatan secara visual pada kondisi lapangan. Pada kondisi lapangan terlihat bebebarapa kerusakan yang disebabkan oleh deformasi seperti gundukan (*mound*), alur, dan gelombang, seperti yang terlihat pada Gambar 5.16 dan 5.17 berikut ini.



Gambar 5.16 Kerusakan *Permanent Deformation* (Alur)
Sumber: Dokumentasi Pribadi (2025)



Gambar 5.17 Kerusakan *Permanent Deformation* (*Mound*)
Sumber: Dokumentasi Pribadi (2025)

Risiko terjadinya kerusakan dapat terjadi seiring waktu dan beban lalu lintas yang berulang. Ketebalan perkerasan, material, dan distribusi beban harus diperbaharui untuk menghindari terjadinya kerusakan yang merugikan dan menurunkan umur rencana jalan. Kerusakan pada eksisting dapat terjadi berdasarkan urutan yaitu *permanent deformation* terjadi pertama kali sebab lapisan pada tanah dasar mengalami regangan tekan yang berlebih sehingga kehilangan sifat elastisnya, lalu tejadilah kerusakan *rutting* yang terjadi akibat pergeseran dilapisan bawah, dan selanjutnya akan terjadi *fatigue* yang terjadi karena lapisan yang selalu mengalami pelenturan.

5.2.2 Pembahasan Alternatif Bina Marga 2017

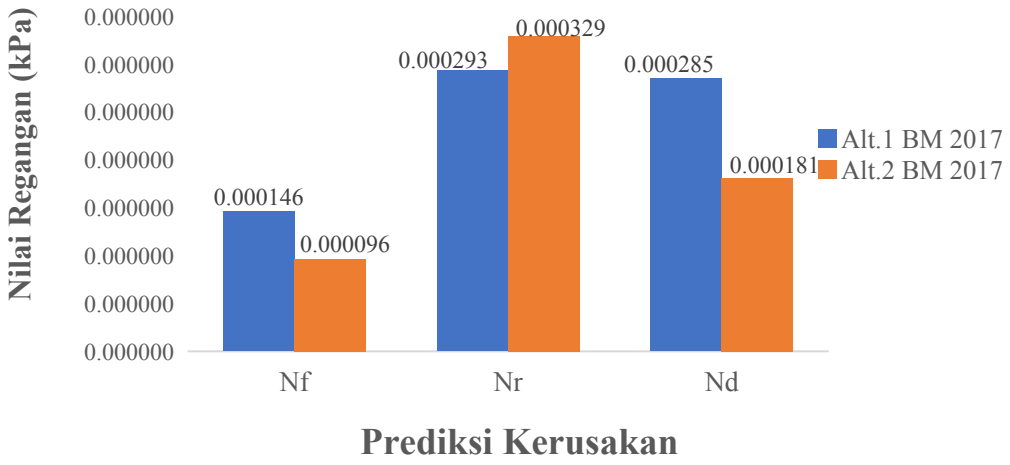
Dalam pemilihan Alternatif, setelah melakukan percobaan menggunakan *software* WinJULEA dengan menggunakan CESA yang sama (7.002.387 juta ESAL) didapatkan hasil yang tidak memenuhi rencana umur perkerasan, sehingga dinaikkan ke nilai CESA yang lebih tinggi disetiap bagan yang digunakan. Pemilihan jenis perkerasan boleh dinaikkan dari nilai sebenarnya karena dalam pendesainan perlu mempertimbangkan aspek keselamatan, ketahanan dan faktor risiko. Selain itu, penggunaan nilai CESA yang lebih tinggi dilakukan untuk mengantisispasi ketidakpastian dalam pertumbuhan lalu lintas, serta potensi peningkatan beban di masa depan, sehingga perkerasan yang dipilih lebih kuat

dan tahan lama. Pemilihan struktur atau jenis perkeasan harus mempertimbangkan CESA, laju pertumbuhan dan faktor-faktor risiko, sehingga penggunaan nilai CESA yang lebih tinggi untuk mengantisipasi ketidakpastian adalah langkah yang dibenarkan secara teknis. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Jihanny, dkk (2020) yang mendapati bahwa mengubah CESA dan menuntut peningkatan ketebalan perkerasan agar umur layanan tetap tercapai, hal ini mendukung praktik menaikkan nilai CESA saat kondisi nyata lebih berat dari perencanaan.

Maka, jenis dan tebal perkerasan yang digunakan untuk Bina Marga 2017 pada masing-masing alternatif terdapat pada Gambar 5.6. Pada gambar terlihat bahwa alternatif 1 terdiri atas lapisan AC-WC *(Asphalt Concrete – Wearing Course)* yang merupakan lapisan permukaan aspal dengan tebal 4 cm, kemudian dibawahnya terdapat lapisan AC-BC *(Asphalt Concrete – Binder Course)* sebagai lapisan pengikat antara lapisan aus dan lapisan pondasi atas (*base*) dengan tebal lapis perkerasan setebal 6 cm, kemudian terdapat lapisan AC Base yang merupakan lapisan struktural utama pada perkerasan lentur dengan ketebalan 16 cm, dan menggunakan lapisan fondasi agregat (LFA kelas A) yang berperan penting dalam menyebarkan beban ke tanah dasar secara merata, LFA kelas A memiliki tebal sebesar 30 cm. Kurniawan dan Hadi (2024) menyatakan bahwa lapisan pondasi aspal memiliki peranan penting dalam mendistribuiakan beban ke struktur dibawahnya, sehingga struktur perkerasan menjadi lebih kuat dan tahan terhadap berbagai jenis kerusakan.

Sedangkan pada alternatif 2 menggantikan sebagian tebal AC *base* + LFA dengan lapisan CTB (*cement treated base*) dan ketebalan lapisan bawah lebih ke struktur yang lebih kaku. Lapisan struktur yang digunakan yaitu AC-WC sebesar 4 cm, AC-BC sebesar 6 cm, AC Base sebesar 7,5 cm, CTB sebesar 15 cm dan LFA Kelas A sebesra 15 cm. Penggunaan CTB pada alternatif 2 ini dilakukan untuk menambah kekakuan perkerasan jalan.

Berdasarkan hasil evaluasi yang telah dilakukan oleh *software* WinJULEA, didapatkan perbandingan nilai regangan diantara kedua alternatif desain seperti yang tertera pada Gambar 5.18 berikut.



Gambar 5.18 Nilai Regangan Alternatif Bina Marga 2017

Berdasarkan Gambar 5.18 di atas, terlihat regangan yang terjadi untuk jenis kerusakan *fatigue* dan *deformation*, alternatif 2 menunjukkan nilai regangan yang sedikit lebih kecil, yang artinya struktur perkerasan akan lebih tahan terhadap retak dan deformasi, sehingga umur pelayanan akan semakin panjang. Namun, regangan untuk jenis kerusakan *rutting* alternatif 2 cenderung sedikit lebih tinggi, yang menandakan lapisan mungkin akan lebih mudah mengalami rusak terhadap *rutting*. Pada prediksi umur layanan seperti yang terdapat pada Tabel 5.23, umur pelayanan untuk perkerasan alternatif 1 lebih baik untuk semua kategori kerusakan, dan prediksi umur rencananya melebihi batas rencana umur perkerasan yaitu selama 20 tahun, hal ini dapat terjadi karena perbedaan material yang digunakan, peningkatan kualitas material, serta desain struktur yang diperbaiki. Pernyataan ini didukung oleh hasil penelitian Bhattacharya, dkk. (2024) yang menegaskan bahwa masa pakai perkerasan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti desain perkerasan, kondisi iklim, jenis aspal dan campuran yang digunakan, lalu lintas dan tingkat pertumbuhan lalu lintas, pengerjaan, dan beban yang diberikan.

Berdasarkan prediksi umur layanan pada Tabel 5.23, alternatif 1 memberikan prediksi umur layanan terhadap *fatigue cracking* selama 120 tahun, *rutting* selama 20 tahun, dan *deformation permanent* selama 26 tahun. Sedangkan pada alternatif 2 memiliki umur layanan hingga terjadinya *fatigue* selama 168

tahun, *rutting* 14 tahun dan *deformation permanent* selama 72 tahun. Alternatif 1 mampu menahan kerusakan atas *fatigue, rutting* dan *permanent deformation* serta memenuhi rencana umur pelayanan yaitu selama 20 tahun. Sedangkan alternatif 2 memiliki keunggulan pada prediksi umur rencana terhadap *fatigue*, dan *permanen deformation,* tetapi lemah dalam menahan terjadinya *rutting*. Deng, dkk (2023) menjelaskan bahwa penyebab utama *rutting* pada perkerasan aspal adalah akumulasi dari regangan vertikal yang terjadi dilapisan atas dan bawah perkerasan akibat beban lalu lintas berulang.

Maka, alternatif terbaik yang akan digunakan untuk Bina Marga 2017 yaitu merupakan alternatif 1 dengan pengunaan jenis perkerasan AC-WC, AC-BC, AC Base dan LFA kelas A.

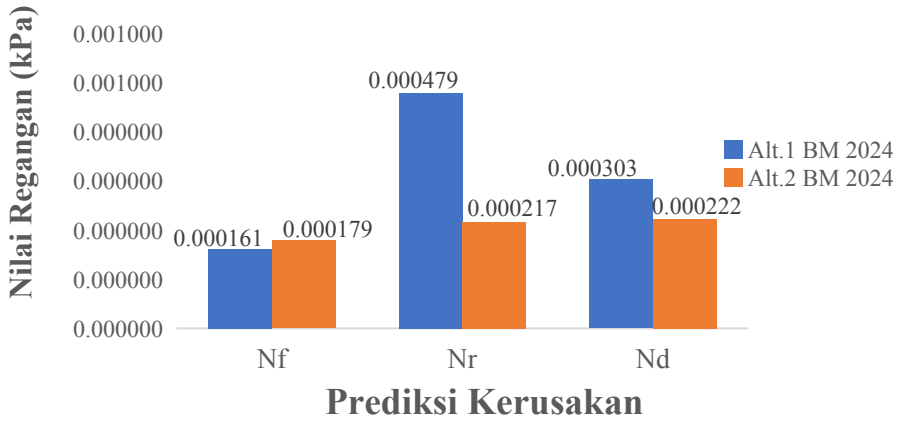
5.2.2 Pembahasan Alternatif Bina Marga 2024

Sama seperti Bina Marga 2017, untuk pemilihan Alternatif dengan menggunakan ESAL yang sama (7.559.395 juta ESAL) tidak memenuhi rencana umur perkerasan, sehingga dinaikkan ke nilai CESA yang lebih tinggi disetiap bagan yang digunakan. Pada gambar 5.9 terlihat jenis perkerasan yang akan digunakan pada alternatif 1 dan alternatif 2 untuk Bina Marga 2024. Pada alternatif 1 menggunakan perkerasan dengan lapisan AC-WC sebesar 5 cm, dibawahnya menggunakan lapisan perkerasan AC-BC dengen tebal 8 cm, lalu menggunakan CTB setebal 15 sebagai lapisan pondasi atas berikat semen, dan terdapat lapisan fondasi bawah berupa LFA kelas B setebal 15 cm dan LFA kelas C setebal 20 cm.

Kemudian pada alternatif 2 menggunakan lapis perkerasan AC-WC setebal 4 cm, AC-BC setebal 7,5 cm, AC Base setebal 10 cm, LFA kelas A setebal 20 cm, LFA kelas B setebal 15 cm dan LFA kelas C setebal 20 cm. Kedua alternatif menggunakan jenis lapisan yang berbeda, alternatif 1 diperkuat dengan menggunakan CTB sedangkan alternatif 2 diperkuat dengan penggunaan AC Base + LFA kelas A,B dan C yang akan memberikan dukungan struktural besar sehingga mampu mendistirbusikan beban dengan baik ke subgrade. Perbedaan karakteristik material, ketebalan lapisan menyebabkan variasi dalam daya tahan

terhadap beban lalu lintas, sehingga umur pelayanan jalan sangat bergantung pada jenis perkerasan yang digunakan.

Berdasarkan hasil evaluasi yang telah dilakukan oleh *software* WinJULEA, didapatkan perbandingan nilai regangan untuk kedua alternatif seperti yang tertera pada Gambar 5.16 Berikut.



Gambar 5.19 Nilai Regangan Bina Marga 2024

Seperti yang terlihat pada Gambar 5.19, alternatif 2 lebih dominan memiliki tingkat ketahanan terhadap *rutting* dan *deformation* yang lebih baik. Sedangkan pada ketahanan *fatigue*, alternatif 1 tergolong sedikit lebih baik. Berdasarkan prediksi umur rencana seperti yang tertera pada Tabel 5.29, alternatif 1 belum memenuhi umur rencana pada kerusakan *rutting*, sedangkan alternatif 2 terlihat lebih optimal dan prediksi umur pelayanan memenuhi umur rencana selama 20 tahun. Sehingga, secara keseluruhan alternatif 2 memberikan performa yang lebih optimal untuk mengatasi kerusakan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Alfi, dkk (2024) menyatakan bahwa peningkatan regangan akan mengurangi umur kelelahan. Begitu pula dengan penelitian yang dilakukan oleh Hadi dan Fauziah (2022) menyatakan bahwa apabila regangan naik, maka Nf akan menurun.

Setelah diketahui *output* yang dihasilkan oleh software WinJULEA, maka prediksi umur layanan dapat ditentukan. Berdasarkan hasil prediksi umur layanan yang telah dilakukan, alternatif 1 memiliki prediksi umur layanan terhadap *fatigue* selama 141 tahun, *rutting* 7 tahun dan *permanent deformation* selama 37 tahun. Artinya, pada alternatif 1 ketahanan terhadap *rutting* tidak optimal. Sedangkan

alternatif 2 mendapatkan predikisi umur layanan untuk ketahanan terhadap *fatigue* sebesar 123 tahun, *rutting* 66 tahun, dan *permanent deformation* 70 tahun.

Sehingga, alternatif desain terbaik yang mampu menahan berbagai bentuk kerusakan seperti *fatigue cracking*, *rutting* dan *permanent deformation* pada Bina Marga 2024 adalah alternatif 2. Hal ini dapat dilihat dari prediksi umur rencana yang telah melebihi rencana umur perlayanan selama 20 tahun.

5.2.3 Pembahasan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat perbedaan nilai regangan antara pedoman Bina Marga 2017 dan 2024 untuk seluruh jenis perkerasan, baik eksisting maupun alternatif. Secara umum, nilai regangan pada Bina Marga 2024 cenderung lebih besar dibandingkan dengan Bina Marga 2017, baik untuk regangan horizontal maupun vertikal. Sejalan dengan penelitian Hadi (2024), desain perkerasan menggunakan Bina Marga 2024 terbukti lebih unggul dibandingkan dengan Bina Marga 2017. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter perhitungan dalam standar Bina Marga 2024 menyebabkan struktur perkerasan merespon beban dengan nilai regangan yang sedikit lebih tinggi, kemungkinan karena adanya perubahan nilai modulus elastisitas lapisan atau faktor beban lalu lintas yang digunakan. Perbedaan nilai regangan disebabkan oleh perbedaan parameter Bina Marga dan bukan disebabkan oleh *software* atau metode hitung. Berikut Tabel 5.30 dan Tabel 5.31 merupakan rekapitulasi hasil analisis nilai Nf, Nr, dan Nd

Tabel 5.30 Rekapitulasi Hasil Analisis Nilai Nf, Nr, dan Nd Untuk Bina Marga 2017

Bina Marga 2017	Beban Lalu Lintas Rencana (ESAL)	Repetisi Beban		Keterangan
Eksisting	7.002.387,79	Nf	80.479.811,23	Nf > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nr	10.627.645,81	Nr> Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nd	1.929.853.18	Nd < Beban Lalu Lintas Rencana (Tidak)
Alternatif 1		Nf	438.699.414,74	Nf > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nr	7.030.275,49	Nr> Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nd	10.157.625,88	Nd > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
Alternatif 2		Nf	2.261.185.539,81	Nf > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nr	4.199.160,68	Nr < Beban Lalu Lintas Rencana

				(Tidak)
		Nd	77.536.406,92	Nd > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)

Tabel 5.31 Rekapitulasi Hasil Analisis Nilai Nf, Nr, dan Nd Untuk Bina Marga 2024

Bina Marga 2024	Beban Lalu Lintas Rencana (ESAL)	Repetisi Beban		Keterangan
Eksisting	7.559.395,91	Nf	78.018.264,89	Nf > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nr	9.472.309,91	Nr> Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nd	1.868.322,35	Nd < Beban Lalu Lintas Rencana (Tidak)
Alternatif 1		Nf	382.232.863,26	Nf > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nr	790.097,38	Nr < Beban Lalu Lintas Rencana (Tidak)
		Nd	7.721.719,18	Nd >Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
Alternatif 2		Nf	208.494.401,62	Nf > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nr	26.723.677,06	Nr > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)
		Nd	31.082.102,25	Nd > Beban Lalu Lintas Rencana (Ya)

Mengacu pada masing-masing beban lalu lintas rencana pada Tabel 5.31 dan 5.32, maka dapat dilihat skenario yang memiliki ketahanan yang baik terhadap beban lalu lintas berulang dan memiliki umur pelayanan yang lebih baik. Pada Tabel 5.31 terlihat bahwa Bina Marga 2017 untuk perkerasan eksisting dan tidak mempu menahan repitisi beban lalu lintas dengan baik, hal ini dikarenakan nilai Nd yang didapatkan lebih kecil dari beban lalu lintas rencana sebesar 7.002.387,79 ESAL. Sehingga desain perkerasan tidak memenuhi syarat untuk desain umur perkerasan yaitu 20 tahun sesuai dengan pedoman Bina Marga. Begitupun dengan alternatif 2 Bina Marga 2017, nilai Nr berada dibawah nilai beban lalu lintas rencana, sehingga prediksi umur pelayanan tidak memenuhi standar pedoman.

Berdasarkan Tabel 5.30, untuk alternatif 1 dan 2 Bina Marga 2017 yang mengalami kerusakan pertama kali adalah *rutting*. Pada alternatif 1, *rutting* dapat terjadi karena aspal tidak memiliki cukup ketebalan untuk mendistribusikan beban merata (Alkaissi, 2020). Selain itu, dapat dipengaruhi juga oleh ketebalan lapisan AC Base yang besar (16 cm), AC Base pada lapisan ini berperan untuk mehanan tegangan geser. Sedangkan pada alternatif 2, hal ini dapat terjadi karena lapisan aspal memiliki sifat viskoelastis yang sensitif terhadap suhu dan beban berulang.

Selain itu, tegangan geser tertinggi terjadi dibagian bawah lapisan AC Base, jika modulus kekakuan lapisan AC Base atau ikatan dengan CTB kurang baik, maka akan memicu terjadinya *rutting*. Lalu penggunaan CTB dan aspal juga menyebabkan fokus regangan terjadi diaspal, sehingga menyebabkan *rutting* terjadi lebih dahulu sebelum lapisan bawah mengalami kerusakan. Dari berbagai skenario untuk Bina Marga 2017, alternatif terbaik yang memiliki nilai prediksi kerusakan dan telah memenuhi syarat desain umur perkerasan yaitu alternatif 2.

Pada Tabel 5.31, Bina Marga 2024 untuk pekerasan eksisting dan alternatif 1 tidak mempu menahan repitisi beban lalu lintas dengan baik, hal ini dikarenakan nilai Nd dan Nr yang didapatkan lebih kecil dari beban lalu lintas rencana sebesar 7.559.395,91 ESAL. Pada alternatif 1 dan alternatif 2 mengalami kerusakan pertama kali pada *rutting.* Pada alternatif 1, penggunaan lapisan CTB yang kaku memperkuat efek *rutting* di aspal, mebuat tegangan yang tinggi terkonsentrasi diatasnya. Kemudian penggunaan LFA kelas B dan C juga membuat kerusakan terkonsentrasi dilapisan atas (aspal) berupa *rutting*. Hal ini sejalan dengan temuan pada penelitian yang dilakukan oleh Cahyono, dkk (2022), yang mendapati bahwa *rutting* dapat terjadi lebih dahulu pada lapisan aspal akibat perilaku viskoelastis material, bahkan ketika CTB masih stabil secara struktural. Pada alternatif 2, rutting dapat terjadi pertama kali karena beban terkonsentrasi di aspal, hal ini terjadi karena penggunaan LFA yang sangat kaku. Sehingga, alternatif terbaik yang digunakan untuk perkerasan menggunakan Bina Marga 2024 yaitu menggunakan alternatif 2, pemilihan ini didasarkan atas nilai prediksi kerusakan yang mempu menahan repitisi beban lalu lintas dengan baik dan telah memenuhi syarat desain umur perkerasan lentur yaitu 20 tahun sesuai dengan pedoman Bina Marga.

Pada Bina Marga 2017, perhitungan yang terjadi masih menggunakan pendekatan ideal dengan kondisi material yang dianggap homogen dan linier elastis. Sedangkan pada Bina Marga 2024 memperhitungkan kondisi nyata, seperti variasi suhu, kelembapan, modulus material, serta pengaruh beban berulang yang lebih akurat. Hal ini diperkuat dengan pedoman Manual Desain Perkerasan Jalan (2024) yang menyatakan bahwa nilai VDF yang digunakan oleh

Bina Marga 2024 berdasarkan nilai VDF pada regional masing-masing kelas kendaraan niaga setiap provinsi berdasarkan studi *Weight – In - Motion* (WIM) yang telah dilakukan Direktorat Jenderal Bina Marga pada tahun 2015-2023. Berdasarkan hasil tersebut, dapat dikatakan pembaruan pedoman MDPJ berdasarkan studi yang lebih akurat terhadap kondisi lapangan.

Setiap lapisan perkerasan yang dimulai dari lapisan aspal hingga lapisan tanah dasar (*subgrade*) mengalami perubahan nilai regangan dan tegangan yang cukup signifikan pada Bina Marga 2024. Pada Bina Marga 2017, modulus elastis setiap lapisan dianggap tetap dan tidak banyak dipengaruhi oleh kondisi aktual. Sedangkan pada Bina Marga 2024, modulus elastisitas menyesuaikan dengan kondisi aktual, terutama pengaruh suhu pada lapisan aspal dan kelembapan pada tanah dasar. Bina Marga 2024 memberikan hasil yang lebih konservatif namun realistis, menilai kondisi lapisan lebih mendekati perilaku jalan dilapangan.

Bina Marga 2024 cenderung lebih akurat untuk desain masa depan, sebab parameter yang digunakan telah mempertimbangkan kondisi aktual yang ada dilapangan. Hargiansyah, dkk (2025) menyatakan bahwa dengan desain yang disesuaikan berdasarkan data aktual lalu lintas, dan kondisi tanah, hasil perencanaan dengan metode Bina Marga 2024 lebih relevan terhadap kebutuhan lapangan, dan memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan kualitas infrastruktur. Namun, pada desain Bina Marga 2024 akan membutuhkan ketebalan lapisan yang lebih besar atau material dengan mutu yang lebih tinggi, tetapi akan memberikan keandalan dan umur pelayanan yang lebih konsisten terhadap kondisi operasional sebenarnya, hal ini akan mempengaruhi nilai ketahanan terhadap *fatigue, rutting* dan *permanent deformation* yang akan terjadi.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Setelah melakukan analisis dengan menggunakan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 serta proses evaluasi dengan menggunakan metode mekanistik – empiris dengan bantuan *software* WinJULEA, maka didapatkan Kesimpulan sebagai berikut.

1. Kondisi perkerasan Jalan Pakem–Kaliurang masih cukup baik terhadap *fatigue* namun secara keseluruhan tidak mampu memenuhi umur rencana karena *rutting* dan terutama deformasi muncul jauh lebih cepat, menunjukkan bahwa struktur bawah perkerasan sudah tidak stabil. Dengan demikian, jalan ini memerlukan perbaikan atau penguatan lapisan pondasi dan tanah dasar agar kinerjanya tetap optimal.
2. Hasil evaluasi nilai regangan pada setiap lapis perkerasan jalan akibat beban lalu lintas menggunakan WinJULEA menunjukkan bahwa nilai regangan pada Bina Marga 2024 cenderung lebih tinggi dibanding Bina Marga 2017, baik pada kondisi eksisting maupun alternatif 1 dan 2. Regangan horizontal dan vertikal pada tiap lapis perkerasan meningkat dari Bina Marga 2017 ke Bina Marga 2024. Kerusakan pertama terjadi pada kondisi regangan horizontal yaitu *permanent deformation*
3. Berdasarkan ketentuan Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024, didapatkan alternatif terbaik untuk perbaikan kerusakan dijalan Pakem – Kaliurang KM 17 – 19 dengan Bina Marga 2017 yaitu menggunakan alternatif 1 dengan jenis perkerasan AC-WC, AC-BC, AC Base, dan LFA kelas A, sedangkan alternatif terbaik untuk Bina Marga 2024 yaitu menggunakan alternatif 2 dengan jenis perkerasan AC-WC, AC-BC, AC Base, LFA kelas A,B dan C. Kedua alternatif terbaik dipilih karena memberikan kinerja yang optimal

dan memiliki umur pelayanan yang yang paling panjang serta memenuhi umur rencana perkerasan selama 20 tahun.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil dan kesimpulan yang telah didapatkan, maka terdapat beberapa saran untuk pihak terkait, dan untuk penelitian selanjutnya maupun yang akan mengembangkan penelitian ini.

1. Pada pihak terkait, disarankan penggunaan alternatif 2 dengan pedoman Bina Marga 2024 sebab memiliki kinerja terbaik dengan umur pelayanan yang tinggi. Dalam memilih jenis perkerasan harus memilih material dengan mutu yang tinggi karena akan mempengaruhi kinerja perkerasan. Dalam pemilihannya juga harus mempertimbangkan aspek *Life Cycle Cos*t atau efisiensi biaya.
2. Untuk penelitian selanjunya atau pengembangan penelitian, perlu dilakukan pengujian material berupa nilai CBR, modulus resilien, dan lainnya agar hasil yang didapatkan lebih akurat.
3. Disarankan untuk melakukan analisis dibantu dengan evaluasi menggunakan *software* WinJULEA agar mendapatkan hasil yang lebih optimal serta akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Adedeji, J. A., Abejide, S. O. & Hassan, M. M., 2022. Numerical Response Analysis Of Structural Strenght Capacity Of Fly-Ash-Inverted Pavement. *7th International Conferenceon Road And Rail Infrastructure,* Pp. 377-383.

Aji, Z. A. & Zaki, B. H., 2023. Evaluasi Tebal Perkerasan Jalan Menggunakan Program Software Kenpave. *Jurnal Rekayasa Lingkungan Terbangun Berkelanjutan Vol. 01, No.01,* 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,* Pp. 205-218.

Alfi, M., Utomo, S. & Suparma, L. B., 2024. Analisis Prediksi Umur Sisa Struktur Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Mekanistik - Empirik Pada Jalan Milir - Sentolo Ruas Timur. *Simposium Nasional Teknologi Infrastruktur,* Pp. 1-8.

Alkaissi, Z. A., 2020. Effect Of High Temperature And Traffic Loading On Rutting Performance Of Flexible Pavement. *Journal Of King Saud Univesity,* 32(8), Pp. 1-4.

Ariyanto, Umam, K. & Saputro, Y. A., 2021. Pengaruh Jumlah Kendaraan Terhadap Kerusakan Aspal Di Jl. Kh. Wahid Hasyim Bapangan Kabupaten Jepara. *Jurnal DISPROTEK,* Pp. 109-113.

Cahyono, M.W.B., Suparma, L. B. & Mulyono, A. T., 2022. Analisis Sisa Masa Layan Perkerasan Lentur Berdasarkan Prediksi Kerusakan Dengan Metode MEPDG Dan Prediksi Nilai Kondisi Perkerasan. *Ejournal Undip,* I(43), Pp. 93-101.

Badan Pusat Statistik Indonesia, 2025. *Proyeksi Jumlah Penduduk Menurut Kabupaten/Kota Di D.I. Yogyakarta (Jiwa), 2025*. [Online] Available At: Https://Yogyakarta.Bps.Go.Id/Id/Statistics-Table/2/Mtmzizi=/Jumlah-Penduduk-Menurut-Kabupaten-Kota-Di-Yogyakarta-.Html [Accessed 12 Januari 2025].

Bhattacharya, S., Taylor, R., D'Melo, D. & Campbell, C., 2024. Sustainable Design Of Pavements: Predicting Pavement Service Life. *Infrastructures,* Pp. 1-14.

Deng, Y. & Shi, X., 2023. Modeling The Rutting Performance Of Asphalt Pavements: A Review. *Journal Of Infrastructure Preservation And Resilience,* Pp. 1-21.

Dire*ktorat Jendral Bina Marga, 2017. Manual Desain Perkerasan Jalan (Revisi Juni 2017) Nomor 04/SE/Db/2017. Jakarta: S.N.*

Direktorat Jendral Bina Marga, 2024. Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 03/M/BM/2024. Jakarta: S.N.

Hadi, M. A., 2023. Identifikasi Kerentanan Kinerja Perkerasan Jalan Terhadap Aktivitasoverload Kendaraan Menggunakan Program KENPAVE. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil,* Pp. 95-104.

Hadi, M. A., 2024. Eksplorasi Dampak Perubahan Manual Desain Perkerasan Jalan (Mdpj) 2017 Ke 2024 Menggunakan Program Kenpave. *Wahana Teknik Sipil ,* Ii(2), Pp. 416-427.

Hargiansyah, A. N., Triana, M. I. & Hartatik, N., 2025. Analisis Metode Mdpj 2024 Dalam Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Pada Ruas Jalan Serah - Tebuwung. *Sniv: Seminar Nasional Inovasi Vokasi,* Iv(1), Pp. 1388-1398.

Hernandez, J., Li, F., Zhang, W., Kim, D., & Patel, R. 2024. Verification And Validation Of Pavement Models. *Journal Of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 150(4).

Hollila, S., Warsito, W. & Rokhmawati, A., 2023. Studi Elevasi Tebal Lapis Perkerasan Lentur Pada Ruas Jalan Smpang-Omben Kabupaten Sampang Madura Dengan Metode Bina Marga 2017 Menggunakan Program KENPAVE. *Jurnal Rekayasa Sipil,* 13(1).

Huang, Y. H., 2004. *Pavement Analysis And Design.* 2nd Ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall.

Interactive, P., 2021. *Elastic Modulus.* [Online]
Available At: Https://Pavementinteractive.Org/Reference-Desk/Design/Design-Parameters/Elastic-Modulus/ [Accessed 20 Maret 2025].

Jihanny , J., Rahman, A., Kusuma, R., Dewi, L. & Arifin, M. 2021. The Overload Impact On Design Life Of Flexible Pavement. *International Journal Of Geomate,* Xx(78), Pp. 65-72.

Nurumi, K.L., 2020. Evaluasi Kondisi Perkerasan Jalan Kaliurang KM 13 – KM 14 Berdasarkan Nilai PCI serta Perencanaan Penanganannya.
Tugas Akhir. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Kurniawan, D. & Hadi, M. A., 2024. Kolaborasi Metode Empiris Dan Mekanistik-Empiris Guna Identifikasi Dan Evaluasi Kinerja Perkerasan Jalan. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil,* 14(2), Pp. 373-386.

Lia, N. & Mahardi, P., 2022. Evaluasi Kinerja Struktur Perkerasan Jalan Lentur Menggunakan Aplikasi KENPAVE. *Jurnal Rekayasa Sipil,* 04(2), Pp. 1-10.

Lu, Y. & Hajj, R., 2021. Investigation Of Flexible Pavement Maintenance Patching Factors Using A Finite Element Model. *Journal Of Infrastructure Preservation And Resilience,* Pp. 1-16.

Marlina, E., Frans, J. H. & Nasjono, J. K., 2023. Analisis Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Bina Marga 2017 dan Program KENPAVE. *Jurnal Teknik Sipil,* 12(2), Pp. 173-183.

Natzan, W.F., Setiawan, M., Nugraha, Y., Ramadhani, F. & Pratama, R. 2024. Sensitivitas Nilai Modulus Elastisitas Campuran AC-BC (Asphalt Concrete Binder Course) Akibat Perubahan Temperatur Pengujian. *Jurnal Teknik Sipil MACCA,* IX(3), Pp. 237-246.

Pambudi, F., 2021. Evaluasi Perancangan Struktur Perkerasan Dengan Metode Bina Marga 2017 Dan Program KENPAVE Menggunakan Pendekatan Elastik Dan Viskoelastik. *Prosiding Seminar Nasional Hasil Penelitian Dan Pengabdian Masyarakat ,* Pp. 303-314.

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,* 9(2), Pp. 1102-1108.

Putri, E.E., Rahmawati, D.A., Nugroho, F.D., Santoso, L. & Suparman, B. 2022. Stormpav Pavement Using Different Wheel Loads. *Geomate Journal,* 22(89), Pp. 1-8.

QGIS, 2025. *Titik Lokasi Penelitian.* Yogyakarta: Qgis.

Roja, K. L., Yamani, H., Sadeq, M. & Masad, E., 2023. Analysis Of Performance Of Asphalt Pavements In Qatar Using Mechanistic-Empirical Approaches. *Elsevier,* Pp. 1-17.

Rojas, D. A. H. & Sandoval, C. H. H., 2020. Uencos De Deflexión 3d En Pavimento Flexible. *Ingenio Magno,* 11(2), Pp. 62-77.

Sekretariat Daerah Istimewa Yogyakarta, 2023. *Keputusan Gubernur Daerah Istimewa Yogyakarta N0 41/KEP/2023 Tentang Penetapan Ruas Jalan Menurut Statusnya Sebagai Jalan Provinsi.* Yogyakarta: S.N.

Sukirman , S., 1999. *Perkerasan Lentur Jalan Raya.* Bandung: Nova.

Syahroni, M. I., 2022. Prosedur Penelitian Kuantitatif. *Ejurnal Al Musthafa,* 2(3), Pp. 43-56.

U.S. Department Of Transportation, &. U. A. E. R. A. D. C., 2018. Evaluation Of Airfield Pavement Response Pavement Response Using PCASE With Winjulea (DOT/ERDC/CRREL Report). *National Transportation Library.*

Warsito, W. & Rokhmawati, A., 2023. Studi Evaluasi Tebal Lapis Perkerasan Lentur Pada Ruas Jalan Sampang-Omben Kabupaten Sampang Madura Dengan Metode Bina Marga 2017 Menggunakan Program Kenpave. *Ejurnal Rekayasa Sipil,* 13(1), Pp. 30-40.

Yang, S., Park, H. & Baek, C., 2023. Fatigue Cracking Characteristics Of Asphalt Pavement Structure Under Aging And Moisture Damage. *Sustainability,* Pp. 1-17.

Zariah, H., Noerhayati, E. & Bakhtiar, A., 2023. Evaluasi Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Bina Marga 2017 Pada Ruas Jalan Waibangga, Nusa Tenggara Timur (STA 0+ 000-STA10+ 000). *Jurnal Rekayasa Sipil (E-Journal),* 13(1), Pp. 80-89.

4.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Output WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017

*** LAYERS STRUCTURE

LAYER NUMBER	THICKNESS	MODULUS OF ELASTICITY	POISSON RATIO	INTERFACE CONDITION
1	3.00	1100000.00	0.40	0.00
2	6.00	1200000.00	0.40	0.00
3	8.00	1600000.00	0.40	0.00
4	30.00	220000.00	0.35	0.00
5		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	3.00
3	9.00
4	9.00
5	17.00
6	17.00
7	47.00
8	47.00
9	47.00

Lanjutan Lampiran 1 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017

```
*** 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    0.769E+03    0.710E+03    0.550E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
  0.241E-03    0.166E-03   -0.380E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.215E-02    0.504E-01
 0.769E+03    0.710E+03    0.550E+03    0.241E-03    0.166E-03   -0.380E-04    0.110E+03    0.677E+03    0.926E+02
   0.000E+00    0.000E+00    0.100E+02    0.660E+03    0.474E+03    0.550E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
  0.228E-03   -0.915E-05    0.875E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.729E-03    0.503E-01
 0.660E+03    0.550E+03    0.474E+03    0.228E-03    0.875E-04   -0.915E-05    0.932E+02    0.561E+03    0.765E+02
   0.000E+00    0.000E+00    0.165E+02    0.349E+03    0.197E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
  0.245E-03    0.526E-04   -0.199E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.483E-01
 0.349E+03    0.197E+03    0.284E-13    0.245E-03    0.526E-04   -0.199E-03    0.174E+03    0.182E+03    0.143E+03
   0.300E+01    0.000E+00    0.000E+00    0.512E+03    0.475E+03    0.534E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
  0.899E-04    0.473E-04    0.116E-03    0.000E+00   -0.301E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.145E-02    0.503E-01
 0.537E+03    0.512E+03    0.472E+03    0.119E-03    0.899E-04    0.442E-04    0.322E+02    0.507E+03    0.265E+02
   0.300E+01    0.000E+00    0.100E+02    0.385E+03    0.377E+03    0.333E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
  0.842E-04    0.748E-04    0.234E-04    0.000E+00    0.345E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.105E-02    0.502E-01
 0.504E+03    0.385E+03    0.205E+03    0.224E-03    0.842E-04   -0.126E-03    0.150E+03    0.365E+03    0.123E+03
   0.300E+01    0.000E+00    0.165E+02    0.272E+03    0.317E+03    0.105E+02    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
  0.118E-03    0.170E-03   -0.188E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.489E-01
 0.317E+03    0.272E+03    0.105E+02    0.170E-03    0.118E-03   -0.188E-03    0.153E+03    0.200E+03    0.135E+03
   0.900E+01    0.000E+00    0.000E+00    0.154E+03    0.158E+03    0.357E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
 -0.437E-04   -0.386E-04    0.194E-03    0.000E+00   -0.667E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.208E-03    0.492E-01
 0.361E+03    0.154E+03    0.154E+03    0.198E-03   -0.433E-04   -0.437E-04    0.104E+03    0.223E+03    0.978E+02
   0.900E+01    0.000E+00    0.100E+02    0.102E+03    0.153E+03    0.200E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
 -0.329E-04    0.267E-04    0.819E-04    0.000E+00    0.239E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.388E-03    0.498E-01
```

Lanjutan Lampiran 1 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017

```
0.281E+03   0.102E+03   0.712E+02   0.177E-03  -0.329E-04  -0.684E-04   0.105E+03   0.151E+03   0.928E+02
  0.900E+01   0.000E+00   0.165E+02   0.681E+02   0.152E+03   0.800E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.205E-04   0.773E-04  -0.672E-05   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.495E-01
0.152E+03   0.800E+02   0.681E+02   0.773E-04  -0.672E-05  -0.205E-04   0.419E+02   0.100E+03   0.370E+02
  0.900E+01   0.000E+00   0.000E+00   0.125E+03   0.131E+03   0.357E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.437E-04  -0.386E-04   0.159E-03   0.000E+00  -0.500E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.208E-03   0.492E-01
0.361E+03   0.128E+03   0.125E+03   0.162E-03  -0.417E-04  -0.437E-04   0.118E+03   0.205E+03   0.110E+03
  0.900E+01   0.000E+00   0.100E+02   0.910E+02   0.159E+03   0.200E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.329E-04   0.267E-04   0.625E-04   0.000E+00   0.179E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.388E-03   0.498E-01
0.284E+03   0.910E+02   0.751E+02   0.136E-03  -0.329E-04  -0.468E-04   0.104E+03   0.150E+03   0.950E+02
  0.900E+01   0.000E+00   0.165E+02   0.730E+02   0.185E+03   0.800E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.206E-04   0.772E-04  -0.145E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.495E-01
0.185E+03   0.800E+02   0.730E+02   0.772E-04  -0.145E-04  -0.206E-04   0.559E+02   0.113E+03   0.511E+02
  0.170E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.463E+03  -0.376E+03   0.117E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.225E-03  -0.148E-03   0.283E-03   0.000E+00  -0.318E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.149E-02   0.476E-01
0.118E+03  -0.376E+03  -0.463E+03   0.283E-03  -0.149E-03  -0.225E-03   0.290E+03  -0.241E+03   0.256E+03
  0.170E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.414E+03  -0.239E+03   0.104E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.225E-03  -0.718E-04   0.229E-03   0.000E+00   0.636E-05   0.000E+00   0.000E+00  -0.293E-03   0.487E-01
0.104E+03  -0.239E+03  -0.414E+03   0.229E-03  -0.718E-04  -0.225E-03   0.259E+03  -0.183E+03   0.215E+03
  0.170E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.379E+03  -0.162E+03   0.951E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.220E-03  -0.304E-04   0.195E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.487E-01
0.951E+02  -0.162E+03  -0.379E+03   0.195E-03  -0.304E-04  -0.220E-03   0.237E+03  -0.149E+03   0.194E+03
  0.170E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.639E+01   0.603E+01   0.117E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.225E-03  -0.148E-03   0.532E-03   0.000E+00  -0.223E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.149E-02   0.476E-01
0.120E+03   0.312E+01  -0.639E+01   0.550E-03  -0.166E-03  -0.225E-03   0.631E+02   0.389E+02   0.574E+02
  0.170E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.667E+01   0.184E+02   0.104E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.225E-03  -0.715E-04   0.455E-03   0.000E+00   0.443E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.293E-03   0.487E-01
0.104E+03   0.183E+02  -0.667E+01   0.456E-03  -0.725E-04  -0.225E-03   0.555E+02   0.387E+02   0.476E+02
  0.170E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.660E+01   0.242E+02   0.953E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.220E-03  -0.312E-04   0.405E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.488E-01
0.953E+02   0.242E+02  -0.660E+01   0.405E-03  -0.312E-04  -0.220E-03   0.510E+02   0.376E+02   0.427E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.483E+02  -0.404E+02   0.259E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.197E-03  -0.148E-03   0.259E-03   0.000E+00  -0.506E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.268E-02   0.381E-01
0.262E+02  -0.407E+02  -0.483E+02   0.261E-03  -0.150E-03  -0.197E-03   0.372E+02  -0.209E+02   0.335E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.516E+02  -0.450E+02   0.277E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.207E-03  -0.167E-03   0.279E-03   0.000E+00  -0.206E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.110E-02   0.392E-01
0.277E+02  -0.451E+02  -0.516E+02   0.280E-03  -0.167E-03  -0.207E-03   0.397E+02  -0.230E+02   0.359E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.522E+02  -0.458E+02   0.280E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 1 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2017

```
-0.209E-03  -0.170E-03   0.283E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.394E-01
0.280E+02  -0.458E+02  -0.522E+02   0.283E-03  -0.170E-03  -0.209E-03   0.401E+02  -0.234E+02   0.364E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.140E+01   0.342E+01   0.259E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.197E-03  -0.148E-03   0.396E-03   0.000E+00  -0.199E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.268E-02   0.381E-01
0.266E+02   0.268E+01   0.140E+01   0.413E-03  -0.166E-03  -0.197E-03   0.126E+02   0.102E+02   0.116E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.141E+01   0.308E+01   0.277E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.207E-03  -0.167E-03   0.427E-03   0.000E+00  -0.814E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.110E-02   0.392E-01
0.278E+02   0.296E+01   0.141E+01   0.430E-03  -0.169E-03  -0.207E-03   0.132E+02   0.107E+02   0.121E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.141E+01   0.302E+01   0.280E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.209E-03  -0.170E-03   0.433E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.394E-01
0.280E+02   0.302E+01   0.141E+01   0.433E-03  -0.170E-03  -0.209E-03   0.133E+02   0.108E+02   0.122E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.140E+01   0.342E+01   0.259E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.197E-03  -0.148E-03   0.396E-03   0.000E+00  -0.199E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.268E-02   0.381E-01
0.266E+02   0.268E+01   0.140E+01   0.413E-03  -0.166E-03  -0.197E-03   0.126E+02   0.102E+02   0.116E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.141E+01   0.308E+01   0.277E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.207E-03  -0.167E-03   0.427E-03   0.000E+00  -0.814E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.110E-02   0.392E-01
0.278E+02   0.296E+01   0.141E+01   0.430E-03  -0.169E-03  -0.207E-03   0.132E+02   0.107E+02   0.121E+02
  0.470E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.141E+01   0.302E+01   0.280E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.209E-03  -0.170E-03   0.433E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.394E-01
0.280E+02   0.302E+01   0.141E+01   0.433E-03  -0.170E-03  -0.209E-03   0.133E+02   0.108E+02   0.122E+02
```

Lampiran 2 Output WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024

*** LAYERS STRUCTURE

LAYER NUMBER	THICKNESS	MODULUS OF ELASTICITY	POISSON RATIO	INTERFACE CONDITION
1	3.00	1100000.00	0.40	0.00
2	6.00	1200000.00	0.40	0.00
3	8.00	1500000.00	0.40	0.00
4	30.00	220000.00	0.35	0.00
5		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	3.00
3	9.00
4	9.00
5	17.00
6	17.00
7	47.00
8	47.00
9	47.00

Lanjutan Lampiran 2 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024

```
*** 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    0.776E+03    0.717E+03    0.550E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.245E-03    0.169E-03   -0.428E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.215E-02    0.507E-01
0.776E+03    0.717E+03    0.550E+03    0.245E-03    0.169E-03   -0.428E-04    0.113E+03    0.681E+03    0.957E+02
   0.000E+00    0.000E+00    0.100E+02    0.664E+03    0.474E+03    0.550E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.231E-03   -0.103E-04    0.861E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.712E-03    0.505E-01
0.664E+03    0.550E+03    0.474E+03    0.231E-03    0.861E-04   -0.103E-04    0.949E+02    0.563E+03    0.780E+02
   0.000E+00    0.000E+00    0.165E+02    0.351E+03    0.194E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.248E-03    0.492E-04   -0.198E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.485E-01
0.351E+03    0.194E+03    0.284E-13    0.248E-03    0.492E-04   -0.198E-03    0.175E+03    0.182E+03    0.143E+03
   0.300E+01    0.000E+00    0.000E+00    0.512E+03    0.475E+03    0.533E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.903E-04    0.479E-04    0.115E-03    0.000E+00   -0.296E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.144E-02    0.505E-01
0.536E+03    0.512E+03    0.473E+03    0.118E-03    0.903E-04    0.448E-04    0.315E+02    0.507E+03    0.260E+02
   0.300E+01    0.000E+00    0.100E+02    0.384E+03    0.375E+03    0.333E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.843E-04    0.738E-04    0.239E-04    0.000E+00    0.349E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.104E-02    0.504E-01
0.505E+03    0.384E+03    0.203E+03    0.225E-03    0.843E-04   -0.128E-03    0.151E+03    0.364E+03    0.124E+03
   0.300E+01    0.000E+00    0.165E+02    0.272E+03    0.314E+03    0.110E+02    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.118E-03    0.168E-03   -0.186E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.491E-01
0.314E+03    0.272E+03    0.110E+02    0.168E-03    0.118E-03   -0.186E-03    0.152E+03    0.199E+03    0.134E+03
   0.900E+01    0.000E+00    0.000E+00    0.138E+03    0.144E+03    0.355E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 2 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024

```
-0.513E-04  -0.443E-04   0.202E-03   0.000E+00  -0.658E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.181E-03   0.494E-01
0.358E+03   0.140E+03   0.138E+03   0.206E-03  -0.486E-04  -0.513E-04   0.110E+03   0.212E+03   0.103E+03
   0.900E+01   0.000E+00   0.100E+02   0.910E+02   0.148E+03   0.200E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.400E-04   0.262E-04   0.869E-04   0.000E+00   0.236E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.399E-03   0.500E-01
0.278E+03   0.910E+02   0.694E+02   0.178E-03  -0.400E-04  -0.653E-04   0.104E+03   0.146E+03   0.937E+02
   0.900E+01   0.000E+00   0.165E+02   0.618E+02   0.154E+03   0.817E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.269E-04   0.801E-04  -0.370E-05   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.497E-01
0.154E+03   0.817E+02   0.618E+02   0.801E-04  -0.370E-05  -0.269E-04   0.459E+02   0.991E+02   0.394E+02
   0.900E+01   0.000E+00   0.000E+00   0.113E+03   0.121E+03   0.355E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.513E-04  -0.443E-04   0.174E-03   0.000E+00  -0.526E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.181E-03   0.494E-01
0.358E+03   0.117E+03   0.113E+03   0.177E-03  -0.474E-04  -0.513E-04   0.122E+03   0.196E+03   0.114E+03
   0.900E+01   0.000E+00   0.100E+02   0.805E+02   0.151E+03   0.200E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.400E-04   0.262E-04   0.714E-04   0.000E+00   0.189E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.399E-03   0.500E-01
0.280E+03   0.805E+02   0.716E+02   0.146E-03  -0.400E-04  -0.483E-04   0.104E+03   0.144E+03   0.960E+02
   0.900E+01   0.000E+00   0.165E+02   0.636E+02   0.178E+03   0.817E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.269E-04   0.801E-04  -0.100E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.497E-01
0.178E+03   0.817E+02   0.636E+02   0.801E-04  -0.100E-04  -0.269E-04   0.573E+02   0.108E+03   0.503E+02
   0.170E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.439E+03  -0.355E+03   0.119E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.230E-03  -0.151E-03   0.291E-03   0.000E+00  -0.344E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.151E-02   0.477E-01
0.119E+03  -0.356E+03  -0.439E+03   0.292E-03  -0.152E-03  -0.230E-03   0.279E+03  -0.225E+03   0.246E+03
   0.170E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.393E+03  -0.224E+03   0.105E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.230E-03  -0.726E-04   0.235E-03   0.000E+00   0.719E-05   0.000E+00   0.000E+00  -0.293E-03   0.489E-01
0.105E+03  -0.224E+03  -0.393E+03   0.235E-03  -0.726E-04  -0.230E-03   0.249E+03  -0.170E+03   0.207E+03
   0.170E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.359E+03  -0.150E+03   0.960E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.225E-03  -0.300E-04   0.200E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.489E-01
0.960E+02  -0.150E+03  -0.359E+03   0.200E-03  -0.300E-04  -0.225E-03   0.227E+03  -0.138E+03   0.186E+03
   0.170E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.706E+01   0.566E+01   0.119E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.230E-03  -0.152E-03   0.541E-03   0.000E+00  -0.226E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.151E-02   0.477E-01
0.121E+03   0.273E+01  -0.706E+01   0.559E-03  -0.170E-03  -0.230E-03   0.643E+02   0.390E+02   0.584E+02
   0.170E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.736E+01   0.184E+02   0.105E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.230E-03  -0.723E-04   0.461E-03   0.000E+00   0.470E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.293E-03   0.489E-01
0.106E+03   0.182E+02  -0.736E+01   0.462E-03  -0.734E-04  -0.230E-03   0.565E+02   0.388E+02   0.483E+02
   0.170E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.729E+01   0.243E+02   0.962E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.225E-03  -0.308E-04   0.410E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.489E-01
0.962E+02   0.243E+02  -0.729E+01   0.410E-03  -0.308E-04  -0.225E-03   0.517E+02   0.377E+02   0.433E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.486E+02  -0.406E+02   0.260E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 2 *Output* WinJULEA untuk Perkerasan Eksisting Bina Marga 2024

```
-0.198E-03  -0.149E-03   0.260E-03   0.000E+00  -0.509E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.270E-02   0.381E-01
0.263E+02  -0.409E+02  -0.486E+02   0.262E-03  -0.150E-03  -0.198E-03   0.375E+02  -0.211E+02   0.336E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.520E+02  -0.453E+02   0.278E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.208E-03  -0.167E-03   0.281E-03   0.000E+00  -0.207E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.110E-02   0.392E-01
0.278E+02  -0.453E+02  -0.520E+02   0.281E-03  -0.168E-03  -0.208E-03   0.399E+02  -0.232E+02   0.361E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.526E+02  -0.461E+02   0.281E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.210E-03  -0.171E-03   0.285E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.394E-01
0.281E+02  -0.461E+02  -0.526E+02   0.285E-03  -0.171E-03  -0.210E-03   0.403E+02  -0.235E+02   0.366E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.137E+01   0.340E+01   0.260E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.198E-03  -0.149E-03   0.398E-03   0.000E+00  -0.201E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.270E-02   0.381E-01
0.267E+02   0.266E+01   0.137E+01   0.416E-03  -0.166E-03  -0.198E-03   0.127E+02   0.103E+02   0.117E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.137E+01   0.306E+01   0.278E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.208E-03  -0.168E-03   0.429E-03   0.000E+00  -0.820E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.110E-02   0.392E-01
0.279E+02   0.294E+01   0.137E+01   0.432E-03  -0.170E-03  -0.208E-03   0.133E+02   0.107E+02   0.121E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.137E+01   0.300E+01   0.281E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.210E-03  -0.171E-03   0.435E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.394E-01
0.281E+02   0.300E+01   0.137E+01   0.435E-03  -0.171E-03  -0.210E-03   0.134E+02   0.108E+02   0.122E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.137E+01   0.340E+01   0.260E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.198E-03  -0.149E-03   0.398E-03   0.000E+00  -0.201E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.270E-02   0.381E-01
0.267E+02   0.266E+01   0.137E+01   0.416E-03  -0.166E-03  -0.198E-03   0.127E+02   0.103E+02   0.117E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.137E+01   0.306E+01   0.278E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.208E-03  -0.168E-03   0.429E-03   0.000E+00  -0.820E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.110E-02   0.392E-01
0.279E+02   0.294E+01   0.137E+01   0.432E-03  -0.170E-03  -0.208E-03   0.133E+02   0.107E+02   0.121E+02
   0.470E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.137E+01   0.300E+01   0.281E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.210E-03  -0.171E-03   0.435E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.394E-01
0.281E+02   0.300E+01   0.137E+01   0.435E-03  -0.171E-03  -0.210E-03   0.134E+02   0.108E+02   0.122E+02
```

Lampiran 3 Output WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017

*** 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	16.00	1600000.00	0.40	0.00
4	30.00	220000.00	0.35	0.00
5		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	26.00
6	26.00
7	56.00
8	56.00
9	56.00

Lanjutan Lampiran 3 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017

```
*** 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    0.636E+03    0.607E+03    0.550E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.158E-03    0.121E-03    0.478E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.158E-02    0.410E-01
0.636E+03    0.607E+03    0.550E+03    0.158E-03    0.121E-03    0.478E-04    0.432E+02    0.598E+03    0.359E+02
   0.000E+00    0.000E+00    0.100E+02    0.529E+03    0.387E+03    0.550E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.140E-03   -0.405E-04    0.167E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.551E-03    0.402E-01
0.550E+03    0.529E+03    0.387E+03    0.167E-03    0.140E-03   -0.405E-04    0.815E+02    0.489E+03    0.724E+02
   0.000E+00    0.000E+00    0.165E+02    0.219E+03    0.118E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.156E-03    0.273E-04   -0.122E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.381E-01
0.219E+03    0.118E+03    0.142E-13    0.156E-03    0.273E-04   -0.122E-03    0.110E+03    0.112E+03    0.895E+02
   0.400E+01    0.000E+00    0.000E+00    0.375E+03    0.361E+03    0.530E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.160E-04   -0.803E-06    0.196E-03    0.000E+00   -0.273E-04    0.000E+00    0.000E+00    0.104E-02    0.404E-01
0.530E+03    0.375E+03    0.360E+03    0.197E-03    0.160E-04   -0.175E-05    0.851E+02    0.422E+03    0.769E+02
   0.400E+01    0.000E+00    0.100E+02    0.264E+03    0.309E+03    0.306E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.152E-04    0.676E-04    0.638E-04    0.000E+00    0.317E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.979E-03    0.398E-01
0.444E+03    0.264E+03    0.172E+03    0.224E-03    0.152E-04   -0.928E-04    0.136E+03    0.293E+03    0.113E+03
   0.400E+01    0.000E+00    0.165E+02    0.184E+03    0.291E+03    0.249E+02    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
0.483E-04    0.173E-03   -0.137E-03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00    0.387E-01
0.291E+03    0.184E+03    0.249E+02    0.173E-03    0.483E-04   -0.137E-03    0.133E+03    0.167E+03    0.109E+03
   0.100E+02    0.000E+00    0.000E+00    0.150E+03    0.152E+03    0.374E+03    0.000E+00    0.000E+00    0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 3 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017

```
-0.379E-04  -0.358E-04   0.158E-03   0.000E+00  -0.454E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.389E-03   0.391E-01
0.377E+03   0.150E+03   0.149E+03   0.161E-03  -0.379E-04  -0.384E-04   0.114E+03   0.225E+03   0.107E+03
   0.100E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.124E+03   0.198E+03   0.208E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.239E-04   0.407E-04   0.496E-04   0.000E+00   0.138E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.477E-03   0.394E-01
0.282E+03   0.124E+03   0.124E+03   0.114E-03  -0.239E-04  -0.242E-04   0.792E+02   0.177E+03   0.746E+02
   0.100E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.110E+03   0.228E+03   0.956E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.121E-04   0.912E-04  -0.249E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.391E-01
0.228E+03   0.110E+03   0.956E+02   0.912E-04  -0.121E-04  -0.249E-04   0.664E+02   0.145E+03   0.594E+02
   0.100E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.150E+03   0.152E+03   0.374E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.379E-04  -0.358E-04   0.158E-03   0.000E+00  -0.454E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.389E-03   0.391E-01
0.377E+03   0.150E+03   0.149E+03   0.161E-03  -0.379E-04  -0.384E-04   0.114E+03   0.225E+03   0.107E+03
   0.100E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.124E+03   0.198E+03   0.208E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.239E-04   0.407E-04   0.496E-04   0.000E+00   0.138E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.477E-03   0.394E-01
0.282E+03   0.124E+03   0.124E+03   0.114E-03  -0.239E-04  -0.242E-04   0.792E+02   0.177E+03   0.746E+02
   0.100E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.110E+03   0.228E+03   0.956E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.121E-04   0.912E-04  -0.249E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.391E-01
0.228E+03   0.110E+03   0.956E+02   0.912E-04  -0.121E-04  -0.249E-04   0.664E+02   0.145E+03   0.594E+02
   0.260E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.106E+02  -0.284E+01   0.597E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.139E-03  -0.912E-04   0.293E-03   0.000E+00  -0.154E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.135E-02   0.369E-01
0.622E+02  -0.527E+01  -0.106E+02   0.308E-03  -0.106E-03  -0.139E-03   0.364E+02   0.154E+02   0.331E+02
   0.260E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.112E+02  -0.201E+00   0.597E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.145E-03  -0.781E-04   0.289E-03   0.000E+00  -0.311E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.472E-03   0.379E-01
0.598E+02  -0.308E+00  -0.112E+02   0.290E-03  -0.787E-04  -0.145E-03   0.355E+02   0.161E+02   0.312E+02
   0.260E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.112E+02   0.116E+01   0.583E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.146E-03  -0.696E-04   0.281E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.380E-01
0.583E+02   0.116E+01  -0.112E+02   0.281E-03  -0.696E-04  -0.146E-03   0.348E+02   0.161E+02   0.303E+02
   0.260E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.106E+02  -0.284E+01   0.597E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.139E-03  -0.912E-04   0.293E-03   0.000E+00  -0.154E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.135E-02   0.369E-01
0.622E+02  -0.527E+01  -0.106E+02   0.308E-03  -0.106E-03  -0.139E-03   0.364E+02   0.154E+02   0.331E+02
   0.260E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.112E+02  -0.201E+00   0.597E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.145E-03  -0.781E-04   0.289E-03   0.000E+00  -0.311E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.472E-03   0.379E-01
0.598E+02  -0.308E+00  -0.112E+02   0.290E-03  -0.787E-04  -0.145E-03   0.355E+02   0.161E+02   0.312E+02
   0.260E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.112E+02   0.116E+01   0.583E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.146E-03  -0.696E-04   0.281E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.380E-01
0.583E+02   0.116E+01  -0.112E+02   0.281E-03  -0.696E-04  -0.146E-03   0.348E+02   0.161E+02   0.303E+02
   0.560E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.989E+00   0.199E+01   0.172E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 3 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2017

```
-0.127E-03  -0.103E-03   0.264E-03   0.000E+00  -0.119E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.185E-02   0.310E-01
0.176E+02   0.160E+01   0.989E+00   0.274E-03  -0.113E-03  -0.127E-03   0.830E+01   0.673E+01   0.769E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.979E+00   0.173E+01   0.181E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.133E-03  -0.114E-03   0.282E-03   0.000E+00  -0.488E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.751E-03   0.317E-01
0.182E+02   0.167E+01   0.979E+00   0.283E-03  -0.116E-03  -0.133E-03   0.860E+01   0.695E+01   0.795E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.976E+00   0.169E+01   0.183E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.134E-03  -0.116E-03   0.285E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.318E-01
0.183E+02   0.169E+01   0.976E+00   0.285E-03  -0.116E-03  -0.134E-03   0.866E+01   0.699E+01   0.800E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.989E+00   0.199E+01   0.172E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.127E-03  -0.103E-03   0.264E-03   0.000E+00  -0.119E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.185E-02   0.310E-01
0.176E+02   0.160E+01   0.989E+00   0.274E-03  -0.113E-03  -0.127E-03   0.830E+01   0.673E+01   0.769E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.979E+00   0.173E+01   0.181E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.133E-03  -0.114E-03   0.282E-03   0.000E+00  -0.488E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.751E-03   0.317E-01
0.182E+02   0.167E+01   0.979E+00   0.283E-03  -0.116E-03  -0.133E-03   0.860E+01   0.695E+01   0.795E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.976E+00   0.169E+01   0.183E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.134E-03  -0.116E-03   0.285E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.318E-01
0.183E+02   0.169E+01   0.976E+00   0.285E-03  -0.116E-03  -0.134E-03   0.866E+01   0.699E+01   0.800E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.989E+00   0.199E+01   0.172E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.127E-03  -0.103E-03   0.264E-03   0.000E+00  -0.119E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.185E-02   0.310E-01
0.176E+02   0.160E+01   0.989E+00   0.274E-03  -0.113E-03  -0.127E-03   0.830E+01   0.673E+01   0.769E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.979E+00   0.173E+01   0.181E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.133E-03  -0.114E-03   0.282E-03   0.000E+00  -0.488E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.751E-03   0.317E-01
0.182E+02   0.167E+01   0.979E+00   0.283E-03  -0.116E-03  -0.133E-03   0.860E+01   0.695E+01   0.795E+01
   0.560E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.976E+00   0.169E+01   0.183E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.134E-03  -0.116E-03   0.285E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.318E-01
0.183E+02   0.169E+01   0.976E+00   0.285E-03  -0.116E-03  -0.134E-03   0.866E+01   0.699E+01   0.800E+01
```

Lampiran 4 Output WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017

*** 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	7.50	1600000.00	0.40	0.00
4	15.00	500000.00	0.20	0.00
5	15.00	2200000.00	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	18.00
6	18.00
7	33.00
8	48.00
9	48.00

Lanjutan Lampiran 4 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017

```
*** 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   0.611E+03   0.584E+03   0.550E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.143E-03   0.109E-03   0.654E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.120E-02   0.348E-01
0.611E+03   0.584E+03   0.550E+03   0.143E-03   0.109E-03   0.654E-04   0.304E+02   0.582E+03   0.249E+02
   0.000E+00   0.000E+00   0.100E+02   0.492E+03   0.344E+03   0.550E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.123E-03  -0.667E-04   0.196E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.358E-03   0.336E-01
0.550E+03   0.492E+03   0.344E+03   0.196E-03   0.123E-03  -0.667E-04   0.103E+03   0.462E+03   0.870E+02
   0.000E+00   0.000E+00   0.165E+02   0.179E+03   0.672E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.139E-03  -0.414E-05  -0.896E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.314E-01
0.179E+03   0.672E+02   0.142E-13   0.139E-03  -0.414E-05  -0.896E-04   0.896E+02   0.821E+02   0.739E+02
   0.400E+01   0.000E+00   0.000E+00   0.351E+03   0.340E+03   0.527E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.333E-05  -0.879E-05   0.208E-03   0.000E+00  -0.164E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.798E-03   0.341E-01
0.527E+03   0.351E+03   0.340E+03   0.209E-03   0.333E-05  -0.910E-05   0.934E+02   0.406E+03   0.856E+02
   0.400E+01   0.000E+00   0.100E+02   0.234E+03   0.277E+03   0.306E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.706E-06   0.506E-04   0.849E-04   0.000E+00   0.331E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.855E-03   0.331E-01
0.434E+03   0.234E+03   0.149E+03   0.234E-03   0.706E-06  -0.989E-04   0.143E+03   0.272E+03   0.120E+03
   0.400E+01   0.000E+00   0.165E+02   0.152E+03   0.254E+03   0.267E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.332E-04   0.152E-03  -0.113E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.319E-01
0.254E+03   0.152E+03   0.267E+02   0.152E-03   0.332E-04  -0.113E-03   0.114E+03   0.144E+03   0.931E+02
```

Lanjutan Lampiran 4 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017

```
   0.100E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.126E+03   0.137E+03   0.361E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.461E-04  -0.361E-04   0.160E-03   0.000E+00  -0.289E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.291E-03   0.328E-01
0.363E+03   0.136E+03   0.126E+03   0.161E-03  -0.372E-04  -0.461E-04   0.119E+03   0.208E+03   0.109E+03
   0.100E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.995E+02   0.177E+03   0.212E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.350E-04   0.330E-04   0.630E-04   0.000E+00   0.157E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.415E-03   0.326E-01
0.286E+03   0.103E+03   0.995E+02   0.128E-03  -0.319E-04  -0.350E-04   0.931E+02   0.163E+03   0.870E+02
   0.100E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.861E+02   0.206E+03   0.106E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.241E-04   0.805E-04  -0.665E-05   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.322E-01
0.206E+03   0.106E+03   0.861E+02   0.805E-04  -0.665E-05  -0.241E-04   0.598E+02   0.133E+03   0.523E+02
   0.100E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.126E+03   0.137E+03   0.361E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.461E-04  -0.361E-04   0.160E-03   0.000E+00  -0.289E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.291E-03   0.328E-01
0.363E+03   0.136E+03   0.126E+03   0.161E-03  -0.372E-04  -0.461E-04   0.119E+03   0.208E+03   0.109E+03
   0.100E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.995E+02   0.177E+03   0.212E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.350E-04   0.330E-04   0.630E-04   0.000E+00   0.157E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.415E-03   0.326E-01
0.286E+03   0.103E+03   0.995E+02   0.128E-03  -0.319E-04  -0.350E-04   0.931E+02   0.163E+03   0.870E+02
   0.100E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.861E+02   0.206E+03   0.106E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.241E-04   0.805E-04  -0.665E-05   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.322E-01
0.206E+03   0.106E+03   0.861E+02   0.805E-04  -0.665E-05  -0.241E-04   0.598E+02   0.133E+03   0.523E+02
   0.180E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.161E+02  -0.114E+01   0.161E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.961E-04  -0.603E-04   0.329E-03   0.000E+00  -0.108E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.300E-03   0.315E-01
0.164E+03  -0.422E+01  -0.161E+02   0.336E-03  -0.677E-04  -0.961E-04   0.901E+02   0.479E+02   0.823E+02
   0.180E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.152E+02   0.217E+02   0.136E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.937E-04  -0.499E-05   0.270E-03   0.000E+00   0.461E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.838E-04   0.319E-01
0.137E+03   0.209E+02  -0.152E+02   0.272E-03  -0.690E-05  -0.937E-04   0.762E+02   0.476E+02   0.650E+02
   0.180E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.143E+02   0.326E+02   0.121E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.898E-04   0.226E-04   0.234E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.318E-01
0.121E+03   0.326E+02  -0.143E+02   0.234E-03   0.226E-04  -0.898E-04   0.674E+02   0.463E+02   0.559E+02
   0.180E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.161E+02  -0.114E+01   0.161E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.961E-04  -0.603E-04   0.329E-03   0.000E+00  -0.108E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.300E-03   0.315E-01
0.164E+03  -0.422E+01  -0.161E+02   0.336E-03  -0.677E-04  -0.961E-04   0.901E+02   0.479E+02   0.823E+02
   0.180E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.152E+02   0.217E+02   0.136E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.937E-04  -0.499E-05   0.270E-03   0.000E+00   0.461E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.838E-04   0.319E-01
0.137E+03   0.209E+02  -0.152E+02   0.272E-03  -0.690E-05  -0.937E-04   0.762E+02   0.476E+02   0.650E+02
   0.180E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.143E+02   0.326E+02   0.121E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.898E-04   0.226E-04   0.234E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.318E-01
0.121E+03   0.326E+02  -0.143E+02   0.234E-03   0.226E-04  -0.898E-04   0.674E+02   0.463E+02   0.559E+02
```

Lanjutan Lampiran 4 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2017

```
   0.330E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.318E+01   0.666E+00   0.597E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.110E-04  -0.869E-05   0.275E-04   0.000E+00  -0.294E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.124E-03   0.285E-01
0.682E+02  -0.318E+01  -0.785E+01   0.327E-04  -0.110E-04  -0.139E-04   0.380E+02   0.191E+02   0.348E+02
   0.330E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.155E+01   0.536E+01   0.615E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.113E-04  -0.710E-05   0.274E-04   0.000E+00  -0.970E-05   0.000E+00   0.000E+00  -0.432E-04   0.291E-01
0.626E+02   0.427E+01  -0.155E+01   0.280E-04  -0.777E-05  -0.113E-04   0.321E+02   0.218E+02   0.290E+02
   0.330E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.128E+01   0.677E+01   0.608E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.113E-04  -0.640E-05   0.268E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.292E-01
0.608E+02   0.677E+01  -0.128E+01   0.268E-04  -0.640E-05  -0.113E-04   0.311E+02   0.221E+02   0.276E+02
   0.480E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.451E+01   0.522E+01   0.144E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.719E-04  -0.547E-04   0.167E-03   0.000E+00  -0.736E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.989E-03   0.277E-01
0.146E+02   0.498E+01   0.451E+01   0.173E-03  -0.607E-04  -0.719E-04   0.506E+01   0.804E+01   0.467E+01
   0.480E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.469E+01   0.527E+01   0.152E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.755E-04  -0.614E-04   0.179E-03   0.000E+00  -0.302E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.404E-03   0.283E-01
0.152E+02   0.523E+01   0.469E+01   0.180E-03  -0.623E-04  -0.755E-04   0.528E+01   0.839E+01   0.486E+01
   0.480E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.472E+01   0.528E+01   0.154E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.762E-04  -0.626E-04   0.181E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.284E-01
0.154E+02   0.528E+01   0.472E+01   0.181E-03  -0.626E-04  -0.762E-04   0.532E+01   0.845E+01   0.489E+01
   0.480E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.451E+01   0.522E+01   0.144E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.719E-04  -0.547E-04   0.167E-03   0.000E+00  -0.736E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.989E-03   0.277E-01
0.146E+02   0.498E+01   0.451E+01   0.173E-03  -0.607E-04  -0.719E-04   0.506E+01   0.804E+01   0.467E+01
   0.480E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.469E+01   0.527E+01   0.152E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.755E-04  -0.614E-04   0.179E-03   0.000E+00  -0.302E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.404E-03   0.283E-01
0.152E+02   0.523E+01   0.469E+01   0.180E-03  -0.623E-04  -0.755E-04   0.528E+01   0.839E+01   0.486E+01
   0.480E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.472E+01   0.528E+01   0.154E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.762E-04  -0.626E-04   0.181E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.284E-01
0.154E+02   0.528E+01   0.472E+01   0.181E-03  -0.626E-04  -0.762E-04   0.532E+01   0.845E+01   0.489E+01
```

Lampiran 5 Output WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024

*** LAYERS STRUCTURE

LAYER NUMBER	THICKNESS	MODULUS OF ELASTICITY	POISSON RATIO	INTERFACE CONDITION
1	5.00	1100000.00	0.40	0.00
2	8.00	1200000.00	0.40	0.00
3	15.00	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	5.00
3	13.00
4	13.00
5	28.00
6	43.00
7	63.00
8	63.00

Lanjutan Lampiran 5 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024

```
*** 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   0.763E+03   0.713E+03   0.550E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.234E-03   0.171E-03  -0.367E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.186E-02   0.474E-01
0.763E+03   0.713E+03   0.550E+03   0.234E-03   0.171E-03  -0.367E-04   0.106E+03   0.675E+03   0.909E+02
   0.000E+00   0.000E+00   0.100E+02   0.631E+03   0.436E+03   0.550E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.215E-03  -0.330E-04   0.112E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.508E-03   0.467E-01
0.631E+03   0.550E+03   0.436E+03   0.215E-03   0.112E-03  -0.330E-04   0.974E+02   0.539E+03   0.799E+02
   0.000E+00   0.000E+00   0.165E+02   0.305E+03   0.136E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.228E-03   0.129E-04  -0.161E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.445E-01
0.305E+03   0.136E+03   0.000E+00   0.228E-03   0.129E-04  -0.161E-03   0.153E+03   0.147E+03   0.125E+03
   0.500E+01   0.000E+00   0.000E+00   0.321E+03   0.309E+03   0.486E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.286E-05  -0.117E-04   0.195E-03   0.000E+00  -0.336E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.872E-03   0.469E-01
0.487E+03   0.321E+03   0.308E+03   0.196E-03   0.286E-05  -0.131E-04   0.898E+02   0.372E+03   0.816E+02
   0.500E+01   0.000E+00   0.100E+02   0.231E+03   0.279E+03   0.277E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.720E-05   0.629E-04   0.609E-04   0.000E+00   0.341E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.870E-03   0.464E-01
0.424E+03   0.231E+03   0.131E+03   0.233E-03   0.720E-05  -0.109E-03   0.146E+03   0.262E+03   0.121E+03
   0.500E+01   0.000E+00   0.165E+02   0.173E+03   0.278E+03   0.446E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.361E-04   0.160E-03  -0.113E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.453E-01
0.278E+03   0.173E+03   0.446E+02   0.160E-03   0.361E-04  -0.113E-03   0.117E+03   0.165E+03   0.956E+02
   0.130E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.390E+02  -0.204E+02   0.228E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 5 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024

```
-0.161E-03  -0.116E-03   0.479E-03   0.000E+00  -0.129E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.500E-03   0.450E-01
0.231E+03  -0.232E+02  -0.390E+02   0.486E-03  -0.123E-03  -0.161E-03   0.135E+03   0.561E+02   0.123E+03
   0.130E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.380E+02   0.221E+02   0.159E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.148E-03  -0.399E-05   0.324E-03   0.000E+00   0.161E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.240E-03   0.455E-01
0.166E+03   0.143E+02  -0.380E+02   0.342E-03  -0.227E-04  -0.148E-03   0.102E+03   0.476E+02   0.867E+02
   0.130E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.358E+02   0.458E+02   0.116E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.136E-03   0.594E-04   0.228E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.453E-01
0.116E+03   0.458E+02  -0.358E+02   0.228E-03   0.594E-04  -0.136E-03   0.760E+02   0.421E+02   0.621E+02
   0.130E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.390E+02  -0.204E+02   0.228E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.161E-03  -0.116E-03   0.479E-03   0.000E+00  -0.129E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.500E-03   0.450E-01
0.231E+03  -0.232E+02  -0.390E+02   0.486E-03  -0.123E-03  -0.161E-03   0.135E+03   0.561E+02   0.123E+03
   0.130E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.380E+02   0.221E+02   0.159E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.148E-03  -0.399E-05   0.324E-03   0.000E+00   0.161E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.240E-03   0.455E-01
0.166E+03   0.143E+02  -0.380E+02   0.342E-03  -0.227E-04  -0.148E-03   0.102E+03   0.476E+02   0.867E+02
   0.130E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.358E+02   0.458E+02   0.116E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.136E-03   0.594E-04   0.228E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.453E-01
0.116E+03   0.458E+02  -0.358E+02   0.228E-03   0.594E-04  -0.136E-03   0.760E+02   0.421E+02   0.621E+02
   0.280E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.141E+02  -0.496E+01   0.625E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.201E-03  -0.129E-03   0.407E-03   0.000E+00  -0.218E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.203E-02   0.407E-01
0.652E+02  -0.764E+01  -0.141E+02   0.428E-03  -0.150E-03  -0.201E-03   0.396E+02   0.145E+02   0.359E+02
   0.280E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.151E+02  -0.332E+01   0.639E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.213E-03  -0.120E-03   0.414E-03   0.000E+00  -0.552E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.748E-03   0.419E-01
0.641E+02  -0.350E+01  -0.151E+02   0.415E-03  -0.122E-03  -0.213E-03   0.396E+02   0.152E+02   0.349E+02
   0.280E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.152E+02  -0.229E+01   0.632E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.215E-03  -0.112E-03   0.407E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.421E-01
0.632E+02  -0.229E+01  -0.152E+02   0.407E-03  -0.112E-03  -0.215E-03   0.392E+02   0.152E+02   0.343E+02
   0.430E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.103E+02  -0.641E+01   0.322E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.147E-03  -0.107E-03   0.290E-03   0.000E+00  -0.161E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.193E-02   0.359E-01
0.337E+02  -0.792E+01  -0.103E+02   0.306E-03  -0.123E-03  -0.147E-03   0.220E+02   0.517E+01   0.202E+02
   0.430E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.109E+02  -0.737E+01   0.345E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.156E-03  -0.120E-03   0.312E-03   0.000E+00  -0.638E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.785E-03   0.369E-01
0.348E+02  -0.760E+01  -0.109E+02   0.315E-03  -0.122E-03  -0.156E-03   0.228E+02   0.543E+01   0.208E+02
   0.430E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.110E+02  -0.751E+01   0.349E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.157E-03  -0.121E-03   0.316E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.371E-01
0.349E+02  -0.751E+01  -0.110E+02   0.316E-03  -0.121E-03  -0.157E-03   0.230E+02   0.548E+01   0.209E+02
   0.630E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.170E+00   0.120E+01   0.175E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 5 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 1 Bina Marga 2024

```
-0.137E-03  -0.112E-03   0.281E-03   0.000E+00  -0.127E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.201E-02   0.312E-01
0.179E+02   0.781E+00   0.170E+00   0.291E-03  -0.122E-03  -0.137E-03   0.886E+01   0.628E+01   0.821E+01
   0.630E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.132E+00   0.876E+00   0.184E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.142E-03  -0.124E-03   0.299E-03   0.000E+00  -0.524E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.818E-03   0.318E-01
0.185E+02   0.809E+00   0.132E+00   0.301E-03  -0.126E-03  -0.142E-03   0.917E+01   0.647E+01   0.849E+01
   0.630E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.124E+00   0.817E+00   0.186E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.143E-03  -0.127E-03   0.303E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.319E-01
0.186E+02   0.817E+00   0.124E+00   0.303E-03  -0.127E-03  -0.143E-03   0.923E+01   0.651E+01   0.855E+01
   0.630E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.170E+00   0.120E+01   0.175E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.137E-03  -0.112E-03   0.281E-03   0.000E+00  -0.127E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.201E-02   0.312E-01
0.179E+02   0.781E+00   0.170E+00   0.291E-03  -0.122E-03  -0.137E-03   0.886E+01   0.628E+01   0.821E+01
   0.630E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.132E+00   0.876E+00   0.184E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.142E-03  -0.124E-03   0.299E-03   0.000E+00  -0.524E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.818E-03   0.318E-01
0.185E+02   0.809E+00   0.132E+00   0.301E-03  -0.126E-03  -0.142E-03   0.917E+01   0.647E+01   0.849E+01
   0.630E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.124E+00   0.817E+00   0.186E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.143E-03  -0.127E-03   0.303E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.319E-01
0.186E+02   0.817E+00   0.124E+00   0.303E-03  -0.127E-03  -0.143E-03   0.923E+01   0.651E+01   0.855E+01
```

Lampiran 6 Output WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024

*** 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	10.00	1500000.00	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	11.50
5	21.50
6	21.50
7	41.50
8	56.50
9	76.50
10	76.50

Lanjutan Lampiran 6 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024

```
*** 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   0.685E+03   0.645E+03   0.550E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.189E-03   0.137E-03   0.164E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.171E-02   0.423E-01
0.685E+03   0.645E+03   0.550E+03   0.189E-03   0.137E-03   0.164E-04   0.677E+02   0.627E+03   0.567E+02
   0.000E+00   0.000E+00   0.100E+02   0.574E+03   0.411E+03   0.550E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.172E-03  -0.345E-04   0.142E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.566E-03   0.417E-01
0.574E+03   0.550E+03   0.411E+03   0.172E-03   0.142E-03  -0.345E-04   0.811E+02   0.512E+03   0.715E+02
   0.000E+00   0.000E+00   0.165E+02   0.260E+03   0.135E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.188E-03   0.276E-04  -0.144E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.395E-01
0.260E+03   0.135E+03   0.000E+00   0.188E-03   0.276E-04  -0.144E-03   0.130E+03   0.132E+03   0.106E+03
   0.400E+01   0.000E+00   0.000E+00   0.387E+03   0.367E+03   0.524E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.256E-04   0.253E-05   0.185E-03   0.000E+00  -0.315E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.106E-02   0.419E-01
0.525E+03   0.387E+03   0.366E+03   0.186E-03   0.256E-04   0.118E-05   0.793E+02   0.426E+03   0.704E+02
   0.400E+01   0.000E+00   0.100E+02   0.278E+03   0.313E+03   0.304E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
0.256E-04   0.675E-04   0.559E-04   0.000E+00   0.327E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.970E-03   0.414E-01
0.449E+03   0.278E+03   0.168E+03   0.226E-03   0.256E-04  -0.102E-03   0.140E+03   0.298E+03   0.116E+03
   0.400E+01   0.000E+00   0.165E+02   0.197E+03   0.293E+03   0.249E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 6 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024

```
0.585E-04   0.170E-03  -0.143E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.402E-01
0.293E+03   0.197E+03   0.249E+02   0.170E-03   0.585E-04  -0.143E-03   0.134E+03   0.172E+03   0.111E+03
   0.115E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.909E+02   0.100E+03   0.305E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.594E-04  -0.483E-04   0.190E-03   0.000E+00  -0.684E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.349E-04   0.402E-01
0.309E+03   0.962E+02   0.909E+02   0.195E-03  -0.531E-04  -0.594E-04   0.109E+03   0.165E+03   0.102E+03
   0.115E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.596E+02   0.116E+03   0.178E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.484E-04   0.170E-04   0.903E-04   0.000E+00   0.156E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.283E-03   0.408E-01
0.221E+03   0.734E+02   0.596E+02   0.140E-03  -0.323E-04  -0.484E-04   0.806E+02   0.118E+03   0.730E+02
   0.115E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.418E+02   0.125E+03   0.972E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.393E-04   0.580E-04   0.253E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.406E-01
0.125E+03   0.972E+02   0.418E+02   0.580E-04   0.253E-04  -0.393E-04   0.417E+02   0.881E+02   0.347E+02
   0.115E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.627E+02   0.746E+02   0.305E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.594E-04  -0.483E-04   0.167E-03   0.000E+00  -0.547E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.348E-04   0.402E-01
0.309E+03   0.709E+02   0.627E+02   0.170E-03  -0.517E-04  -0.594E-04   0.123E+03   0.147E+03   0.114E+03
   0.115E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.448E+02   0.115E+03   0.178E+03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.484E-04   0.170E-04   0.764E-04   0.000E+00   0.125E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.283E-03   0.408E-01
0.221E+03   0.728E+02   0.448E+02   0.116E-03  -0.223E-04  -0.484E-04   0.879E+02   0.113E+03   0.771E+02
   0.115E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.361E+02   0.140E+03   0.973E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.393E-04   0.580E-04   0.178E-04   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.406E-01
0.140E+03   0.973E+02   0.361E+02   0.580E-04   0.178E-04  -0.393E-04   0.521E+02   0.912E+02   0.428E+02
   0.215E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.331E+03  -0.265E+03   0.869E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.173E-03  -0.111E-03   0.217E-03   0.000E+00  -0.270E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.138E-02   0.385E-01
0.875E+02  -0.265E+03  -0.331E+03   0.217E-03  -0.112E-03  -0.173E-03   0.209E+03  -0.170E+03   0.184E+03
   0.215E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.318E+03  -0.206E+03   0.832E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.179E-03  -0.745E-04   0.195E-03   0.000E+00  -0.520E-06   0.000E+00   0.000E+00  -0.400E-03   0.395E-01
0.832E+02  -0.206E+03  -0.318E+03   0.195E-03  -0.745E-04  -0.179E-03   0.200E+03  -0.147E+03   0.169E+03
   0.215E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.304E+03  -0.172E+03   0.794E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.178E-03  -0.546E-04   0.180E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.396E-01
0.794E+02  -0.172E+03  -0.304E+03   0.180E-03  -0.546E-04  -0.178E-03   0.191E+03  -0.132E+03   0.159E+03
   0.215E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.648E+01   0.366E+01   0.870E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.174E-03  -0.111E-03   0.400E-03   0.000E+00  -0.177E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.138E-02   0.385E-01
0.894E+02   0.122E+01  -0.648E+01   0.415E-03  -0.126E-03  -0.174E-03   0.479E+02   0.281E+02   0.435E+02
   0.215E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.668E+01   0.104E+02   0.831E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.179E-03  -0.744E-04   0.372E-03   0.000E+00  -0.358E-05   0.000E+00   0.000E+00  -0.400E-03   0.395E-01
0.831E+02   0.104E+02  -0.668E+01   0.372E-03  -0.744E-04  -0.179E-03   0.449E+02   0.289E+02   0.389E+02
   0.215E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.663E+01   0.135E+02   0.794E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
```

Lanjutan Lampiran 6 *Output* WinJULEA untuk Alternatif 2 Bina Marga 2024

```
-0.178E-03  -0.546E-04   0.350E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.396E-01
0.794E+02   0.135E+02  -0.663E+01   0.350E-03  -0.546E-04  -0.178E-03   0.430E+02   0.287E+02   0.367E+02
   0.415E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.860E+01  -0.464E+01   0.354E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.114E-03  -0.824E-04   0.235E-03   0.000E+00  -0.134E-03   0.000E+00   0.000E+00  -0.148E-02   0.330E-01
0.371E+02  -0.633E+01  -0.860E+01   0.249E-03  -0.959E-04  -0.114E-03   0.228E+02   0.738E+01   0.210E+02
   0.415E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.904E+01  -0.539E+01   0.381E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.121E-03  -0.915E-04   0.254E-03   0.000E+00  -0.527E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.600E-03   0.339E-01
0.383E+02  -0.564E+01  -0.904E+01   0.256E-03  -0.935E-04  -0.121E-03   0.237E+02   0.788E+01   0.216E+02
   0.415E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.913E+01  -0.548E+01   0.385E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.122E-03  -0.927E-04   0.257E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.340E-01
0.385E+02  -0.548E+01  -0.913E+01   0.257E-03  -0.927E-04  -0.122E-03   0.238E+02   0.797E+01   0.217E+02
   0.565E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.758E+01  -0.572E+01   0.214E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.998E-04  -0.805E-04   0.199E-03   0.000E+00  -0.993E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.144E-02   0.300E-01
0.222E+02  -0.655E+01  -0.758E+01   0.207E-03  -0.891E-04  -0.998E-04   0.149E+02   0.270E+01   0.138E+02
   0.565E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.789E+01  -0.647E+01   0.228E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.104E-03  -0.893E-04   0.213E-03   0.000E+00  -0.410E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.587E-03   0.307E-01
0.230E+02  -0.661E+01  -0.789E+01   0.214E-03  -0.907E-04  -0.104E-03   0.154E+02   0.282E+01   0.142E+02
   0.565E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.795E+01  -0.661E+01   0.231E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.105E-03  -0.909E-04   0.215E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.308E-01
0.231E+02  -0.661E+01  -0.795E+01   0.215E-03  -0.909E-04  -0.105E-03   0.155E+02   0.284E+01   0.143E+02
   0.765E+02   0.000E+00   0.000E+00  -0.125E+02  -0.112E+02   0.129E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.100E-03  -0.866E-04   0.162E-03   0.000E+00  -0.359E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.152E-02   0.266E-01
0.130E+02  -0.113E+02  -0.125E+02   0.163E-03  -0.879E-04  -0.100E-03   0.128E+02  -0.361E+01   0.118E+02
   0.765E+02   0.000E+00   0.100E+02  -0.131E+02  -0.122E+02   0.135E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.103E-03  -0.940E-04   0.170E-03   0.000E+00  -0.146E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.615E-03   0.270E-01
0.135E+02  -0.122E+02  -0.131E+02   0.170E-03  -0.942E-04  -0.103E-03   0.133E+02  -0.391E+01   0.123E+02
   0.765E+02   0.000E+00   0.165E+02  -0.132E+02  -0.123E+02   0.136E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.104E-03  -0.953E-04   0.172E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.271E-01
0.136E+02  -0.123E+02  -0.132E+02   0.172E-03  -0.953E-04  -0.104E-03   0.134E+02  -0.397E+01   0.124E+02
   0.765E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.100E+00   0.653E+00   0.129E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.100E-03  -0.868E-04   0.210E-03   0.000E+00  -0.840E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.152E-02   0.266E-01
0.132E+02   0.412E+00   0.100E+00   0.216E-03  -0.926E-04  -0.100E-03   0.653E+01   0.456E+01   0.609E+01
   0.765E+02   0.000E+00   0.100E+02   0.852E-01   0.461E+00   0.135E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.103E-03  -0.940E-04   0.220E-03   0.000E+00  -0.344E-04   0.000E+00   0.000E+00  -0.616E-03   0.270E-01
0.135E+02   0.423E+00   0.852E-01   0.221E-03  -0.949E-04  -0.103E-03   0.671E+01   0.467E+01   0.625E+01
   0.765E+02   0.000E+00   0.165E+02   0.841E-01   0.425E+00   0.136E+02   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00
-0.104E-03  -0.953E-04   0.222E-03   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.000E+00   0.271E-01
0.136E+02   0.425E+00   0.841E-01   0.222E-03  -0.953E-04  -0.104E-03   0.674E+01   0.469E+01   0.628E+01
```

Lampiran 7 Data Lalu Lintas Harian



PT. TRI PATRA

LAPORAN SURVEI PERHITUNGAN LALU LINTAS (SPL)

Survei Kondisi Jalan Tahun 2024

Kode Provinsi	Kode Kabupaten	Ruas	Nama Ruas	AADT Mobil	AADT Pikup	AADT Bus Kecil	AADT Bus Besar	AADT Truk Mikro	AADT Truk Kecil	AADT Truk Sedang	AADT Truk Besar	AADT Truk Trailer	AADT Truk Trailer Sedang	Jumlah	Waktu Survey (min)	Year
34	0	57	Karangmojo - Semin	140	30	5	3	6	13	17	1	0	0	215	44	2024
34	0	58	Karangmojo - Ponjong	53	11	1	1	0	4	0	1	0	1	72	12	2024
34	0	59	Ponjong - Tambakromo	30	13	0	1	0	5	1	0	0	0	50	27	2024
34	0	60	Semin - Bulu	57	13	1	2	4	6	7	1	0	0	91	24	2024
34	0	61	Semin - Blimbing	25	9	1	0	0	4	2	5	0	1	47	17	2024
34	0	62	Pandaan - Candirejo	13	11	0	0	0	3	2	0	0	1	30	10	2024
34	0	63	Wonosari - Nglipar	84	15	1	0	2	4	5	0	0	0	111	18	2024
34	0	64	Sambipitu - Nglipar	39	16	2	0	2	7	4	0	0	0	70	29	2024
34	0	65	Nglipar - Semin	128	38	0	2	1	7	10	1	1	0	188	62	2024
34	0	66	Ngalang - Hargomulyo	31	9	0	0	0	5	2	0	0	0	47	24	2024
34	0	67	Hargomulyo - Watugajah	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	2	2024
34	0	68	Jepitu - Wediombo	10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	11	15	2024
34	0	70	Jerukwudel - Sadeng	23	4	2	1	1	5	2	0	0	0	38	21	2024
34	0	71.11	Ngelo - Pantai Siung	8	3	2	0	0	2	2	0	0	0	17	17	2024
34	0	73.11	Batas Bantul - Girijati	8	1	0	0	0	1	2	0	0	0	12	7	2024
34	0	80.11	Rejosari - Baron	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	2024
34	0	81.11	Baron - Pulang Sawal	28	7	0	0	0	7	0	0	0	0	42	32	2024
34	0	81.12	Tepus - Kanigoro	13	4	4	0	0	1	5	0	0	0	27	7	2024
34	0	82	Bedoyo - Pracimantoro	1	3	0	0	0	0	1	0	0	0	5	5	2024
34	0	83	Yogyakarta - Pulowatu	122	13	1	0	7	3	2	0	0	3	151	29	2024
34	0	84.11	Yogyakarta - Pakem	237	18	1	6	1	0	2	3	0	2	270	34	2024
34	0	84.12	Pakem - Kaliurang	123	16	0	5	4	2	4	0	0	0	154	29	2024
34	0	85.11	Yogyakarta - Demakijo	224	21	1	0	13	6	0	0	0	0	265	9	2024
34	0	85.12	Demakijo - Kebonagung 1	259	75	0	0	15	17	5	1	2	2	376	41	2024
34	0	86	Prambanan - Piyungan	202	54	2	4	14	25	17	3	2	4	327	34	2024
34	0	87	Klangon - Tempel	134	21	2	1	6	22	11	13	1	0	211	66	2024
34	0	88.11	Jombor - Cebongan	187	28	0	0	49	14	1	0	1	0	280	16	2024
34	0	89	Cebongan - Seyegan	65	25	0	0	6	7	4	1	0	0	108	9	2024
34	0	90	Seyegan - Balangan	50	11	0	1	5	3	8	0	0	0	78	12	2024
34	0	91	Balangan - Kebon Agung 2	42	9	0	1	0	6	0	1	0	0	59	13	2024
34	0	92	Tangisan - Blaburan	9	4	0	0	0	0	2	0	0	0	15	3	2024
34	0	93	Denggung - Wonorejo	80	15	0	0	6	2	3	1	0	0	107	8	2024
34	0	94	Wonorejo - Tambakan	81	13	0	0	5	3	8	1	0	0	111	6	2024
34	0	95	Besi - Jangkang	102	28	0	0	8	3	7	0	0	0	148	11	2024
34	0	96	Jangkang - Korokulon	38	18	0	4	1	1	1	0	0	0	63	9	2024
34	0	97	Korokulon - Johotanang	17	10	1	0	2	5	17	1	0	0	53	6	2024
34	0	98	Bantul - Pandak	53	26	0	0	5	5	5	1	0	0	95	15	2024
34	0	99	Yogyakarta - Dongkelan	22	2	0	0	0	1	3	0	0	0	28	1	2024
34	0	100	Ngablak - Bawuran	2	2	0	0	0	1	3	0	0	0	8	3	2024
34	0	101	Prambanan - Gayamharjo	18	2	0	0	0	0	0	0	0	0	20	6	2024
34	0	102	Gayamharjo - Tawang	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2024
34	0	103	Tawang - Ngalang	22	3	0	1	0	4	1	0	0	0	31	25	2024
34	0	104	Ngalang - Gading	11	2	0	0	1	1	0	0	0	0	15	11	2024
34	0	105	Gading - Karangtengah	35	8	1	0	0	0	0	0	0	1	45	16	2024