

TESIS

**EVALUASI STRUKTUR PERKERASAN DAN ALTERNATIF
DESAIN MENGGUNAKAN METODE BINAMARGA 2024 DAN
MEKANISTIK EMPIRIS DENGAN KENPAVE PADA JALAN
KAUTU – PALAM BANGGAI KEPULAUAN**



Disusun Oleh :

ZUASRI

23914027

**KONSENTRASI PERENCANAAN DAN TEKNIK TRANSPORTASI
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL PROGRAM MAGISTER
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2026

HALAMAN PERSETUJUAN

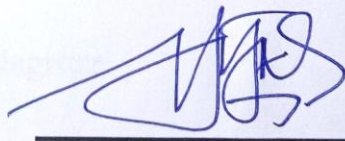
TESIS

EVALUASI STRUKTUR PERKERASAN DAN ALTERNATIF DESAIN MENGGUNAKAN METODE BINAMARGA 2024 DAN MEKANISTIK EMPIRIS DENGAN KENPAVE PADA JALAN KAUTU – PALAM BANGGAI KEPULAUAN

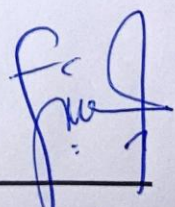


Diperiksa dan disetujui oleh:

Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.
Dosen Pembimbing I


Tanggal:

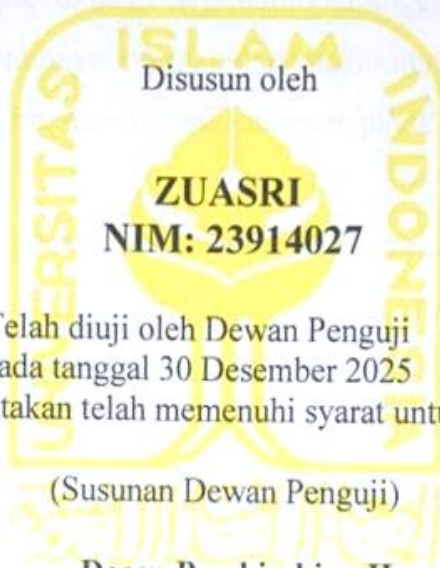
Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.
Dosen Pembimbing II


Tanggal: 22-06-26

HALAMAN PENGESAHAN

TESIS

EVALUASI STRUKTUR PERKERASAN DAN ALTERNATIF DESAIN MENGGUNAKAN METODE BINAMARGA 2024 DAN MEKANISTIK EMPIRIS DENGAN KENPAVE PADA JALAN KAUTU – PALAM BANGGAI KEPULAUAN



Telah diuji oleh Dewan Penguji
pada tanggal 30 Desember 2025
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima

(Susunan Dewan Penguji)

Dosen Pembimbing I

(Miftahul Fauziah, S.T., M.T, Ph.D)

Dosen Pembimbing II

(Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc.)

Dosen Penguji I

(Dr. Ir. Edy Purwanto, CES., DEA)

Yogyakarta, 05 FEB 2026

Universitas Islam Indonesia

Program Studi Teknik Sipil, Program Magister

Ketua Program,



(Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T.)

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Karya tulis ini merupakan hasil karya asli penulis dan belum pernah diajukan sebagai persyaratan memperoleh gelar akademik magister, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di institusi pendidikan tinggi lainnya..
2. Karya tulis ini sepenuhnya berasal dari pemikiran, perumusan, serta hasil penelitian penulis sendiri, tanpa adanya bantuan pihak lain selain bimbingan dari Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak memuat karya maupun pendapat pihak lain, kecuali yang telah dicantumkan secara jelas dalam bentuk referensi, dengan menyebutkan nama penulis dan mencantumkannya pada daftar pustaka.
4. Seluruh perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis, dan tidak menjadi tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari ditemukan adanya penyimpangan atau ketidaksesuaian dengan kebenaran, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diberikan serta sanksi lain sesuai ketentuan dan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, Januari 2026

Yang membuat pernyataan,



Zuasri
23914027

LEMBAR DEDIKASI

Segala puji dan syukur saya persembahkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, berkah, dan petunjuk-Nya yang telah memungkinkan saya menyelesaikan tesis ini dengan baik. Shalawat dan salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, sebagai teladan sepanjang masa.

Tesis ini saya dedikasikan kepada keluarga tercinta: Ayahanda Farhan Latekemg, S.Pd, serta anak-anakku Khairul, Syakira, dan Rizki yang selalu dengan tulus mendoakan dan memberikan dukungan tanpa henti. Ketika banyak telinga tertutup untuk saya, kalian selalu membuka setiap jalan, bahkan pintu hati kalian, sehingga saya mampu melalui perjalanan ini hingga akhir.

Saya juga menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada sahabat seperjuangan: Giri, Hamdi, dan Rama, yang selalu menemani dalam setiap proses perkuliahan maupun berbagai dinamika di luar itu. Kebersamaan dan dukungan kalian sangat berarti dalam penyelesaian studi ini.

Terima kasih yang sebesar-besarnya atas kasih sayang, doa, semangat, dan persahabatan yang diberikan. Semoga karya ini menjadi kebanggaan dan keberkahan bagi kita semua.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul *Evaluasi Struktur Perkerasan dan Alternatif Desain Menggunakan etode Bina Marga 2024 dan Mekanistik Empiris dengan KENPAVE Pada Jalan Kautu – Palam Banggai Kepulauan*.

Dalam penyusunan Tesis ini banyak hambatan yang dihadapi penulis. Oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada :

1. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I yang selalu menmbimbing , memberikan nasehat, saran dan dukungan dalam pengerjaan Tesis ini.
2. Ibu Dr. Eng. Faizul Chasanah, S.T., M.Sc. selaku Dosen Pembimbing II
3. Bapak Dr. Ir. Edy Purwanto, CES., DEA. selaku Dosen Penguji
4. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T. selaku Kaprodi Magister Teknik Sipil UII.
5. Bapak Farhan Latekemg, S.Pd yang telah ridho dan ikhlas tidak pernah lelah untuk selalu mendoakan penulis.
6. Khairul, Syakira, Rizki anak – anak yang tulus selalu memdoakan untuk mama.
7. Bapak, Ibu Mudjihardjo-Madining beserta MM Family
8. Bapak Ir. Asrin, ST.M.Si Kepala Dinas PUPR Banggai Kepulauan beserta seluruh staf
9. Laboratorium Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.

Penulis berharap agar Tesis ini nantinya dapat bermanfaat bagi orang lain yang membaca dikemudian hari.

Yogyakarta, Januari 2026

Penulis,

Zuasri
(23914027)

DAFTAR ISI

Halaman Judul	1
Halaman Persetujuan	2
Halaman Pengesahan	3
Pernyataan Bebas Plagiasi	4
Lembar Dedikasi	v
Kata Pengantar	vi
Daftar Isi	vii
Daftar Tabel	ix
Daftar Gambar	xi
Daftar Lampiran	xii
Arti Notasi	xiii
Abstrak	xiv
<i>Abstract</i>	xv
BAB I PENDAHULUAN	16
1.1 Latar Belakang	16
1.2 Rumusan Masalah	18
1.3 Tujuan Penelitian	19
1.4 Batasan Penelitian	19
1.5 Manfaat Penelitian	20
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	21
2.1. Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan KENPAVE	21
2.2. Evaluasi Tebal Perkerasan Menggunakan Manual Desain Perkerasan 2024	24
BAB III LANDASAN TEORI	29
3.1 Desain Perkerasan Menggunakan Metode Bina Marga 2024	29
3.2 Modulus Kekakuan Menggunakan Hasil Karakteristik Aspal dan <i>Marshall</i>	45

3.3	Analisis Mekanik – Empirik Menggunakan KENPAVE	47
BAB IV METODE PENELITIAN		53
4.1	Jenis Penelitian	53
4.2	Lokasi Penelitian	53
4.3	Pengumpulan Data Penelitian	54
4.4	Tahapan Penelitian	55
4.5	Tahapan Pelaksanaan <i>Coredrill</i>	55
4.6	Tahapan Pengujian <i>Marshall</i> dan Mencari nilai modulus	56
4.7	Tahapan Pengujian Ekstraksi	56
4.8	Tahapan Desain Lapisan Perkerasan Berdasarkan Manual Desain Perkerasan 2024	57
4.9	Tahapan Analisis Menggunakan KENPAVE	58
4.10	Analisis Program KENPAVE	58
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN		63
5.1.	Pengumpulan Data	63
5.2.	Evaluasi Tebal Pekerasan Ruas Kautu Palam Eksisting Menggunakan KENPAVE dengan Permodelan Elastik	70
5.3.	Analisis Data Alternatif Desain	73
5.4.	Pembahasan Identifikasi Tingkat Kerusakan	88
5.5.	Pembahasan Kondisi Tebal, Drainase, Karakteristik <i>Marshall</i> , Modulus Elastisitas Kondisi Eksisting	88
5.6.	Pembahasan Alternatif Desain Menggunakan Bina Marga 2024	90
5.7.	Analisis Tegangan Regangan Menggunakan KENPAVE	91
5.8.	Umur Sisa Layanan	95
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		98
Kesimpulan dan Saran		98
Daftar Pustaka		100

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Tentang Evaluasi Kondisi Perkerasan	27
Tabel 3. 1 Umur Rencana Berdasarkan Jenis Perkerasan	29
Tabel 3. 2 Pemilihan Jenis Perkerasan Berdasarkan Bina Marga 2024	30
Tabel 3. 3 Faktor Laju Pertumbuhan (R)	34
Tabel 3. 4 Faktor Distribusi Lajur (DL)	35
Tabel 3. 5 Data Beban Gandar	36
Tabel 3. 6 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan	37
Tabel 3. 7 Perkiraan Lalu Lintas Untuk Jalan Lalu Lintas Rendah	39
Tabel 3. 8 Desain Perkerasan Bagan Desain 3(1) dengan 150 mm CTB	40
Tabel 3. 9 Desain Perkerasan Bagan Desain 3 (2) dengan 200 mm CTB	41
Tabel 3. 10 Desain Perkerasan Bagan Desain 3 (3) dengan 250 mm CTB	42
Tabel 3. 11 Desain Perkerasan Lentur dengan lapis Pondasi Agregat	42
Tabel 3. 12 Karakteristik Modulus Bahan Berpengikat	44
Tabel 5. 1 Data LHR Lalu Lintas Ruas Kautu Palam	64
Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Tebal Lapisan <i>Coredrill</i>	65
Tabel 5. 3 Rekapitulasi Hasil Pengujian <i>Marshall</i>	66
Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Ekstraksi	66
Tabel 5. 5 Hasil Perhitungan Nilai <i>Sbit</i> Eksisting	68
Tabel 5. 6 Hasil Perhitungan Nilai <i>Smix</i> Eksisting	69
Tabel 5. 7 Input Data Eksisting	70
Tabel 5. 8 Input Data <i>Menu General</i> KENPAVE	70
Tabel 5. 9 Input Data <i>Zcoord</i> Eksisting Kautu Palam	71
Tabel 5. 10 Input Data <i>Layer</i> Eksisting	71
Tabel 5. 11 Input Data <i>Moduli</i> Eksisting	72
Tabel 5. 12 Input Data <i>Load</i> Eksisting	72
Tabel 5. 13 Hasil Tegangan Regangan Perkerasan Eksisting Menggunakan KENPAVE	73

Tabel 5. 15 Data Perencanaan Ruas	74
Tabel 5. 16 Faktor Distribusi Lajur (DL)	75
Tabel 5. 17 Rekapitulasi Nilai VDF4 dan VDF5 Kautu - Palam	76
Tabel 5. 18 Perhitungan Nilai CESA4 dan CESA5 Perencanaan Alternatif Perkerasan Ruas Kautu Palam	78
Tabel 5. 19 Rekapitulasi Rencana Jumlah Kendaraan	79
Tabel 5. 20 Penentuan Jenis Perkerasan Berdasarkan ESA5	80
Tabel 5. 21 Alternatif CTB 150 mm	81
Tabel 5. 22 Alternatif CTB 200 mm	81
Tabel 5. 23 Alternatif FFF 1	81
Tabel 5. 24 Alternatif FFF 2	81
Tabel 5. 25 Alternatif HRS	82
Tabel 5. 26 Hasil Analisis Permodelan Alternatif CTB 150 mm	82
Tabel 5. 27 Hasil Analisis Permodelan Alternatif CTB 200 mm	82
Tabel 5. 28 Hasil Analisis Permodelan Alternatif FFF 1	82
Tabel 5. 29 Hasil Analisis Permodelan Alternatif FFF 2	83
Tabel 5. 30 Hasil Analisis Permodelan Alternatif HRS	83
Tabel 5. 31 Rekapitulasi ESAL Analisis KENPAVE	83
Tabel 5. 32 Rekapitulasi <i>Remaining Life</i> (20 tahun) Alternatif Desain	85
Tabel 5. 33 Rekapitulasi RL Pertahun Alternatif Desain CTB 150 mm, CTB 200 mm, dan FFF 1	86
Tabel 5. 34 Rekapitulasi RL Pertahun Alternatif Desain FFF 2 dan HRS	86

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Tipe 1 Perkerasan Lentur Pada Permukaan Tanah Asli (<i>At Grade</i>)	33
Gambar 3. 2 Tipe 2 Perkerasan Lentur Pada Timbunan	33
Gambar 3. 3 Perkerasan Lentur Pada Galian	34
Gambar 3. 4 <i>Flowchart</i> Prosedur Desain Perkerasan Lentur Menggunakan Pendekatan Mekanistik	45
Gambar 3. 5 Model Perkerasan Pada Prosedur Mekanistik Empirik	48
Gambar 4. 1 Lokasi Penelitian	54
Gambar 4. 2 Menu <i>General</i> KENLAYER	59
Gambar 4. 3 Menu <i>Zcoord</i> KENLAYER	59
Gambar 4. 4 Menu <i>Poisson Ratio</i>	60
Gambar 4. 5 Menu <i>Modulus</i>	61
Gambar 4. 6 Menu <i>Load</i>	61
Gambar 4. 7 Bagan Alir Penelitian	62
Gambar 5. 1 Data Tingkat Kerusakan Ruas Jalan Kautu – Palam Tahun 2023	63
Gambar 5. 2 Lapis Perkerasan Ruas Kautu - Palam	64
Gambar 5. 3 Kondisi Eksisting Drainase	67
Gambar 5. 4 Kondisi Perkerasan Akibat Drainase Kurang Baik	67
Gambar 5. 5 Tebal Eksisting dan Alternatif Desain Perkerasan	90
Gambar 5. 6 Hasil Analisis Permodelan Berdasarkan Jenis Kerusakan	92
Gambar 5. 7 Hasil Beban Lalu Lintas	94
Gambar 5. 8 Umur Sisa Layanan	96

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Analisis Perkerasan Eksisting Menggunakan KENPAVE	L-1
Lampiran 2 Hasil Analisis Alternatif Desain CTB 200 mm Menggunakan KENPAVE	L-4
Lampiran 3 Hasil Analisis Alternatif Desain CTB 200 mm Menggunakan KENPAVE	L-7
Lampiran 4 Hasil Analisis Alternatif Desain FFF 1 Menggunakan KENPAVE	L-10
Lampiran 5 Hasil Analisis Alternatif Desain FFF 2 Menggunakan KENPAVE	L-13
Lampiran 6 Data Kerusakan <i>Stripmap</i>	L-16
Lampiran 7 Kondisi Ruas Kautu Palam STA 17+000 - STA 20+410	L-17
Lampiran 8 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran <i>Marshall</i>	L-19

ARTI NOTASI

AC-WC	= <i>Asphalt Cement – Wearing Coarse</i>
CESA	= <i>Cumulative Equivalent Single Axle Load</i>
CTB	= <i>Cement Treated Base</i>
DD	= <i>Faktor Distribusi Arah</i>
DL	= <i>Faktor Distribusi Lajur</i>
ESAL	= <i>Equivalent Single Axle Load</i>
HRS	= <i>Hot Rolled Sheet</i>
MDP	= <i>Manual Desain Perkerasan</i>
Nf	= <i>Total Traffic Fatigue Cracking</i>
Nr	= <i>Total Traffic Rutting</i>
Nd	= <i>Total Traffic Permanent Deformation</i>
Sbit	= <i>Stiffness Modulus of Bitumen</i>
Smix	= <i>Stiffness Modulus of Mixture</i>
RL	= <i>Remaining Life</i>
UR	= <i>Umur Rencana</i>
VDF	= <i>Vehicle Damage Factor</i>
VITM	= <i>Void in Total Mix (%)</i>
VFWA	= <i>Void Filled with Asphalt (%)</i>
VMA	= <i>Void in Mineral Aggregate (%)</i>

ABSTRAK

Ruas Jalan Kautu-Palam merupakan jalur transportasi utama jalan kabupaten yang menghubungkan Desa Kautu dan Desa Palam di Pulau Peleng Sulawesi Tengah. Berdasarkan data *stripmap* kerusakan pada ruas ini termasuk kategori berat sehingga dibutuhkan pengecekan kondisi eksisting dan perencanaan alternatif desain dalam rekonstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi perkerasan eksisting Jalan Kautu-Palam, menyusun dan membandingkan alternatif desain perkerasan serta memproyeksikan model kerusakan dan umur layan perkerasan yang dianalisis secara mekanistik empirik menggunakan KENPAVE.

Bina Marga 2024 merupakan peraturan yang terbaharukan terkait standar perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jalan di Indonesia, sehingga dalam mendesain perencanaan. Data penelitian ini menggunakan data sekunder berupa data kerusakan, *As Built Drawing*, LHR, dan CBR. Data primer berupa kondisi eksisting dari *coredrill*, nilai modulus elastisitas, ekstraksi, dan *Marshall*. Penelitian ini menggunakan aplikasi KENPAVE digunakan simulasi tegangan regangan dan prediksi kerusakan dengan metode elastik. Alternatif desain dirancang menggunakan Bina Marga 2024.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa ruas Jalan Kautu-Palam pada STA 17+200 hingga STA 20+410 mengalami kerusakan berat dan memerlukan rekonstruksi. Tebal perkerasan eksisting rata-rata 5,89 cm, dan modulus 1481,59 MPA yang memenuhi standar desain. Tebal perkerasan eksisting dan nilai modulus telah memenuhi standar, namun evaluasi desain menunjukkan bahwa penggunaan lapisan CTB memberikan peningkatan kapasitas struktural dan kinerja ESAL yang jauh lebih baik dibandingkan desain *full flexibel*. Selama masa rencana 20 tahun, alternatif dengan CTB tetap stabil dengan RL di atas 99,9%, sedangkan desain FFF1 mengalami penurunan signifikan, membuktikan bahwa lapisan fleksibel penuh kurang efektif menahan beban lalu lintas berat.

Keywords: Bina Marga 2024, Kautu-Palam, *KENPAVE*, dan Kerusakan

ABSTRACT

The Kautu-Palam Road is the main transportation route connecting the villages of Kautu and Palam on Peleng Island, Sulawesi Tengah. Based on strip map data, the damage to this road is classified as severe, requiring an assessment of its existing condition and the planning of alternative designs for its reconstruction. This study aims to evaluate the existing pavement condition of the Kautu-Palam Road, develop and compare alternative pavement designs, and project a damage model and pavement service life analyzed mechanistically and empirically using KENPAVE.

Bina Marga 2024 is a renewed regulation related to road planning and construction standards in Indonesia. This research uses secondary data in the form of damage data, As Built Drawings, LHR, and CBR. Primary data includes existing conditions from coredrills, elastic modulus values, extraction, and Marshall. This study uses the KENPAVE application simulate stress strain and damage prediction using the elastic method and Bina Marga 2024 for alternative design calculation.

The evaluation results show that the Kautu-Palam Road section at STA 17+200 to STA 20+410 has suffered severe damage and requires reconstruction. The average thickness of the existing pavement is 5.89 cm, and the modulus is 1481.59 MPA, which meets the design standards. The existing pavement thickness and modulus value meet the standards, but the design evaluation shows that the use of a CTB layer provides a much better increase in structural capacity and ESAL performance compared to the fully flexible design. During the 20-year plan period, the alternative with CTB remains stable with an RL above 99.9%, while the FFF1 design experiences a significant decline, proving that a fully flexible layer is less effective in withstanding heavy traffic loads.

Keywords: *Bina Marga 2024, Kautu-Palam, KENPAVE, and road damage*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jalan Kautu–Palam merupakan jalur transportasi utama yang menghubungkan Desa Kautu dan Desa Palam di Pulau Peleng, Kabupaten Banggai Kepulauan, Sulawesi Tengah. Kondisi ruas jalan ini mengalami kerusakan cukup parah akibat tingginya volume kendaraan, karakteristik tanah yang kurang stabil, serta intensitas curah hujan yang tinggi. Berdasarkan hasil analisis *Stripmap* dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Banggai Kepulauan tahun 2023, diketahui bahwa pada segmen STA 17+200 hingga STA 20+410 terdapat kerusakan berat maupun kerusakan ringan. Temuan ini menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan beban lalu lintas memiliki pengaruh signifikan terhadap degradasi kualitas jalan di wilayah tersebut. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pemerintah telah melakukan beberapa rekonstruksi, salah satunya dengan menggunakan pedoman desain perkerasan lentur. Rekonstruksi jalan ini merupakan bagian dari proyek Dana Alokasi Khusus (DAK) yang dikelola oleh LPSE Kabupaten Banggai Kepulauan. Namun, karena keterbatasannya anggaran dan kondisi geografis yang menantang menjadi hambatan dalam upaya perbaikan secara menyeluruh. Dengan banyaknya hambatan dan anggaran yang terbatas diperlukan perhitungan desain perkerasan lentur yang efektif dan efisien.

Perkerasan lentur atau *flexible pavement* merupakan jenis perkerasan yang berbahan ikat aspal serta memiliki fungsi menyebarkan beban lalu lintas tanah dasar (Sukirman, 1999). Struktur perkerasan lentur terdiri dari beberapa lapisan, yaitu lapisan permukaan (*surface course*), lapisan pondasi atas (*base course*), dan lapisan pondasi bawah (*sub-base course*) yang bekerja untuk menahan dan mendistribusikan beban, sehingga mengurangi tekanan langsung pada tanah dasar dan meningkatkan umur layanan jalan. Desain perkerasan menggunakan peraturan dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) diatur pada

Direktorat Jenderal Bina Marga. Beberapa desain jalan Indonesia masih menggunakan Metode Bina Marga 2017, akan tetapi saat ini ada pembaharuan dalam desain perkerasan yaitu menggunakan Manual Desain Perkerasan (MDP) 2024.

Pedoman Bina Marga 2017 merupakan salah satu acuan penting dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi perkerasan jalan di Indonesia. Dokumen ini mengatur berbagai aspek, mulai dari perancangan perkerasan baru, penambahan lapisan (*overlay*) untuk memperbaiki perkerasan yang sudah ada, hingga kegiatan pemeliharaan guna menjamin daya tahan dan performa jalan tetap sesuai standar yang ditetapkan (Zuasri & Fauziah, 2024). Manual Desain Perkerasan (MDP) 2024 menggantikan edisi 2017 sebagai pedoman resmi dalam perencanaan struktur perkerasan jalan di Indonesia. Pembaruan ini bertujuan untuk menyelaraskan metode desain dengan perkembangan teknologi dan kondisi lokal. Salah satu inovasi utama dalam MDP 2024 adalah penerapan pendekatan mekanistik-empirik, yang menggabungkan analisis mekanis berdasarkan perilaku material dengan data empiris dari kondisi aktual jalan. Pendekatan ini memungkinkan desain yang lebih presisi dan sesuai dengan kebutuhan lalu lintas serta karakteristik tanah dasar di lokasi proyek (Direktorat Jenderal Bina Marga, 2024).

Penerapan Manual Desain Perkerasan (MDP) 2024 diharapkan dapat meningkatkan standar perencanaan dan pelaksanaan konstruksi jalan di Indonesia agar lebih seragam, efisien, serta berorientasi pada keberlanjutan. Pendekatan ini tidak hanya memberikan pedoman teknis yang lebih komprehensif, tetapi juga dirancang untuk mampu merespons tantangan nyata berupa pertumbuhan volume lalu lintas, beban kendaraan berat, serta keragaman kondisi lingkungan dan iklim di berbagai wilayah. MDP 2024 berfungsi sebagai acuan penting dalam mewujudkan infrastruktur jalan yang andal dan berumur layanan lebih panjang. Akan tetapi, Perkerasan jalan sendiri akan mengalami penurunan fungsi layanan setiap tahun atau seiring dengan bertambahnya volume lalu lintas berdasarkan jumlah kumulatif litnasan kendaraan (Arrahman, 2023). Umur sisa layanan dari jenis perkerasan yang sudah didesain dapat dengan secara langsung mengambil sampel di lapangan atau menggunakan perhitungan mekanistik-empirik seperti

aplikasi KENPAVE. Metode mekanistik – empiric merupakan salah satu jenis analisis untuk memprediksi jenis kerusakan yang terjadi pada perkerasan yang didesain sebagai langkah antisipasi kerusakan atau desain (Widhiatmoko & Fauziah, 2024). Perangkat lunak Kenpave yang digunakan dalam analisis perkerasan ini merupakan program komputer yang dikembangkan oleh Y.H. Huang dan biasanya digunakan untuk menghitung tegangan, regangan dan deformasi pada struktur perkerasan lentur dan perkerasan kaku (Biradar, 2019). Aplikasi KENPAVE memfasilitasi perhitungan tegangan, regangan, dan lendutan pada struktur perkerasan jalan dengan memanfaatkan data input seperti ketebalan lapisan perkerasan, karakteristik material, serta nilai CBR tanah, melalui pendekatan metode elastis dan viskoelastis (Pambudi & Fauziah, 2021).

KENPAVE dapat membantu mengevaluasi kinerja perkerasan di bawah berbagai kondisi beban dan lingkungan dan membantu dalam menentukan ketebalan lapisan yang optimal. Dalam input analisis KENPAVE diperlukan beberapa *input* data seperti tebal lapisan, *poisson ration*, tekanan ban, beban roda dan modulus elastisitas (Widhiatmoko & Fauziah, 2024). Untuk nilai modulus elastisitas dapat menggunakan nilai spesifikasi MDP 2024, pada penelitian ini nilai modulus elastisitas didapatkan dengan cara mengambil sampel *core* secara langsung dan dilakukan pengujian *Marshall* kemudian diolah untuk mendapatkan nilai *Stiffness Modulus* Campuran atau *Smix*. Berdasarkan hal tersebut, peneliti bertujuan untuk mengevaluasi perkerasan eksisting menggunakan MDP 2024 yang dianalisis menggunakan program KENPAVE dengan nilai modulus elastisitas menggunakan hasil dari pengujian *Marshall*. Penelitian ini berfokus untuk mengevaluasi kondisi perkerasan eksisting Jalan Kautu–Palam, menyusun dan membandingkan alternatif desain perkerasan berdasarkan Manual Desain Perkerasan 2024, serta memproyeksikan kerusakan dan umur layan perkerasan

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil identifikasi kerusakan Jalan Kautu – Palam?

2. Bagaimana kondisi tebal, dan modulus elastisitas perkerasan lentur eksisting pada ruas Jalan Kautu – Palam?
3. Bagaimana alternatif desain perkerasan menggunakan Bina Marga 2024?
4. Bagaimana nilai tegangan, regangan perkerasan kondisi eksisting dan alternatif desain menggunakan Bina Marga 2024 pada analisis elastik KENPAVE?
5. Bagaimana prediksi kerusakan dan umur layanan dari kondisi eksisting perkerasan dan beberapa alternatif desain menggunakan Bina Marga 2024?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi tingkat kerusakan jalan Kautu – Palam sebelum rekonstruksi.
2. Mengetahui kondisi tebal dan hasil modulus elastisitas perkerasan lentur eksisting pada ruas Jalan Kautu – Palam dengan uji *coredrill*.
3. Menganalisis alternatif desain perkerasan menggunakan Bina Marga 2024.
4. Mengevaluasi nilai tegangan, regangan perkerasan kondisi eksisting dan alternatif desain dengan KENPAVE.
5. Memprediksi kerusakan dan umur layanan dari kondisi eksisting perkerasan dan beberapa alternatif desain menggunakan Bina Marga 2024.

1.4 Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian dilakukan pada ruas jalan Kautu – Palam Banggai Kepulauan yang mengalami kerusakan berat pada STA 17+200 hingga STA 20+410.
2. Data yang digunakan dalam menganalisis adalah data sekunder yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Banggai Kepulauan Sulawesi Tengah.
3. Modulus Elastisitas eksisting didapatkan dengan pengujian Marshall yang dihitung untuk mencari nilai $Smix$.

4. Analisis desain ketebalan menggunakan peraturan Bina Marga 2024 yang tertuang pada Manual Desain Perkerasan Jalan 2024.
5. Analisis elastik menggunakan perangkat lunak KENPAVE.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui kondisi eksisting perkerasan lentur
2. Memberikan alternatif desain perkerasan lentur menggunakan Manual Desain Perkerasan 2024.
3. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan desain perkerasan jalan khususnya di Kabupaten Banggai Kepulauan.
4. Mengetahui kondisi kerusakan dari perkerasan eksisting dan alternatif perkerasan menggunakan Manual Desain Perkerasan 2024.
5. Mendukung pengambilan keputusan dalam pembangunan infrastruktur jalan terkait menangani, meningkatkan dan memelihara kondisi jalan tersebut.
6. Mengantisipasi terjadinya kerusakan yang berkelanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Evaluasi Kinerja Perkerasan Menggunakan KENPAVE

Penggunaan program KENPAVE dalam perencanaan perkerasan lentur telah banyak diterapkan dalam berbagai penelitian karena kemampuannya dalam menganalisis respon struktur perkerasan terhadap beban lalu lintas. Aplikasi ini mempermudah proses desain dengan menghitung parameter penting seperti tegangan, regangan, dan lendutan, sehingga hasil desain menjadi lebih akurat dan efisien. Pambudi & Fauziah (2021) menjelaskan bahwa penggunaan program ini juga memungkinkan untuk mempertimbangkan variasi jenis material dan ketebalan lapisan dalam skenario yang lebih kompleks. Dengan demikian, KENPAVE menjadi alat bantu yang sangat berguna dalam mendukung desain perkerasan jalan yang lebih responsif terhadap kondisi lalu lintas dan karakteristik tanah setempat, Rahmawati et al. (2021) menggunakan KENPAVE untuk membandingkan metode empiris Komponen Bina Marga 1987 dan AASHTO 1993, dengan hasil menunjukkan perbedaan ketahanan jalan secara signifikan

Widhiatmoko & Fauziah (2024) menjelaskan analisis KENPAVE dilakukan pada titik-titik spesifik seperti bawah lapis aspal untuk memprediksi *fatigue cracking* melalui regangan tarik horizontal, atas lapis pondasi untuk memperkirakan *rutting* melalui regangan tekan vertikal, dan atas tanah dasar untuk menilai *permanent deformation*, sehingga keseluruhan struktur perkerasan dapat dirancang lebih optimal terhadap beban lalu lintas. Zuasri & Fauziah (2024) menjelaskan bahwa analisis linier campuran beton aspal menggunakan perangkat lunak Kenpave yang merupakan metode evaluasi kinerja struktur perkerasan jalan dengan memodelkan sistem berlapis untuk menghitung distribusi tegangan, regangan, dan defleksi akibat beban lalu lintas menggunakan pendekatan elastis linier yang menilai respons material secara proporsional, serta menghasilkan

identifikasi potensi kerusakan seperti *fatigue cracking* dan *rutting* guna memperkirakan masa layan perkerasan secara lebih akurat.

Desain perkerasan jalan pada dasarnya bertujuan untuk menentukan ketebalan lapisan perkerasan yang mampu menahan beban lalu lintas serta melindungi tanah dasar dari kerusakan struktural. Seiring dengan meningkatnya volume lalu lintas setiap tahun, diperlukan evaluasi berkala terhadap ketebalan perkerasan guna memastikan bahwa struktur jalan tetap memberikan performa optimal. Ketebalan yang tidak sesuai dapat mempercepat kerusakan, sehingga penting untuk mempertimbangkan kondisi tanah dasar serta intensitas beban lalu lintas dalam perencanaan. Menurut Sukirman (1999), keberhasilan struktur perkerasan sangat dipengaruhi oleh kemampuan lapis perkerasan dalam menyebarkan beban ke lapisan bawah secara merata. Salah satu evaluasi yang dilakukan menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Bina Marga 2017.

Evaluasi perkerasan menggunakan Bina Marga 2017 penting dalam perencanaan jangka panjang untuk meminimalisir kerusakan pada jalan (Zuasri & Fauziah, 2024). Penelitian Putra (2018) menjelaskan bahwa penerapan metode Bina Marga 2017 pada beberapa ruas jalan nasional terbukti meningkatkan ketahanan perkerasan hingga 20% dibandingkan metode sebelumnya, meskipun implementasinya masih menghadapi tantangan, terutama dalam hal adaptasi terhadap teknologi baru dan keterbatasan kapasitas sumber daya manusia di daerah. Berdasarkan penelitian Panjago & Hadi (2024), analisis perkerasan eksisting menggunakan perangkat lunak KENPAVE dengan pendekatan metode Bina Marga 2017 menunjukkan bahwa pada permodelan elastis, umur layan perkerasan diperkirakan mencapai 25 tahun hingga *fatigue cracking*, 15 tahun hingga mengalami *rutting*, dan 5 tahun hingga terjadi *permanent deformation*, sedangkan pada model viskoelastis, umur layan perkerasan sedikit lebih pendek, yakni sekitar 20 tahun untuk *fatigue cracking* dan 14 tahun untuk *rutting* dan 2 tahun sampai terjadi *permanent deformation*, yang mengindikasikan bahwa sifat viskoelastis material memberikan respons berbeda terhadap beban berulang dalam jangka panjang.

Penelitian yang dilakukan oleh Fauziah & Ramadhani (2018), diperoleh hasil desain tebal perkerasan yang berbeda antara metode Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) Bina Marga 2013 dan simulasi menggunakan perangkat lunak KENPAVE. Berdasarkan perhitungan menggunakan MDPJ 2013, diperoleh ketebalan perkerasan lentur sebesar 19,5 cm, lapis pondasi atas (CTB) 15 cm, dan lapis pondasi bawah (LPA) 15 cm. Sementara itu, hasil dari KENPAVE menunjukkan ketebalan lapisan permukaan (*surface*) 20 cm, lapisan *base* 8 cm, dan lapisan pondasi bawah (*subbase*) 10 cm. Perbedaan ini terjadi karena perhitungan berdasarkan MDPJ 2013 mengacu pada pedoman teknis Keputusan Dirjen Bina Marga No. 02/M/BM/2013, yang lebih bersifat empiris dan menggunakan pendekatan grafik desain. Sebaliknya, KENPAVE menggunakan pendekatan mekanistik-empiris yang mempertimbangkan variabel teknis tambahan, seperti tekanan ban, luas area kontak ban, serta analisis distribusi tegangan dan deformasi pada tiap lapisan perkerasan. Oleh karena itu, perbedaan asumsi desain dan pendekatan analisis menjadi faktor utama penyebab variasi dalam hasil ketebalan struktur perkerasan. Temuan ini menunjukkan pentingnya pemilihan metode desain yang sesuai dengan kebutuhan teknis dan kondisi lapangan untuk memperoleh hasil yang optimal dan efisien.

Desain perkerasan yang dianalisis menggunakan perangkat lunak KENPAVE dilakukan dengan pendekatan elastis dan viskoelastis untuk memprediksi potensi kerusakan melalui evaluasi terhadap nilai tegangan dan regangan pada struktur perkerasan. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan oleh Pambudi dan Fauziah (2021), diketahui bahwa pendekatan elastis menghasilkan nilai tegangan dan regangan yang lebih kecil dibandingkan dengan pendekatan viskoelastis. Hal ini menunjukkan bahwa model elastis cenderung memprediksi respons struktur perkerasan dengan estimasi beban yang lebih moderat. Selain itu, analisis terhadap sisa umur layanan perkerasan menunjukkan bahwa pendekatan elastis memberikan estimasi umur layanan yang lebih panjang dibandingkan pendekatan viskoelastis. Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik dasar dari masing-masing pendekatan: model elastis mengasumsikan bahwa material kembali ke bentuk semula setelah beban diangkat, sedangkan model viskoelastis mempertimbangkan efek waktu dan

temperatur dalam merespons beban, yang menghasilkan deformasi permanen lebih besar dan potensi kerusakan lebih cepat. Temuan ini mengindikasikan bahwa pendekatan elastis dapat memberikan hasil yang lebih konservatif dalam konteks perencanaan jangka panjang, namun pendekatan viskoelastis lebih representatif terhadap kondisi lapangan yang dinamis dan kompleks.

Penelitian Hadi dan Fauziah (2022) mendapatkan bahwa pada campuran perkerasan Superpave menunjukkan prediksi umur pelayanan yang lebih panjang dibandingkan dengan campuran Aspal Beton Lapis Aus (AC-WC), berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak KENPAVE. Persentase dominasi umur layan campuran Superpave terhadap AC-WC tercatat sebesar 7,5% pada alternatif 1 dengan pemodelan viskoelastik, 6,4% pada alternatif 1 dengan pemodelan elastik, 21,8% pada alternatif 2 viskoelastik, dan 4,2% pada alternatif 2 elastik. Perbedaan ini mencerminkan kinerja struktural Superpave yang lebih baik dalam menahan beban lalu lintas pada jangka waktu tertentu. Dalam konteks pemodelan KENPAVE, asumsi mengenai pengaruh suhu terhadap perilaku material perkerasan sangat memengaruhi hasil prediksi, khususnya terhadap nilai beban gandar minimum dan umur layan perkerasan. Pemodelan elastik mengasumsikan bahwa campuran aspal tidak terpengaruh oleh suhu pembebanan, sehingga menghasilkan estimasi nilai beban gandar minimum yang lebih tinggi serta umur layanan yang lebih panjang. Sebaliknya, pemodelan viskoelastik mempertimbangkan sensitivitas material terhadap suhu dan waktu, sehingga menghasilkan deformasi lebih besar yang berdampak pada penurunan prediksi umur layanan. Temuan ini menunjukkan pentingnya pemilihan metode pemodelan yang sesuai dengan kondisi iklim dan karakteristik lalu lintas aktual dalam merancang perkerasan jalan yang tahan lama dan efektif.

2.2. Evaluasi Tebal Perkerasan Menggunakan Manual Desain Perkerasan 2024

Seiring berkembangnya teknologi dan perubahan kondisi infrastuktur maka terjadi juga perkembangan peraturan untuk menyempurnakan versi sebelumnya. Manual Desain Perkerasan Bina Marga 2024 menambahkan pendekatan berbasis

teknologi dalam pemantauan kondisi jalan secara realtime dengan penggunaan material ramah lingkungan (Zuasri & Fauziah ,2024). Pada Manual Desain Perkerasan 2024 sudah beralih ke pendekatan secara mekanistik-empirik yang menggabungkan analisis mekanis (respon tegangan dan regangan) dengan data empiris untuk menghasilkan desain yang lebih akurat dan sesuai dengan kondisi nyata (Bina Marga, 2024).

Penelitian yang dilakukan oleh Zuasri dan Fauziah (2024) menunjukkan bahwa metode Bina Marga 2024 menghasilkan nilai *Equivalent Single Axle Load (ESAL)* yang lebih tinggi dibandingkan metode Bina Marga 2017. Hal ini menunjukkan bahwa perkerasan jalan yang dirancang dengan pedoman 2024 memiliki kapasitas struktural yang lebih besar dalam menahan beban lalu lintas berulang. Mengingat bahwa pada desain 2017 kerusakan awal cenderung terjadi lebih cepat, maka penggunaan lapisan *Cement Treated Base (CTB)* dengan ketebalan antara 150 mm hingga 300 mm sebagaimana direkomendasikan dalam MDPJ 2024 dianggap lebih optimal, khususnya untuk ruas Jalan Peulemak, Aceh Timur, dalam rangka meningkatkan ketahanan dan umur layanan perkerasan. Sementara itu, penelitian Widhiatmoko dan Fauziah (2024) pada ruas Jalan Tol Solo–Yogyakarta–NYIA Kulon Progo (STA 02+000 hingga STA 07+500) menunjukkan bahwa desain perkerasan menggunakan campuran Superpave dengan bahan ikat PEN 60/70 + karet dan PG70 + karet menghasilkan variasi ketebalan lapis aspal yang berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa metode Bina Marga 2017 (alternatif 1 dan 2) cenderung menghasilkan lapisan aspal yang lebih tebal dibandingkan metode Bina Marga 2024. Meskipun demikian, pada desain menggunakan Bina Marga 2024, kerusakan awal yang muncul lebih dominan berupa retak (*cracking*) pada lapisan beton aspal, yang kemungkinan besar disebabkan oleh penurunan ketebalan lapisan sehingga berkurangnya daya tahan terhadap tegangan tarik akibat beban kendaraan.

Penelitian Nasution dan Fauziah (2024) membandingkan desain tebal perkerasan pada ruas Jalan Peureulak, Aceh Timur, menggunakan pedoman Bina Marga 2017 dan Manual Desain Perkerasan (MDP) 2024. Hasilnya menunjukkan bahwa desain 2017 menghasilkan deformasi permanen yang lebih kecil, namun

berisiko rusak lebih cepat jika beban lalu lintas aktual melebihi asumsi. Sebaliknya, MDP 2024 menghasilkan deformasi permanen lebih besar, tetapi nilai rutting dan fatigue lebih rendah karena lapisan perkerasan yang lebih tipis. MDP 2024 juga menawarkan dua pendekatan desain—menggunakan lapis agregat dan CTB—dengan perhitungan beban kendaraan yang diperbarui dari skala pulau menjadi provinsi. Meskipun lebih tipis, desain ini dapat diantisipasi dengan overlay sebelum kerusakan terjadi dan dianggap lebih efisien dari segi biaya. Dengan demikian, MDP 2024 dinilai lebih adaptif, ekonomis, dan berkualitas dibandingkan versi sebelumnya.

Penelitian Safari dan Fauziah (2024) mengungkapkan bahwa beban kendaraan berlebih (*overload*) pada ruas Jalan Tol Jogja–Solo berkontribusi signifikan terhadap percepatan kerusakan perkerasan, terutama pada desain yang mengacu pada Bina Marga 2017. Hasil simulasi menggunakan KENPAVE menunjukkan bahwa kelebihan beban sebesar 110% hingga 140% dari muatan normal menyebabkan peningkatan deformasi permanen dan retakan dini, yang memperpendek umur layanan perkerasan. Sebaliknya, desain berdasarkan Bina Marga 2024, khususnya dengan penggunaan *Cement Treated Base* (CTB) 150 mm, terbukti lebih tahan terhadap beban berlebih dan lebih unggul dalam mengurangi risiko *fatigue cracking* dan *rutting*. Selain itu, pemanfaatan perangkat lunak KENPAVE terbukti efektif dalam mensimulasikan pengaruh beban berlebih melalui analisis *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESA). Parameter ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai akumulasi beban yang diterima perkerasan, serta menjadi dasar dalam mengevaluasi kinerja struktural jalan untuk berbagai skenario desain. Dengan demikian, integrasi metode Bina Marga 2024 dan analisis KENPAVE menjadi pendekatan yang lebih adaptif dan akurat dalam merancang perkerasan jalan yang tahan terhadap kondisi lalu lintas aktual.

Adapun ringkasan penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai referensi penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Tentang Evaluasi Kondisi Perkerasan

Peneliti	Pambudi & Fauziah (2021)	Hadi (2024)	Zuasri & Fauziah (2024)	Widhiatmoko & Fauziah (2024)	Zuasri (2025)
Judul Penelitian	Evaluasi Perancangan Struktur Perkerasan Dengan Metode Bina Marga 2017 Dan Program Kenpave Menggunakan Pendekatan Elastik Dan Viskoelastik	Eksplorasi Dampak Perubahan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017 Ke 2024 Menggunakan Program	Komparasi Alternatif Desain Perkerasan Lentur Metode Bina Marga 2017 Dan 2024 Menggunakan Kenpave (Studi Kasus: Ruas Jalan Peumeulak Aceh Timur (Sta 7+750 – Sta 16+500)	Analisis Perbandingan Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Viskoelastik Pada MDPJ 2017 dan MDP 2024 Menggunakan KENPAVE (Studi Kasus: Ruas Jalan Tol Solo – Yogyakarta – NYIA Kulon Progo Pada STA 02+000 – STA 07+500)	Evaluasi Perkerasan Eksisting Dan Desain Perkerasan Menggunakan Usulan Alternatif Metode Binamarga 2024 Dengan Analisis Elastik Menggunakan Kenpave Pada Jalan Kautu – Palam Banggai Kepulauan
Tujuan Penelitian	Membantu menentukan tebal lapis perkerasan menggunakan Metode Bina Marga 2017 dibantu dengan program KENPAVE	Mengeksplorasi perbedaan penggunaan antara kedua menggunakan sehingga dapat metode program tersebut KENPAVE menggambarkan performa dan tingkat ke efektifan dari perubahan pedoman MDPJ.	Mengetahui perbedaan desain struktur perkerasan lentur antara metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 berdasarkan nilai ESAL terhadap potensi kerusakan fatigue <i>cracking</i> , <i>rutting</i> , dan <i>permanent deformation</i> .	Mengetahui kinerja tebal lapis perkerasan pada Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 dengan campuran Superpave dan modifikasi bahan ikat campur serbuk ban karet pada program KENPAVE	Mengevaluasi kondisi perkerasan eksisting Jalan Kautu–Palam, menyusun dan membandingkan alternatif desain perkerasan berdasarkan Manual Desain Perkerasan 2024, serta memproyeksikan kerusakan dan umur layan perkerasan.

Sumber : Pambudi & Fauziah (2021), Hadi (2024), Zuasri & Fauziah (2024), Widhiatmoko & Fauziah (2024)

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Tentang Evaluasi Kondisi Perkerasan

Peneliti	Pambudi & Fauziah (2021)	Hadi (2024)	Zuasri & Fauziah (2024)	Widhiatmoko & Fauziah (2024)	Zuasri (2025)
Lokasi Penelitian	Jalan Simpang Pundu – Tumbang Samba	Jalan Prambanan - Piyungan	Ruas Jalan Peumeulak Aceh Timur	Jalan Tol Solo – Yogyakarta – NYIA Kulon Progo STA 02+000 – STA 07+500)	Jalan Kautu–Palam
Metode Penelitian	Bina Marga 2017 Elastik dan Viskoelastik	Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024	Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 Pendekatan Elastik	Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024, Pencarian Nilai Sbit, Smix	Bina Marga 2024 Pendekatan Elastik, Pencarian Nilai Smix
Hasil Penelitian	Perencanaan perkerasan Bina Marga dengan lapisan AC-WC 4 cm, AC-BC 6 cm, AC-base 7,5 cm, CTB 15 cm, dan LPA kelas A 15 cm menunjukkan pada pendekatan elastis menghasilkan tegangan dan kerusakan (retak lelah, <i>rutting</i> , dan deformasi permanen) yang sedikit lebih rendah dibandingkan pendekatan viskoelastik, serta memberikan prediksi umur layan perkerasan yang lebih panjang.	Desain perkerasan menggunakan MDPJ 2024 terbukti menghasilkan kinerja yang lebih unggul dibandingkan MDPJ 2017, yang dimana perbedaan ini dapat terlihat pada presentase selisih nilai prediksi kerentanan kerusakan pada kedua MDPJ yaitu sebesar 5,5%.	Desain perkerasan lentur Bina Marga 2024 memiliki ketahanan struktural lebih baik dan umur layanan lebih panjang dibandingkan Bina Marga 2017, ditunjukkan oleh nilai ESAL yang lebih tinggi dan perbedaan jenis kerusakan awal akibat variasi ketebalan serta komposisi lapisan.	Pada Desain Bina Marga 2017 memiliki tebal lapis aspal yang lebih tebal dari Bina Marga 2025 dikarenakan adanya tambahan lapisan CTB. Hasil KENPAVE menunjukkan bahwa campuran Superpave dengan aspal PG 70 + karet lebih kuat dibandingkan aspal PEN 60/70 + karet pada desain Bina Marga 2017 dan 2024	Hasil perkerasan eksisting memiliki nilai <i>Marshall</i> . <i>Ekstrasi</i> , tebal lapisan yang sesuai dengan spesifikasi, akan tetapi saat dianalisis menggunakan KENPAVE menghasilkan tegangan dan regangan yang besar dibandingkan dengan Alternatif desain menggunakan CTB berdasarkan Bina Marga 2024. Alternatif CTB juga memiliki nilai ESAL lebih tinggi dibandingkan Alternatif menggunakan lapis pondasi agregat.

Sumber : Pambudi & Fauziah (2021), Hadi (2024), Zuasri & Fauziah (2024), Widhiatmoko & Fauziah (2024)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Desain Perkerasan Menggunakan Metode Bina Marga 2024

Pedoman Bina Marga 2024 memberikan penekanan pada aspek teknis yang mencakup tahapan desain, konstruksi, hingga pemeliharaan perkerasan jalan. Fokus utama pedoman ini meliputi pemilihan material yang sesuai standar, perencanaan desain struktural yang mampu menahan beban lalu lintas, serta penerapan strategi preventif dan rehabilitatif untuk mengantisipasi maupun memperbaiki kerusakan yang disebabkan oleh beban berulang dan pengaruh kondisi iklim. Dengan demikian, pedoman ini tidak hanya berfungsi sebagai acuan teknis, tetapi juga sebagai instrumen pengendali mutu dan keberlanjutan infrastruktur jalan di Indonesia. Adapun desain umur rencana berdasarkan jenis perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Umur Rencana Berdasarkan Jenis Perkerasan

Jenis perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (tahun)
Perkerasan Lentur	Lapis aspal dan lapis berbutir	20
	Lapis Fondasi jalan	40
	Semua perkerasan untuk lokasi yang tidak dimungkinkan pelapisan ulang (<i>overlay</i>), seperti jalan perkotaan, <i>underpass</i> , jembatan, dan trowongan	
	<i>Cement Treated Based</i> (CTB)	
Perkerasan Kaku	Lapis fondasi atas, lapis fondasi bawah, lapis beton semen, dan fondasi jalan	40
Jalan Tanpa Penutup	Semua elemen (termasuk fondasi jalan)	Minimum 10

Sumber : Bina Marga (2024)

Adapun pemilihan jenis perkerasan pada Metode Bina Marga 2024 dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Pemilihan Jenis Perkerasan Berdasarkan Bina Marga 2024

Struktur Perkerasan	Bagan Desain	ESA (juta) dalam 20 tahun (pangkat 4 kecuali ditentukan lain)				
		0 - 1	1 - 4	4 - 10	>10 - 30	>30
AC modifikasi AC dengan CTB AC modifikasi dengan CTB	3,3A,3B	-	-	-	- 2	2 - 2
AC dengan lapis fondasi agregat	3,3A,3B	-	1,2	1,2	2	-
HRS tipis di atas lapis pondasi agregat	4	2	2	-	-	-
Burda atau Burtu dengan lapis pondasi agregat	5	3	3	-	-	-
AC/HRS dengan lapis fondasi <i>Soil Cement</i>	6	2	2	-	-	-
AC/HRS dengan lapis fondasi agregat dan perbaikan tanah dasar (dengan stabilitas 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 : Bina Marga (2024)

Secara umum, dalam mendesain perkerasan ada beberapa prosedur yang harus di lakukan secara *step by step*. Adapun prosedur desain perkerasan lentur berdasarkan Bina Marga 2024 seperti berikut ini.

1. Menetapkan umur rencana (UR).

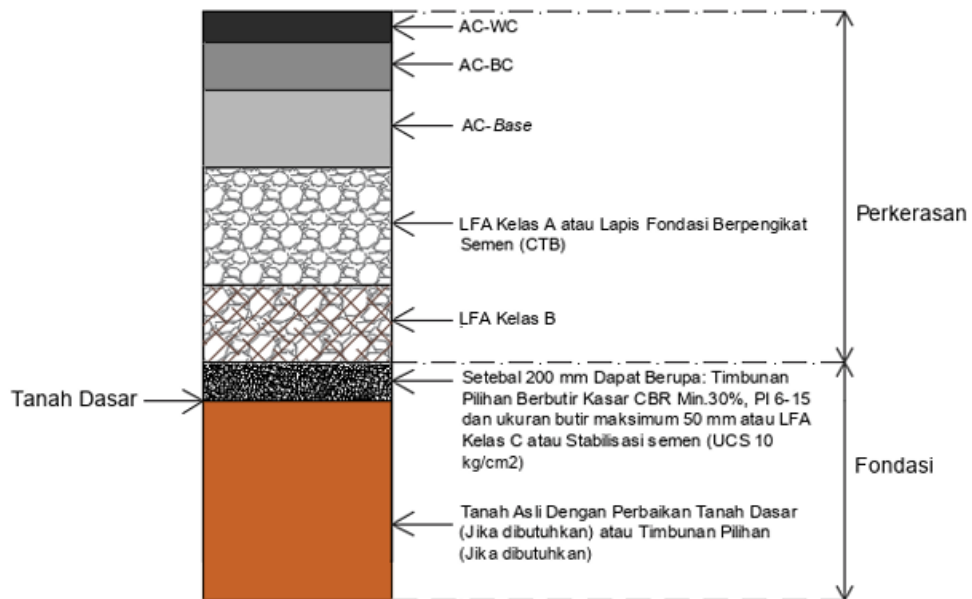
UR didefinisikan sebagai horizon layanan jalan (tahun) yang digunakan sebagai dasar perhitungan beban lalu lintas kumulatif dan strategi pemeliharaan. Penetapan UR mempertimbangkan fungsi jalan, kelas lalu lintas, dan kebijakan penyelenggara jalan.

2. Menghitung beban sumbu ekuivalen (ESA4 dan/atau ESA5).
Hitung lalu lintas rencana (LHR awal, laju pertumbuhan, komposisi kendaraan berat), terapkan faktor distribusi arah/lajur, lalu konversi menjadi kumulatif ESA4/ESA5 sepanjang UR. Dalam praktik, ESA4 sering dipakai untuk kontrol kelelahan (*fatigue*) lapis beraspal, sedangkan ESA5 untuk kontrol deformasi permanen (*rutting*) pada struktur bawah; gunakan yang dipersyaratkan oleh MDP 2024
3. Menentukan tipe perkerasan lentur (struktur/material).
Pilih tipe lapisan (AC-WC/AC-BC/AC-Base, HRS, lapis pondasi agregat) mengacu Tabel 3.1 MDP 2024 atau melalui analisis *discounted life-cycle cost* bila terdapat beberapa alternatif yang layak. Pertimbangkan ketersediaan material, iklim, dan tingkat layanan.
4. Menentukan segmen tanah dasar dengan daya dukung yang seragam.
Lakukan investigasi geoteknik (CBR, DCP, modulus) untuk memetakan segmen tanah dasar dengan daya dukung relatif seragam. Segmentasi ini diperlukan agar ketebalan desain mewakili kondisi lapangan yang sebenarnya.
5. Merancang struktur fondasi perkerasan.
Tentukan kebutuhan perbaikan tanah (stabilisasi, penggantian tanah lunak), tipe dan tebal lapis pondasi (*subbase/base*) agar mampu menyebarkan tegangan dan membatasi regangan pada tanah dasar sesuai kriteria MDP 2024.
6. Menentukan tebal struktur perkerasan dari bagan desain.
Gunakan Bagan Desain-3 atau bagan lain yang relevan untuk memetakan kombinasi ESA dan kekuatan tanah dasar menjadi total tebal serta distribusinya per lapis (AC-WC, AC-BC, AC-Base, LPB). Verifikasi

terhadap ketentuan tebal minimum, persyaratan material, dan kriteria kinerja (*fatigue/rutting*).

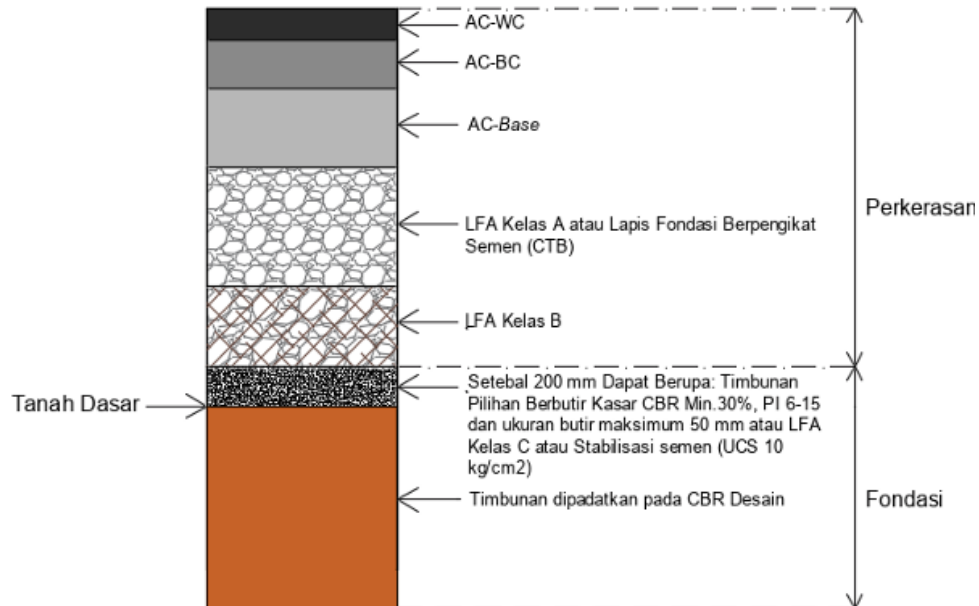
7. Menetapkan standar drainase bawah permukaan.
Rancang sistem drainase (lapis drainase, kemiringan, saluran tepi, geotekstil/geomembran bila perlu) agar waktu jenuh dan durasi kelembapan pada struktur minimum. Parameter drainase memengaruhi faktor koreksi kinerja pada MDP 2024.
8. Menetapkan kebutuhan daya dukung tepi perkerasan.
Evaluasi kebutuhan bahu/konstruksi tepi (bahu beraspal/beton/kerikil, *edge support* atau pelebaran lajur). Dukungan tepi yang memadai menurunkan kerusakan retak tepi dan deformasi lateral.
9. Menentukan kebutuhan pelapisan (*sealing*) bahu jalan.
Tentukan jenis pelapisan untuk mengurangi infiltrasi air dari bahu ke badan jalan, menjaga integritas sambungan, dan memperpanjang umur layanan.
10. Mengulang langkah 5–9 untuk setiap segmen seragam.
Untuk tiap segmen hasil langkah 4, lakukan literasi perancangan hingga seluruh segmen memenuhi kriteria MDP 2024. Dokumentasikan asumsi, data input, hasil perhitungan, dan rekomendasi pemeliharaan awal (*baseline maintenance*).

Adapun beberapa tipe desain perkerasan lentur dapat dilihat pada Gambar 3.1 sampai 3.3 berikut ini.



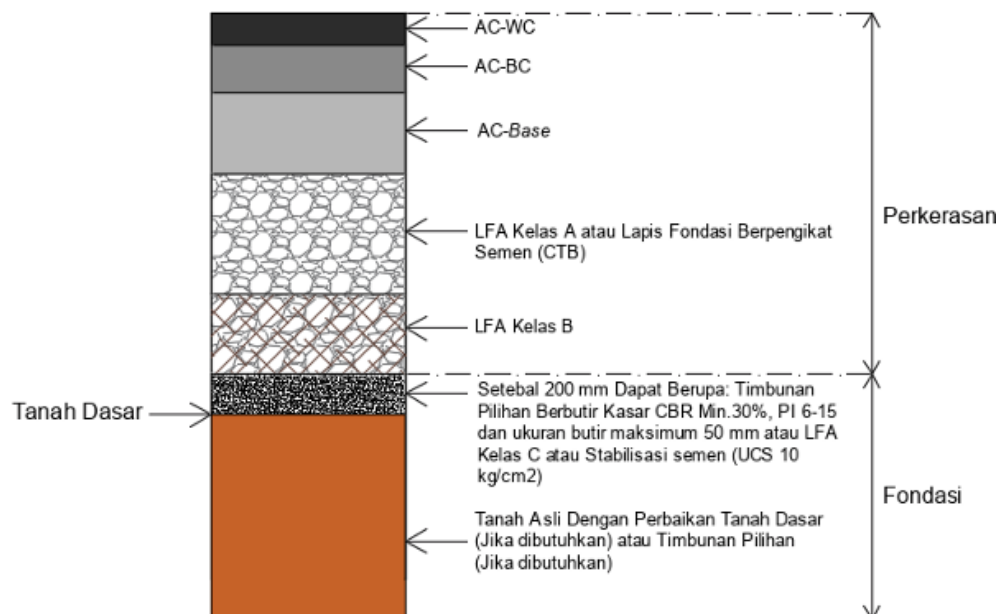
Gambar 3. 1 Tipe 1 Perkerasan Lentur Pada Permukaan Tanah Asli (At Grade)

Sumber : Bina Marga (2024)



Gambar 3. 2 Tipe 2 Perkerasan Lentur Pada Timbunan

Sumber : Bina Marga (2024)



Gambar 3. 3 Perkerasan Lentur Pada Galian

Sumber : Bina Marga (2024)

Secara detail perhitungan desain lapisan perkerasan dapat dilakukan dengan beberapa langkah berikut ini.

1. Melakukan survey volume lalu lintas, dan menghitung lalu lintas harian rata-rata (LHRT) setiap jenis kendaraan.
2. Melakukan perhitungan pertumbuhan lalu lintas menggunakan faktor pertumbuhan lalu lintas dan hasil perhitungan LHRT. Adapun faktor pertumbuhan dan perhitungan seperti berikut ini.

Adapun nilai faktor laju pertumbuhan berdasarkan jenis jalan dan daerahnya dapat dilihat pada rangkuman Tabel 3.3 berikut ini.

Tabel 3. 3 Faktor Laju Pertumbuhan (R)

	Jawa	Sumatera	Kalimantan	Rara-rata Indonesia
Arteri dan perkotaan	4,80	4,83	5,14	4,75
Kolektor rural	3,5	3,5	3,5	3,5
Jalan desa	1,00	1,00	1,00	1,00

Sumber : Bina Marga (2024)

Perhitungan lalu lintas dapat menggunakan Persamaan 3.1 berikut ini.

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

(3.1)

Keterangan ;

R = faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif,

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

UR = umur rencana (tahun).

- Menentukan faktor distribusi lajur (DL), Adapun untuk nilai faktor distribusi lajur (DL) dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Faktor Distribusi Lajur (DL)

Jumlah Lajur setiap arah	Kendaraan niaga pada lajur desain (% terhadap populasi kendaraan niaga)
1	100
2	80
3	60
4	50

Sumber : Bina Marga (2024)

- Menentukan faktor ekivalen beban (*Vehicle Damage Factor*),

Faktor ekivalen beban atau *Vehicle Damage Factor (VDF)* merupakan jumlah kumulatif nilai beban sumbu ekivalen standar (*Equivalent Standard Axle Load/ESA*) yang dihasilkan oleh suatu jenis kendaraan. Nilai ini menggambarkan tingkat kerusakan relatif yang ditimbulkan kendaraan tersebut terhadap perkerasan jalan jika dibandingkan dengan beban sumbu standar. Dengan demikian, semakin tinggi nilai VDF maka semakin besar pula kontribusi kendaraan tersebut dalam mempercepat kerusakan perkerasan. Nilai faktor ekivalen beban untuk berbagai jenis kendaraan dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Data Beban Gandar

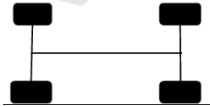
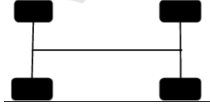
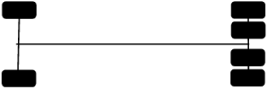
Spesifikasi penyediaan Prasarana Jalan	Sumber Data Beban Gandar
Jalur bebas hambatan	1 atau 2
Jalan Raya	1 atau 2 atau 3
Jalan Sedang	2 atau 3
Jalan Kecil	2 atau 3

Sumber : Bina Marga (2024)

5. Klasifikasi dan konfigurasi sumbu kendaraan

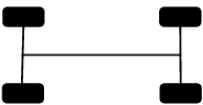
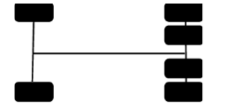
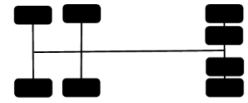
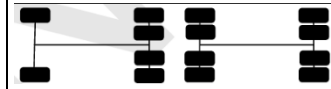
Dalam perencanaan struktur perkerasan jalan, klasifikasi kendaraan berdasarkan jumlah serta konfigurasi sumbu memiliki peran penting karena menjadi dasar dalam menghitung beban lalu lintas yang dinyatakan dalam satuan *Equivalent Single Axle Load* (ESAL). Melalui klasifikasi ini, setiap jenis kendaraan dapat diidentifikasi kontribusinya terhadap kerusakan perkerasan jalan sesuai dengan karakteristik beban sumbu yang dimilikinya. Dengan demikian, analisis lalu lintas dapat dilakukan secara lebih akurat. Klasifikasi kelompok kendaraan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok Sumbu	Skema Konfigurasi	
1	Sepeda motor dan kendaraan roda-3				
2	Kendaraan ringan – sedan, jeep, dan <i>station wagon</i>	1.1	2		
3	Kendaraan ringan – angkutan umum sedang	1.1	2		
4	Kendaraan ringan – <i>pick up</i> , <i>micro truck</i>	1.1	2		
5A	Bus Kecil	1.1	2		
5B	Bus Besar	1.2	2		

Sumber : Bina Marga (2024)

Lanjutan Tabel 3.6 Klasifikasi dan Konfigurasi Sumbu Kendaraan

Klasifikasi Kendaraan	Uraian	Konfigurasi Sumbu	Kelompok Sumbu	Skema Konfigurasi	
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		
7B1	Truk 5 sumbu - berat	1.2+2.2	4		
7 C1	Truk 4 sumbu - berat	1.2-22	3		

Sumber : Bina Marga (2024)

6. Melakukan perhitungan beban sumbu standar komulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESAL)*. Adapun perhitungannya dapat menggunakan Persamaan 3.2 berikut ini

$$CESA L_{TH-1} = (\sum LHR_{JK} \times VDF_{JK}) \times 365 \times DD \times DL \times R \quad (3.2)$$

Keterangan ;

$CESAL_{TH-1}$ = kumulatif lintasan sumber standar ekivalen (*equivalent standard axle*) pada tahun pertama,

LHR_{JK} = lintas harian rata – rata (kendaraan perhari),

VDF_{JK} = faktor ekivalen beban (*vehicle damage factor*),

DD = faktor distribusi arah,

DL = faktor distribusi lajur,

$CESAL$ = kumulatif beban sumbu standar ekivalen selama umur rencana, dan

R = faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif.

7. Perkiraan Lalu Lintas untuk Lalu Lintas Rendah

Pada daerah dengan lalu lintas rendah yang data lalu lintas tidak tersedia atau diperkirakan terlalu rendah maka menggunakan Tabel 3.7 berikut ini.

Tabel 3. 7 Perkiraan Lalu Lintas Untuk Jalan Lalu Lintas Rendah

Deskripsi Jalan	LHR Dua Arah (Kend/hari)	Kendaraan Berat (% dari Lalu Lintas)	Umur Rencana (th)	Pertumbuhan Lalu Lintas (%)	Faktor Pengali Pertumbuhan Kumulatif Lalu Lintas	Beban Lalu Lintas Desain (Aktual) (ESA4)
Jalan desa minor dengan akses kendaraan terbatas	50	5	20	1	22	25.000
Jalan kecil dua arah	100	5	20	1	22	45.000
Jalan lokal	500	10	20	1	22	500.000

Sumber : Bina Marga (2024)

8. Menentukan tebal perkerasan menggunakan bagan desain. Untuk desain tebal perkerasan menggunakan CTB dapat dilihat pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.10 berikut ini

Tabel 3. 8 Desain Perkerasan Bagan Desain 3(1) dengan 150 mm CTB

	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
	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 (10^6 ESA5)	>1-6	>6-10	>10-20	>20-30	>30-40	>40-50	>50-80	>80-100
Jenis permukaan berpengikat	AC							
Jenis Lapis Pondasi	Cement Treated Base (CTB)							
	Tebal Perkerasan (mm)							
‘AC WC	40	40	50	40	40	40	40	50
AC BC	60	75	80	65	60	60	80	80
	-	-	-	70	-	-	-	-
AC Base	-	-	-	-	90	100	100	100
	-	-	-	-	-	-	-	-
CTB	150	150	150	150	150	150	150	150
Lapis Fondasi Agregat Kelas B	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 : Bina Marga (2024)

Tabel 3. 9 Desain Perkerasan Bagan Desain 3 (2) dengan 200 mm CTB

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

Sumber : Bina Marga (2024)

Tabel 3. 10 Desain Perkerasan Bagan Desain 4 Dengan HRS

Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur (10^6 CESA 5)	FF1 < 0,5	$0,5 \leq FF2 \leq 4,0$
Jenis permukaan	HRS atau Penetrasi Makadam	HRS
Struktur Perkerasan	Tebal Lapisan (mm)	
HRS - WC	50	30
HRS - Base	-	35
LFA Kelas A	150	250
LFA Kelas B atau kerikil alam atau lapis distabilitas dengan CBR > 10%	150	150

Selain menggunakan CTB ada perkerasan lentur dengan Lapis Fondasi Agregat yang dapat pada Tabel 3.11 berikut ini.

Tabel 3. 11 Desain Perkerasan Lentur dengan Lapis Pondasi Agrergat

	Struktur Perkerasan								
	FFF(1) 1	FFF(1) 2	FFF(1) 3	FFF(1) 4	FFF(1) 5	FFF(1) 6	FFF(1) 7	FFF(1) 8	FFF(1) 9
	Untuk beban rencana <30 juta ESA5 menggunakan Aspal Pen 60-70					Untuk beban rencana >30 juta ESA5 direkomendasikan menggunakan Aspal PG70			
Beban Rencana 20 tahun (10^6 ESA5)	<2	>2-5	>5-10	>10-15	>15-30	>30-50	>50-100	>100-150	>150-200
	Tebal Perkerasan (mm)								
'AC WC	60	40	40	40	40	40	40	50	40
AC BC	-	65	75	75	60	60	75	80	60
	-	80	80	-	-	-	-	-	-

Lanjutan Tabel 3.11 Desain Perkerasan Lentur dengan Lapis Pondasi Agregat

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	200

Sumber : Bina Marga (2024)

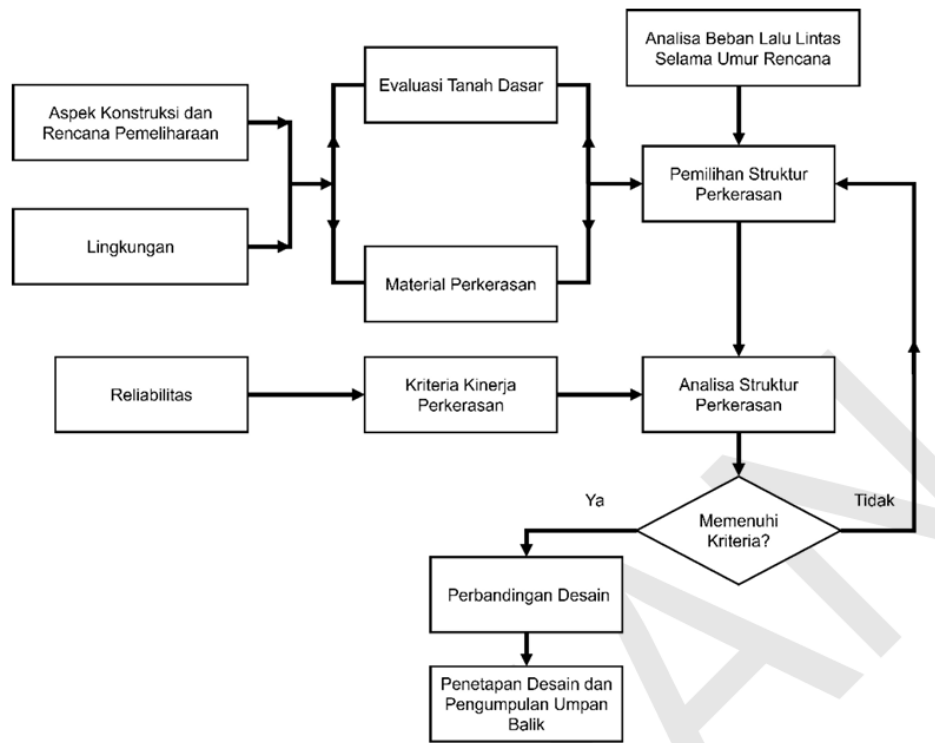
9. Setelah menentukan tebal lapis perkerasan maka karakteristik modulus bahan atau modulus tipikal atau modulus elastisitas campuran juga harus ditentukan. Adapun nilai modulus yang sudah ditetapkan berdasarkan Bina Marga 2024 dapat dilihat pada Tabel 3.12 berikut ini.

Tabel 3. 12 Karakteristik Modulus Bahan Berpengikat

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

Sumber : Bina Marga (2024)

Desain perkerasan dilakukan secara iteratif, dimulai dengan asumsi awal struktur yang mampu menahan beban rencana, diikuti analisis regangan kritis. Jika hasil analisis menunjukkan bahwa struktur tidak memenuhi kriteria desain, maka dilakukan modifikasi dimensi atau material, dan proses analisis diulang hingga struktur memenuhi syarat kinerja.



Gambar 3. 4 Flowchart Prosedur Desain Perkerasan Lentur Menggunakan Pendekatan Mekanistik
Sumber : Bina Marga (2024)

3.2 Modulus Kekakuan Menggunakan Hasil Karakteristik Aspal dan Marshall

Aspal dikenal sebagai material viskoelastik karena memiliki kemampuan untuk berperilaku baik sebagai fluida (viskos) maupun sebagai padatan elastis, tergantung pada kondisi suhu dan durasi pembebanan. Karakteristik utama yang menggambarkan respons mekanis aspal terhadap perubahan suhu dan waktu pembebanan disebut *stiffness* atau kekakuan. Kekakuan aspal berperan penting dalam

menentukan kinerja lapisan perkerasan terhadap retak akibat kelelahan maupun deformasi permanen seperti alur (*rutting*).

Terdapat dua jenis kekakuan yang umum digunakan dalam analisis perkerasan, yaitu *stiffness modulus of bitumen* (*Sbit*) yang merepresentasikan kekakuan bahan pengikat aspal murni, serta *stiffness modulus of mixture* (*Smix*) yang menggambarkan kekakuan campuran aspal secara keseluruhan, termasuk kontribusi agregat dan bahan pengisi. Kedua parameter ini berperan penting dalam perencanaan perkerasan, karena mempengaruhi ketahanan struktural dan umur layan jalan terhadap beban lalu lintas dan kondisi lingkungan.

Modulus kekakuan bitumen (*Sbit*) merupakan parameter yang menggambarkan tingkat kekakuan material aspal murni dalam menahan deformasi akibat pembebanan. Nilai *Sbit* dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti suhu, durasi pembebanan, kemampuan pemulihan setelah pelunakan (*recovering softening of bitumen*). Adapun perhitungan dapat menggunakan Persamaan 3.3 berikut ini.

$$S_{bit} = 1,154 \times 10^{-1} \times t^{-0,368} \times 2,718^{-Pir} \times (Spr - T)^5 \quad (3.3)$$

Dengan :

t = lama pembebanan 0,01 detik s/d 0,1 detik,

Pir = *recovered penetration index* pada 25°C,

Spr = *recovered softening point*, dan

T = temperatur aspal.

Adapun nilai Pir dan Spr dapat dicari dengan menggunakan Persamaan 3.4 hingga 3.6 berikut ini.

$$Pir = \frac{1951,4 - (500 \times \log(Pr)) - (20 \times Spr)}{(50 \times \log(Pr)) - Spr - 120,14} \quad (3.4)$$

$$Spr = 98,4 - 26,35 \times \log(Pr) \quad (3.5)$$

$$Pr = 0,65 \times Pi \quad (3.6)$$

Dengan :

Pi = penetrasi awal, dan

P_r = *recovered penetration* pada suhu 25°C.

Modulus kekakuan campuran (S_{mix}) merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan campuran perkerasan dalam menahan beban lalu lintas, terutama beban roda kendaraan. Nilainya dipengaruhi oleh suhu dan durasi pembebanan, sejalan dengan sifat viskoelastik aspal sebagai pengikat utama. S_{mix} berperan penting dalam menentukan tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan serta menjadi faktor kunci dalam analisis kinerja dan umur layanan jalan. Penghitungan modulus kekakuan campuran dilakukan menggunakan metode Nottingham seperti pada Persamaan 3.7 berikut ini.

$$S_{mix} = S_{bit} \times \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 \times VMA}{n \times (VMA - 3)}\right)^n \quad (3.7)$$

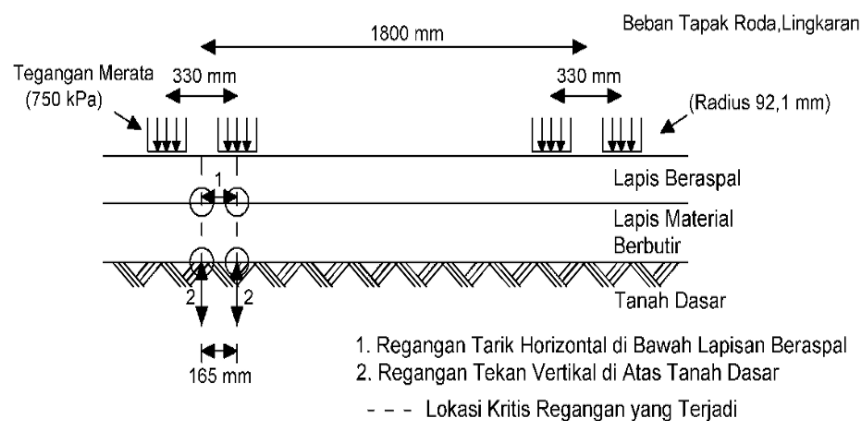
Dengan :

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

3.3 Analisis Mekanik – Empirik Menggunakan KENPAVE

Prosedur desain perkerasan lentur dalam Bina Marga 2024 Pada Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 didasarkan pada karakteristik mekanik material dan pendekatan analisis mekanistik, yang mengaitkan beban roda, struktur perkerasan, dan sifat material dengan respons struktural seperti tegangan, regangan, dan lendutan. Respons struktural digunakan untuk memprediksi deformasi permanen dan retak lelah pada perkerasan, sehingga metode ini disebut mekanistik-empiris karena menggabungkan hasil uji laboratorium dengan observasi lapangan. Model struktur perkerasan dalam manual ini menggunakan pendekatan multi-lapisan elastik linier, dengan asumsi material berpengikat bersifat isotropik, sedangkan material tanpa pengikat bersifat anisotropik; lapisan CTB diasumsikan berada dalam kondisi pasca-retak (*post-cracking*).

Prosedur desain ini didasarkan pada dua regangan kritis yang memengaruhi kinerja perkerasan, yaitu regangan tekan vertikal di permukaan tanah dasar untuk mengendalikan deformasi permanen, dan regangan tarik horizontal di serat bawah lapis berpengikat untuk mengontrol retak lelah. Kedua regangan tersebut dipengaruhi oleh sifat mekanik material, struktur lapisan, serta beban lalu lintas, dan dianalisis menggunakan model kinerja struktural atau fungsi transfer. Meskipun analisis berdasarkan spektrum beban aktual dari studi WIM dimungkinkan melalui pendekatan mekanistik, manual ini menyederhanakannya dengan menggunakan beban ekuivalen standar (ESA), sehingga perhitungan regangan kritis dilakukan berdasarkan beban sumbu standar. Adapun model perkerasan pada mekanistik empirik dapat dilihat pada Gambar 3.5 berikut ini.



Gambar 3. 5 Model Perkerasan Pada Prosedur Mekanistik Empirik
Sumber : Bina Marga (2024)

3.2.1 Karakteristik Material Lapisan Elastik dan Viskoelastik

Karakteristik material pada struktur perkerasan dapat diklasifikasikan ke dalam lapisan viskoelastik dan elastik. Pemodelan lapisan elastik digunakan untuk menghitung tegangan, regangan, dan defleksi akibat beban pada perkerasan, dengan asumsi bahwa setiap lapisan bersifat homogen, isotropik, dan elastis linier (Huang, 2004). Sifat viskoelastis diterapkan dalam analisis lapisan aspal karena respons material bergantung pada waktu pembebanan. Analisis dilakukan menggunakan prinsip korespondensi elastis-viskoelastik melalui transformasi Laplace untuk mengeliminasi variabel waktu (Huang, 2004). Karakterisasi material viskoelastis

dilakukan dengan menentukan fungsi relaksasi atau ketaatan pada 11 interval waktu, mulai dari 0,001 hingga 100 detik.

3.2.2 Analisis Menggunakan KENPAVE

Analisis struktur perkerasan jalan dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak KENPAVE, yang terdiri atas dua modul utama, yaitu *Kenlayer* untuk analisis perkerasan lentur dan *Kenslab* untuk analisis perkerasan kaku. Perangkat lunak ini memiliki kemampuan untuk mensimulasikan berbagai kondisi perkerasan, baik linier, non-linier, viskoelastik, maupun kombinasi dari ketiganya. Prinsip dasar KENPAVE berlandaskan pada pendekatan mekanistik, yakni dengan menghitung respons struktural perkerasan berupa tegangan, regangan, dan defleksi terhadap beban lalu lintas yang diaplikasikan.

Untuk menjalankan analisis, perangkat ini membutuhkan sejumlah parameter masukan, antara lain tebal masing-masing lapisan perkerasan, modulus elastisitas, rasio Poisson, tekanan ban, serta besar beban roda yang diasumsikan. Parameter-parameter tersebut berperan penting dalam menentukan ketahanan struktural perkerasan, karena setiap variabel memiliki pengaruh langsung terhadap distribusi tegangan dan regangan antar lapisan. Hasil simulasi yang diperoleh tidak hanya menggambarkan kondisi aktual perkerasan, tetapi juga memungkinkan dilakukan prediksi terhadap umur rencana (*design life*) dan potensi kerusakan dini akibat beban berulang. Dengan demikian, penggunaan KENPAVE dalam penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih komprehensif, objektif, dan efisien dibandingkan metode empiris semata, karena mampu mengintegrasikan data mekanistik-empirik untuk mendukung proses perencanaan dan evaluasi kinerja perkerasan jalan secara ilmiah.

Hasil simulasi yang dihasilkan berupa nilai tegangan, regangan, dan defleksi pada setiap lapisan, yang berfungsi sebagai indikator penting dalam menilai ketahanan struktur perkerasan terhadap beban berulang. Selanjutnya, nilai-nilai tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan umur layanan perkerasan serta mendukung perencanaan pemeliharaan jalan yang lebih akurat dan efisien (Tolab et al., 2022). Dengan demikian, KENPAVE dapat dikatakan sebagai perangkat

yang komprehensif dalam mengevaluasi baik desain awal maupun kondisi aktual struktur perkerasan jalan.

3.2.3 Analisis Kerusakan Perkerasan

Dalam perhitungan untuk mencari nilai *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent deformation*. Adapun persamaan terdapat pada *Asphalt Institute* (1982) yang dapat dilihat seperti berikut ini.

1. *Fatigue cracking*

Retak fatik merupakan kerusakan progresif yang terjadi akibat pembebanan berulang, di mana retakan menyebar hingga menutupi permukaan perkerasan. Meskipun tegangan berada di bawah ambang batas kekuatan material, akumulasi beban berulang dari lintasan roda kendaraan secara acak tetap dapat memicu kelelahan material dan menyebabkan retak (Pradasari, 2023). Adapun perhitungan *fatigue cracking* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.8 berikut ini.

$$N_f = 0,0796 \times \epsilon_t^{-3,921} \times E^{-0,854} \quad (3.8)$$

2. *Rutting*

Rutting merupakan deformasi permanen pada permukaan perkerasan yang terjadi akibat akumulasi deformasi plastis pada lapisan aspal, lapisan dasar, dan tanah dasar. Dalam analisis mekanistik, rutting dan retak lelah digunakan sebagai indikator utama kegagalan struktural akibat beban berulang. Karena dapat membahayakan pengemudi, terutama pada kecepatan tinggi, maka kedalaman alur harus dibatasi. *Rutting* bersifat sulit diprediksi karena dapat terjadi pada berbagai lapisan, dan tekanan vertikal pada tanah dasar sering menjadi parameter penting dalam evaluasi (Pradasari, 2023). Adapun perhitungan *rutting* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.9 berikut ini.

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon_c^{-4,47} \quad (3.9)$$

3. *Permanent Deformation*

Permanent Deformation atau deformasi permanen pada perkerasan adalah jenis kerusakan yang ditandai dengan perubahan bentuk tetap (*irreversible*) pada lapisan

perkerasan akibat pembebanan berulang dari kendaraan. Kerusakan ini umumnya terjadi karena akumulasi regangan plastis pada material perkerasan, terutama pada lapisan permukaan (aspal), lapisan dasar, atau bahkan tanah dasar (*subgrade*). Adapun perhitungan *permanent deformation* dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.10 berikut ini.

$$Nd = 1,365 \times 10^{-9} \times \epsilon_C^{-4,47} \quad (3.10)$$

Dengan ;

NF = nilai pengulangan beban *fatigue cracking*,

Nr = nilai pengulangan beban *rutting*,

Nd = nilai pengulangan beban *permanent deformation*,

ϵ_t = regangan tarik arah horizontal bagian bawah lapis aspal, dan

ϵ_C = regangan tarik arah vertikal bagian atas lapisan dasar (Nr),
dan bagian bawah lapisan pondasi (Nd).

3.2.4 Umur Sisa Layanan

Umur sisa layanan perkerasan merupakan indikator kemampuan struktural suatu perkerasan jalan dalam menahan beban lalu lintas berulang hingga mencapai batas kerusakan yang diizinkan. Secara prinsip, umur sisa layanan mencerminkan perbandingan antara jumlah lalu lintas aktual yang telah melewati perkerasan dengan jumlah repetisi beban maksimum yang masih dapat ditahan sebelum terjadi kegagalan struktural. Nilai ini berfungsi sebagai parameter penting dalam evaluasi kinerja jalan, karena dapat digunakan untuk menentukan kebutuhan pemeliharaan atau rehabilitasi sebelum terjadi penurunan fungsi yang signifikan. Perhitungan umur sisa layanan merupakan menghubungkan antara beban lalu lintas kumulatif, umur rencana, serta kapasitas struktur perkerasan dalam menahan beban hingga batas keruntuhan.

Adapun perhitungan umur sisa layanan secara matematis dapat dinyatakan melalui Persamaan 3.11 berikut ini

$$RL_{fatigue} = 100 \times \left(1 - \frac{Nr}{Nf}\right) \quad (3.11)$$

Dengan :

RL = *remaining Life* (%),

Nr = *total traffic* yang telah melewati perkerasan (ESAL), dan

N = *total traffic* pada kondisi perkerasan berakhir (*failure*) (ESAL)

BAB IV

METODE PENELITIAN

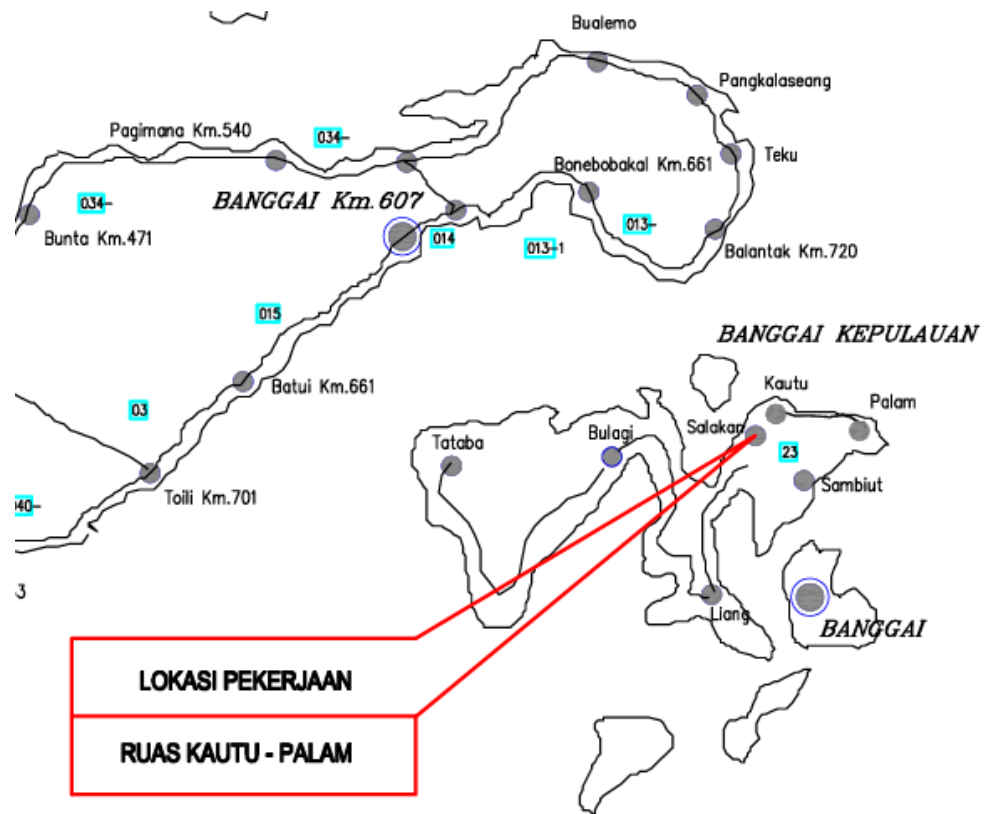
4.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian kuantitatif dengan menggunakan metode simulasi numerik berbasis perangkat lunak melalui pendekatan mekanistik-empirik. Penelitian kuantitatif tersebut didasarkan pada pemanfaatan data numerik, seperti tebal lapisan perkerasan, nilai modulus elastisitas, rasio Poisson, serta parameter teknis lainnya yang dianalisis secara matematis dan mekanistik. Eksperimen dalam penelitian ini tidak dilakukan secara langsung di lapangan, melainkan menggunakan pengujian *Marshall* untuk mendapatkan parameter modulus elastisitas material *Sbit* dan *Smix*, serta KENPAVE untuk melakukan analisis struktur perkerasan dengan pendekatan mekanistik-empirik.

Penelitian ini berfokus pada pemodelan perilaku perkerasan jalan melalui pendekatan komputasional, di mana hasil yang diperoleh tidak hanya relevan secara teoritis tetapi juga memiliki nilai praktis dalam mendukung perencanaan dan evaluasi kinerja perkerasan. Selain itu, penggunaan metode ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik sipil, khususnya dalam penerapan analisis berbasis mekanistik-empirik yang menjadi standar modern dalam desain dan evaluasi struktur perkerasan.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada proyek perbaikan ruas Jalan Kautu–Palam yang berlokasi di Kabupaten Banggai Kepulauan, Provinsi Sulawesi Tengah. Pemilihan lokasi tersebut didasarkan pada kondisi eksisting jalan yang memerlukan perbaikan struktural sehingga relevan untuk dianalisis dalam konteks penelitian ini. Adapun letak geografis dan posisi lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Lokasi Penelitian

Sumber : *As Built Drawing* Dinas PUPR Kab. Banggai Kepulauan (2024)

4. 3 Pengumpulan Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Banggai Kepulauan Sulawesi Tengah. Adapun beberapa data penelitian antara lain :

1. *As Built Drawing* Tahun 2023 dan Tahun 2024.
2. Desain Perencanaan Perkerasan AC-WC.
3. Data Lalu Lintas Harian Rata- Rata Tahun 2023 dan 2025.
4. Nilai CBR tanah dasar.
5. Data tebal perkerasan.

Selain menggunakan data sekunder, penelitian ini juga menggunakan data primer yang berupa data hasil pengujian *Marshall* untuk mencari nilai modulus eksisting.

4.4 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian ini antara lain :

1. Melakukan pengambilan sampel *core drill* sebagai benda uji pengujian *Marshall*.
2. Melakukan pengujian *Marshall* dan perhitungan *Sbit* untuk mendapatkan nilai *Smix*.
3. Melakukan analisis menggunakan KENPAVE dalam kondisi eksisting perkerasan.
4. Mengelola hasil analisis eksisting KENPAVE untuk menghitung umur sisa layanan perkerasan eksisting.
5. Melakukan pendataan jumlah kendaraan yang melewati ruas jalan yang dalam penelitian ini menggunakan data sekunder dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penata Ruang Kabupaten Banggai.
6. Menghitung LHR menggunakan Manual Desain Perkerasan 2024.
7. Melakukan perencanaan desain tebal lapis perkerasan berdasarkan hasil LHR yang mengacu pada tabel alternatif desain pada metode Manual Desain Perkerasan 2024.
8. Melakukan analisis menggunakan KENPAVE dengan metode Manual Desain Perkerasan 2024.
9. Mengelola hasil analisis perencanaan desain.
10. Membuat kesimpulan penelitian.

4.5 Tahapan Pelaksanaan *Coredrill*

Tahapan pelaksanaan *coredrill* adalah sebagai berikut.

1. Memilih lokasi pengambilan sampel *coredrill* berdasarkan kebutuhan. Biasanya satu ruas diambil 3-5 titik per km.
2. Sebelum dilakukan pengeboran diperlukan pembersihan area dari debu, pasir dan material lainnya agar hasil pengeboran tidak terkontaminasi.
3. Pengeboran dilakukan dengan posisi tegak lurus terhadap perkerasan. Selama proses pengeboran selalu dibasahi dengan air mengalir agak mempermudah pengeboran.

4. Ambil hasil pengeboran dengan menggunakan capit pengambil sampel.
5. Lakukan penamaan sampel yang terdiri dari kode lokasi (STA atau lainnya), jenis lapisan, posisi pengambilan.

4.6 Tahapan Pengujian *Marshall* dan Mencari nilai modulus

Sampel *coredrill* yang sudah diambil dilakukan pengujian *marshall* untuk mengetahui karakteristiknya dan mencari nilai modulus menggunakan hasil nilai VMA (*void minerale aggregate*). Adapun tahapannya sebagai berikut.

1. Sampel *coredrill* dibersihkan hingga tidak ada sisa *coredrill* yang menempel.
2. Timbang sampel dalam keadaan kering, lalu sampel direndam dalam bak perendam selama >16 jam.
3. Timbang sampel dalam air. Selanjutnya, permukaan sampel dikeringkan dengan kain lembap hingga tidak tampak mengilap, menandakan bahwa permukaannya telah mencapai kondisi *Saturated Surface Dry* (SSD) atau kering permukaan jenuh. Setelah itu, sampel ditimbang kembali dalam kondisi tersebut untuk memperoleh berat SSD secara akurat.
4. Masukkan sampel kedalam *waterbath* dengan suhu 60°C selama 30 menit.
5. Setelah 30 menit sampel diuji dengan mesin *marshall* dengan membaca dial stabilitas dan *flow*.
6. Dilakukan pengolahan data karakteristik *marshall*, setelah didapatkan nilai VMA maka dilakukan perhitungan nilai *Smix*.
7. Melakukan perhitungan *Sbit* dengan menggunakan Persamaan 3.3, dari nilai titik lembek dan penetrasi aspalnya.
8. Melakukan perhitungan *Smix* dengan menggunakan Persamaan 3.7.

4.7 Tahapan Pengujian Ekstraksi

Pengujian Ekstraksi dilakukan untuk mengetahui kadar aspal pada campuran beton aspalnya. Adapun langkah – langkahnya sebagai berikut.

1. Oven sampel setelah pengujian *marshall* untuk menghilangkan kadar air akibat perendaman dan membuat sampel menjadi gembur sehingga mudah dalam proses penimbangan.

2. Timbang sampel sebanyak 500 gr. Setelah sampel tidak lagi panas maka rendam sampel dengan pertamax hingga terendam seutuhnya dan biarkan minimal 2 jam (proses pelarutan aspal oleh zat pelarut).
3. Masukkan kertas saring kedalam oven untuk mengurangi kadar airnya lalu ditimbang.
4. Setelah minimal 2 jam perendaman zat pelarut, aspal dituang kedalam *bowl* pada alat *centrifugal exctractor*, pasang kertas saring, lalu tutup alatnya.
5. Letakkan cawan pada tempat keluarkan zat pelarut sebagai endapan, lalu putar alat hingga bensin pada bowl habis atau sampai bensin tidak lagi menetes.
6. Lakukan 2-3 kali hingga tetesan bensin berwarna sedikit bening atau berwarna kuning yang menandakan kadar aspal pada sampel sudah terlarut seutuhnya.
7. Mengeluarkan sampel dari *bowl* ke cawan, dan oven cawan berisi agregat sampel, cawan berisi endapan bensin, serta kertas saringnya.
8. Menimbang cawan berisi agregat sampel, cawan berisi endapan bensin, dan kertas saring.
9. Melakukan olah data untuk mendapatkan hasil kadar aspalnya.

4.8 Tahapan Desain Lapisan Perkerasan Berdasarkan Manual Desain Perkerasan 2024

Adapun tahapan desain perkerasan berdasarkan Manual Desain Perkerasan 2024 adalah sebagai berikut.

1. Melakukan perhitungan jumlah kendaraan yang melewati ruas jalan yang dalam penelitian ini menggunakan data sekunder dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penata Ruang Kabupaten Banggai.
2. Menghitung faktor pertumbuhan lalu lintas
3. Menghitung pertumbuhan lalu lintas harian tahunan
4. Menentukan faktor distribusi arah
5. Menentukan faktor distribusi jalur

6. Menentukan faktor ekivalen beban pada Manual Desain Perkerasan 2024 dan nilai VDFnya
7. Menghitung nilai komulatif lalu lintas standar ekivalen ESA.
8. Menentukan tebal perkerasan dari nilai ESA sesuai dengan metode Manual Desain Perkerasan 2024.

4.9 Tahapan Analisis Menggunakan KENPAVE

Adapun tahapan analisis menggunakan KENPAVE adalah

1. Mencari informasi atau menghitung tebal perkerasan mulai dari aspal hingga pondasinya. Penelitian ini tebal menggunakan tebal eksisting dan melakukan desain ulang dengan metode Manual Desain Perkerasan 2024.
2. Mencari nilai modulus elastisitas. Untuk data ini bisa menggunakan nilai modulus yang disediakan pada Bina Marga, akan tetapi pada penelitian ini untuk modulus elastisitas aspal dicari dengan pengujian *Marshall* dan perhitungan *Sbit* untuk mendapatkan nilai *Smix*.
3. Mencari nilai *poisson ratio* tiap lapis perkerasan.
4. Melakukan *input* pada KENPAVE di bagian KENLAYER yaitu model struktur untuk perkerasan lentur.
5. Melakukan *input* kedalaman pada *Zcoord* atau tebal dari masing-masing lapisan pekerasan lentur.
6. Melakukan *input* nilai *Poisson ratio*
7. Melakukan *input* nilai Modulus Elastisitas. Pada penelitian ini modulus elastisitas lapis pondasi menggunakan data dari Bina Marga, untuk lapisan perkerasan aspal menggunakan hasil pengujian *Marshall* dan perhitungan *Smix*.
8. Melakukan *input* beban roda, jarak antar roda arah X dan Y dan titik koordinat dari tegangan dan rengangan yang ditinjau.
9. Analisis Hasil KENPAVE menggunakan Excel

4.10 Analisis Program KENPAVE

Analisis menggunakan KENPAVE merupakan program yang digunakan pada penelitian ini untuk menunjang perhitungan estimasi umur layanan perkerasan jalan

secara mekanistik empirik. Adapun pada KENPAVE terdiri dari dua menu yaitu KENLAYER yang digunakan untuk menganalisis perkerasan lentur, dan KENSLAB yang digunakan untuk menganalisis perkerasan kaku. Adapun menu *General* pada KENPAVE pada dilihat pada Gambar 4.2.

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

(1) This form appears when the 'General' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. To read this textbox more easily with more lines in sight, you may want to resize this form by moving it up and dragging the bottom boundary down. If you want to use the PgDn key to scroll down the page, you must click this textbox first to make it active, as indicated by the blinking cursor. When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system of units, so they are generated after NUNIT is specified and this form activated. These default values are generated only once, i.e.

Gambar 4. 2 Menu General KENLAYER

Setelah melakukan *input* pada pada menu *general*, maka menu yang kita perlu lakukan *input* data ada pada menu *Zcoord* . Adapun menu *Zcoor* dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini.

Unit	in
Point No.	ZC
1	6
2	10

(1) This form appears when the 'Zcooord' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of Z coordinates on this form is equal to NZ, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If the dotted rectangle is not at the location for input, you can use the arrow key to move the dotted rectangle to the cell you want to input, or more conveniently by clicking the cell you want. To read this textbox by the PgDn key, you have to click anywhere in the box to make it active. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press

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

Gambar 4. 3 Menu Zcooord KENLAYER

Zcooord digunakan untuk memasukkan data ketebalan pada setiap lapisan perkerasan lentur, meliputi lapisan aus (AC-WC), lapisan antara (AC-BC), dan lapisan dasar (AC-Base). Selain itu, *Zcooord* juga mencakup ketebalan lapis pondasi agregat, yaitu Lapis Pondasi Atas (LPA) dan Lapis Pondasi Bawah (LPB).

Informasi mengenai ketebalan masing-masing lapisan tersebut sangat penting karena menjadi dasar dalam analisis distribusi tegangan dan regangan yang terjadi pada struktur perkerasan jalan.

Selanjutnya melakukan pengisian PR dan tebal lapisannya. Adapun menu *Poisson Ratio* pada KENPAVE ada pada Gambar 4.4 berikut ini.

Layer Thickness, Poisson's Ratio and Unit Weight

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

Unit in.

Layer No.	TH	PR
1	6	5
2	12	5
3	12	5

(1) This form appears when the 'Layer' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu. This form is different from the one used for General Information in that a dotted rectangle, instead of the cursor, is used to indicate the active cell. If you want to read the remaining text and use the PgDn key, instead of the scrollbar, you should click this textbox to make it active. When you finish reading, you should click the cell to make it active before typing in the data. After you type in the data, the dotted rectangle will be changed into a three dimensional box and you must press the Enter key to make it effective. You can

Print OK Data Set 1

Gambar 4. 4 Menu *Poisson Ratio*

Pada menu ini dilakukan input nilai *Poisson Ratio*. *Poisson ratio* dalam perkerasan jalan adalah rasio regangan lateral terhadap regangan aksial ketika struktur perkerasan mendapatkan beban vertikal—artinya menggambarkan seberapa besar material akan melebar secara horizontal saat ditekan secara vertikal. Nilai ini sangat penting dalam analisis mekanistik-empirik, karena bersama dengan modulus elastisitas, Poisson ratio turut menentukan distribusi tegangan dan regangan yang digunakan untuk memprediksi kerusakan seperti *rutting* dan *fatigue* (Maher, A., & Bennert, T., 2008).

Adapun menu modulus dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut ini.

Layer No.	E
1	0
2	0
3	0

Unit: psi

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

OK

(1) This form appears when the period button on the Layer Modulus of Each Period is clicked. The number of layers on this form is equal to NL, as specified in the 'General' menu.
 (2) E (elastic modulus of each layer): Use as the assumed modulus for the first iteration when the layer is nonlinear. If more convenient, you can enter the modulus in exponential form such as 1.234E5. Assign 0 or any value for viscoelastic layer.
 (3) After typing the data in the first cell, move to the next cell by pressing the Enter or arrow down key. After the last cell is filled, be sure to click the Enter key.
 (4) You can delete a line, or one layer, by first clicking anywhere on the line to make it active and then press the <Ctrl>- keys. The NL in the 'general' menu will be reduced automatically by 1.
 (5) You can add a new line, or one more layer, above any given line by first clicking the cell in the given line to make it active and then press the <Ctrl>-<Ins>. A blank line will appear for you to enter the necessary data. The NL in the 'General' menu will increase automatically by 1. If you want to add a line after the last line, you can change NL in the 'General' menu by adding 1 and a blank line will appear as the last line. Remember that always use the <Ctrl>-<Ins>.

Gambar 4. 5 Menu Modulus

Pada menu ini dilakukan input nilai modulus elastisitas. Adapun pada penelitian ini nilai modulus elastisitas aspal didapatkan dari hasil pengujian *Marshall* dan perhitungan *Smix*, sedangkan untuk modulus elastisitas lapis pondasi menggunakan ketentuan dari Bina Marga.

Adapun menu *Load* dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut ini.

Unit	in.	psi	in.	in.	
Load Group No.	LOAD	CR	CP	YW	NR or NPT
1	0	0	0	0	0

Unit: in. psi in. in.

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

Print

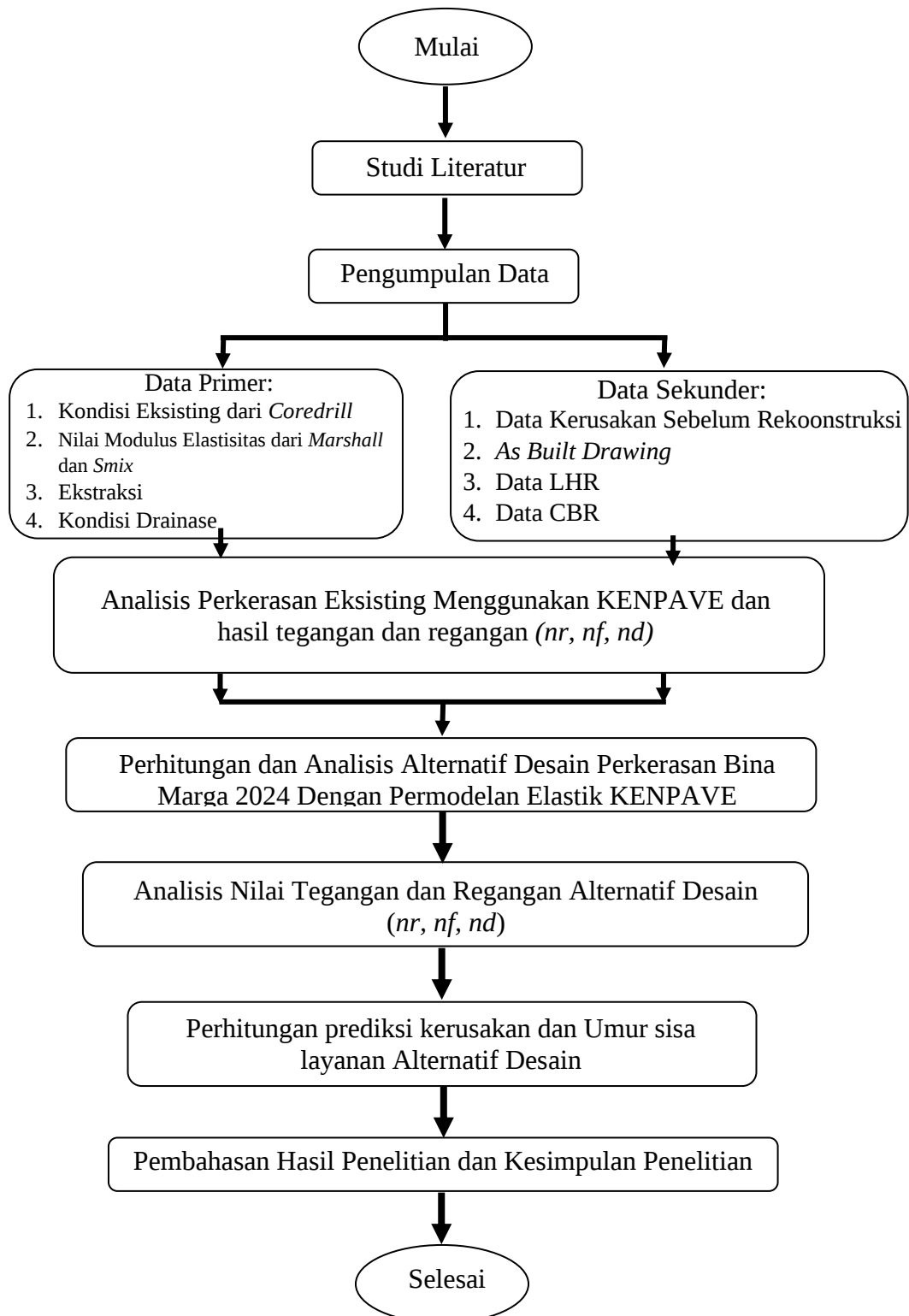
OK

Date Set 1

(1) This form appears when the 'Load' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of lines, or load groups, is equal to NLG, as specified in the 'General' menu. Please refer to Figure 3.8, p. 104, for axle arrangements.
 (2) LOAD (type of loading): Assign 0 for single axle with single tire, 1 for single axle with dual tires, 2 for tandem axles, and 3 for tridem axles.
 (3) CR (contact radius of circular loaded area).
 (4) CP (contact pressure on circular loaded area).
 (5) YW (center to center spacing between two dual wheels along the y

Gambar 4. 6 Menu Load

Adapun bagan alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut ini.



Gambar 4. 7 Bagan Alir Penelitian

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

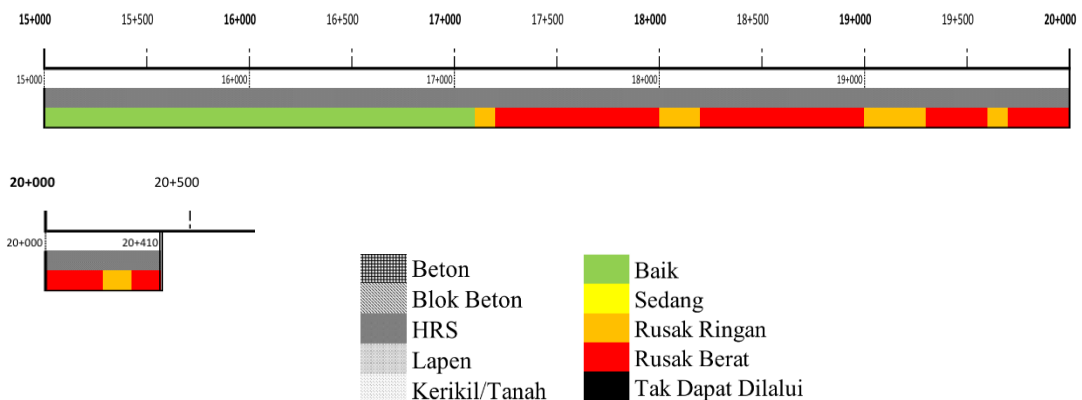
5.1. Pengumpulan Data

5.1.1. Data Sekunder

Data sekunder pada penelitian ini didapatkan dari Dinas PUPR Banggai Kepulauan. Adapun data sekunder pada penelitian ini antara lain :

1. Data kerusakan sebelum rekonstruksi

Dalam hal perencanaan dibutuhkan data sebagai penguat keputusan apakah jalan diperlukan perbaikan total atau hanya *overlay*. Dari data yang didapat berupa pemetaan kondisi jalan di ruas Kautu – Palam pada segmen jalan STA 17 + 200 hingga STA 20 + 410 menunjukkan bahwa kondisi perkerasan pada bagian tersebut berada dalam kategori rusak ringan hingga rusak berat. Adapun hasil data kerusakan ruas sebelum rekonstruksi dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut ini.



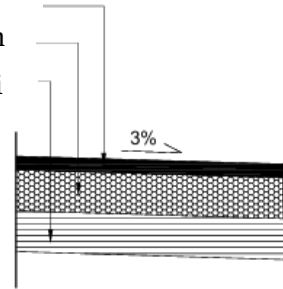
Gambar 5. 1 Data Tingkat Kerusakan Ruas Jalan Kautu – Palam Tahun 2023

Sumber : Dinas PUPR Banggai Kepulauan (2025)

2. Struktur Perkerasan Eksisting

Adapun tebal lapisan perkerasan dari perencanaan ruas jalan Kautu – Palam dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut ini.

AC – WC, t = 5,00 cm
 Lapis Pondasi Agregat Kls A, t = 15,00 cm
 Timbunan Dari Sumber Galian, t = variasi



Gambar 5. 2 Lapis Perkerasan Ruas Kautu - Palam
 Sumber : Dinas PUPR Banggai Kepulauan (2025)

3. Data Lalu Lintas Harian Rata-rata

Data Lalu-lintas pada ruas Jalan Kautu Palam tahun 2024 tidak ada dikarenakan masa rekonstruksi tahun 2024 dan beroperasi tahun 2025. Adapun Data LHR dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini.

Tabel 5. 1 Data LHR Lalu Lintas Ruas Kautu Palam

Tipe Kendaraan	Jenis Kendaraan	Konfigurasi Sumbu dan Tipe	LHR 2023 (kend/hari)	LHR 2025 (kend/hari)
1	Sepeda motor dan kendaraan roda-3	-	1330	1511
2	Sedan, Jeep, dan Station Wagon	1.1	0	0
3	Angkutan Penumpang	1.1	36	41
4	Kendaraan ringan - pick up dan micro truck	1.1	28	32
5a	Bus kecil	1.1	84	95
5b	Bus Besar	1.2	0	0
6a	Truck 2 sumbu - truk ringan	1.1	42	48
6b	Truck 2 As Sedang	1.2	0	0
7a	Truck 3 As	1.22	0	0
7c	Truck Besar, Semi Trailer	1.22+22	0	0

Sumber : Dinas PUPR Banggai Kepulauan (2025)

4. CBR Tanah Eksisting

Nilai CBR eksisting diketahui dari data Dinas PUPR Banggai Kepulauan sebesar 7%. Nilai ini menunjukkan bahwa daya dukung tanah pada lokasi studi tergolong rendah hingga sedang, sehingga menjadi dasar penting dalam menentukan kebutuhan perbaikan dan ketebalan perkerasan yang sesuai Kondisi Drainase

5.1.2. Data Primer

Data primer pada penelitian ini didapatkan dengan cara *coredrill* yang diuji tebal, *Marshall*, ekstraksi, dan modulus eksisting. Adapun data primer pada penelitian ini antara lain :

1. Struktur Perkerasan Setelah Rekonstruksi (*Hasil Coredrill*)

Tebal lapisan serta modulus elastisitas eksisting didapatkan dari sampel *coredrill* yang kemudian dianalisis tebal lapisannya serta dilakukan pengujian *marshall* untuk mendapatkan nilai karakteristiknya yang kemudian diolah untuk mendapatkan nilai kekakuan campuran atau *Smix*. Pengambilan sampel dilakukan di 5 titik dari titik lokasi yang mengalami kerusakan berat. Adapun hasil tebal lapisan *coredrill* dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut ini.

Tabel 5. 2 Hasil Pengujian Tebal Lapisan *Coredrill*

STA	Tebal Lapisan (cm)
17 + 000	6,49
18 + 200	6,33
19 + 400	5,29
20 + 000	5,45
20 + 400	5,92
Rata-rata	5,89

2. Hasil Karakteristik *Marshall*

Selain hasil pengukuran tebal lapisan perkerasan dilakukan pengujian *Marshall* dimana untuk mencari karakteristik perkerasan. Adapun hasil pengujian *Marshall* dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut ini.

Tabel 5. 3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Marshall

STA	VITM (%)	VMA (%)	VFWA (%)	Stabilitas (kg)	Kelelahan (mm)
17 + 000	5,19	18,60	73,05	976	3,26
18 + 200	4,90	18,36	74,23	974	3,51
19 + 400	5,51	18,88	71,80	950	3,41
20 + 000	5,03	18,47	73,70	966	3,43
20 + 400	5,31	18,71	72,57	953	3,55
Rata-rata	5,18	18,60	73,06	963	3,43
Spek	4-5	≥15	≥65	≥800	2-4
Keterangan	Tidak Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi	Memenuhi

3. Hasil Pengujian Ekstraksi

Selain itu dilakukan pengujian *ekstraksi* dimana ntuk memastikan kadar aspal aktual dalam campuran sesuai dengan nilai rancangan (*design bitumen content*). Adapun hasil pengujian *eskrasi* dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut ini.

Tabel 5. 4 Hasil Pengujian Ekstraksi

STA	Kadar Aspal Ekstraksi (%)
17 + 000	6,30
18 + 200	6,15
19 + 400	6,20
20 + 000	6,35
20 + 400	6,35
Rata - rata	6,27
Spesifikasi (AC-WC)	>5,5
Keterangan	Memenuhi

4. Kondisi Drainase

Kondisi drainase menggunakan drainase yang diperkeras, akan tetapi tidak sepenuhnya membuat saluran drainase sehingga air masih banyak tergenang

diperkerasan jalannya. Dinding-dinding drainase mengalami retak-retak dan berlubang yang menyebabkan air dapat masuk dan langsung terserap ke tanah di samping yang merupakan lereng.



Gambar 5. 3 Kondisi Eksisting Drainase

Selain kondisi drainase, kondisi jalan akibat terjebakny air di permukaan perkerasan menyebabkan terganggunya ikatan antar partikel sehingga jalan dapat berlubang, terkelupas.



Gambar 5. 4 Kondisi Perkerasan Akibat Drainase Kurang Baik

5. Nilai Modulus Elastisitas Eksisting

Nilai modulus eksisting pada lapisan perkerasan aspal campuran panas (AC-WC) pada penelitian ini diperoleh melalui pengujian volumetrik menggunakan metode Marshall. Parameter yang digunakan untuk analisis ini adalah nilai *Void in Mineral Aggregate* (VMA). Selain itu, hasil pengujian penetrasi aspal dan titik lembek aspal juga digunakan sebagai data pendukung dalam perhitungan nilai kekakuan binder (*Sbit*) dan kekakuan campuran aspal (*Smix*).

Pada penelitian ini nilai VMA didapatkan sebesar 18,6 %. Nilai penetrasi serta titik lembek untuk aspal PEN 60/70 adalah 60 mm – 70 mm, dan untuk titik lembek 48°C - 50°C. Adapun hasil perhitungan nilai *Sbit* dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut ini.

Perhitungan dengan nilai batas bawah seperti berikut ini.

$$\begin{aligned}
 T_i &= 25^{\circ}\text{C} \\
 P_i &= 60 \text{ mm} \\
 S_p &= 48^{\circ}\text{C} \\
 P_r &= 0,65 \times 60 \text{ mm} \\
 &= 39 \text{ mm} \\
 S_{pr} &= 98,4 - 26,35 \times \text{Log}(P_r) \\
 &= 98,4 - 26,35 \times \text{Log}(39) \\
 &= 56,475 \\
 P_{ir} &= \frac{1951,4 - (500 \times \log(P_r)) - (20 \times S_{pr})}{(50 \times \log(P_r)) - S_{pr} - 120,14} \\
 &= \frac{1951,4 - (500 \times \log(39)) - (20 \times 56,475)}{(50 \times \log(39)) - 56,475 - 120,14} \\
 &= -0,272 \\
 S_{bit} &= 1,154 \times 10^{-1} \times t^{-0,368} \times 2,718^{-P_{ir}} \times (S_{pr} - T)^5 \\
 &= 1,154 \times 10^{-1} \times 0,1^{-0,368} \times 2,718^{-(-0,272)} \times (56,475 - 25)^5 \\
 &= 10,94 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

Adapun hasil perhitungan *Sbit* Eksisting dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut ini

Tabel 5. 5 Hasil Perhitungan Nilai *Sbit* Eksisting

Parameter	Nilai	
	Bawah	Atas
Ti (°C)	25	25
Penetrasi Awal (mm)	60	70
Sp (Titik Lembek) (mm)	48	52
Recovered Penetration (<i>Pr</i>) (mm)	39,000	45,500
Recovered Softening Point (<i>Spr</i>) (°C)	56,475	54,711
Recovered Penetration Index (<i>Pir</i>)	-0,272	-0,306
Kecepatan Pembebanan (<i>V</i>) (km/jam)	10	10
Lama Pembebanan (<i>t</i>) (detik)	0,1	0,1
<i>Sbit</i> (MPa)	10,9426	8,4912

Setelah didapatkan hasil S_{bit} maka dilakukan perhitungan nilai S_{mix} . Adapaun hasil perhitungan S_{mix} dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut ini.

Perhitungan dengan nilai batas bawah seperti berikut ini.

$$S_{bit} = 10,943 \text{ MPa}$$

$$VMA = 18,6 \%$$

$$\begin{aligned} n &= 0,83 \times \text{Log} \left(\frac{4 \times 10^4}{S_{bit}} \right) \\ &= 0,83 \times \text{Log} \left(\frac{4 \times 10^4}{10,943} \right) \\ &= 2,957 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{mix} &= S_{bit} \times \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 \times VMA}{n \times (VMA - 3)} \right)^n \\ &= 10,943 \times \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 \times 18,6}{2,957 \times (18,6 - 3)} \right)^{2,957} \\ &= 1760,57 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Adapun hasil perhitungan S_{mix} eksisting dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut ini

Tabel 5. 6 Hasil Perhitungan Nilai S_{mix} Eksisting

Parameter	Nilai	
	Bawah	Atas
Sbit (MPa)	10,943	8,491
VMA (%)	18,600	18,600
n	2,957	3,049
S_{mix} (MPa)	1760,575	1481,597

Pada penelitian ini, karena tujuan utamanya adalah melakukan desain ulang perkerasan, maka digunakan nilai S_{mix} terkecil, yaitu sebesar 1481,60 MPa. Nilai ini dipilih untuk mewakili kondisi paling kritis atau konservatif dalam analisis struktural perkerasan, sehingga hasil perhitungan dapat mencerminkan tingkat keamanan yang lebih tinggi. Selanjutnya, nilai S_{mix} sebesar 1481,60 MPa tersebut digunakan sebagai modulus elastisitas campuran beraspal dalam proses analisis menggunakan perangkat lunak KENPAVE.

5.2. Evaluasi Tebal PeKERASAN Ruas Kautu Palam Eksisting Menggunakan KENPAVE dengan Permodelan Elastik

Adapun beberapa input data yang digunakan dalam analisis perkerasan eksisting menggunakan KENPAVE secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 5.7 berikut ini.

Tabel 5. 7 Input Data Eksisting

Data	Nilai	Nilai
AC- WC	Modulus Elastisitas	1481,60 MPa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,4
	Tebal Lapisan	5 cm
LPA	Modulus Elastisitas	700 Mpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,45
	Tebal Lapisan	15 cm

Adapun untuk detail input data analisis eksisting menggunakan KENPAVE dengan metode elastik dapat dilihat pada langkah-langkah berikut ini.

1. Menu *General*

Input nilai pada menu *General* dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut ini

Tabel 5. 8 Input Data Menu *General* KENPAVE

Istilah	Input	Keterangan
<i>Title</i>	Eksisting Kautu Palam	
<i>MATL</i>	1	1 dikarenakan analisis Elastik linier
<i>NDAMA</i>	0	Tidak ada analisis Kerusakan
<i>NPY</i>	1	
<i>NLG</i>	1	
<i>DEL</i>	0,003	Tingkat toleransi yang digunakan +- 0,003
<i>NL</i>	3	3 lapisan yaitu AC-WC, LPA, dan lapisan tanah asli
<i>NZ</i>	5	Titik Z koordinat yang dianalisis
<i>ICL</i>	80	
<i>NSTD</i>	9	Untuk vertical, regangan, dan tegangan.
<i>NUNIT</i>	1	Dikarenakan satuan yang digunakan adalah SI (Standar Internasional)

2. Menu *Zcoord*

Zcoord merupakan parameter penting dalam simulasi numerik atau pemodelan mekanistik-empirik perkerasan, yang menunjukkan kedalaman atau posisi tertentu dalam lapisan perkerasan tempat respon tegangan atau regangan dianalisis. Lokasi ini menjadi acuan utama dalam mengevaluasi potensi terjadinya deformasi permanen, retak akibat kelelahan (*fatigue cracking*), serta alur (*rutting*) yang merupakan bentuk kerusakan struktural dominan pada perkerasan fleksibel. Dengan menentukan nilai *Zcoord* secara tepat, hasil analisis kerusakan menjadi lebih representatif terhadap kondisi lapangan, sehingga dapat digunakan sebagai dasar perencanaan perbaikan dan peningkatan kinerja jalan secara menyeluruh. Adapun nilai *Zcoord* yang diinput pada analisis eksisting dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut ini.

Tabel 5. 9 Input Data *Zcoord* Eksisting Kautu Palam

<i>ZCoord</i>	Satuan
0,000	cm
4,997	cm
5,000	cm
19,997	cm
20,000	cm

3. Menu *Layer*

Menu *Layer* berisikan tebal perkerasan eksisting dan nilai *Poisson ratio* nya. Adapun nilai *Layer* yang diinput pada analisis eksisting dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut ini.

Tabel 5. 10 Input Data *Layer* Eksisting

Layer	Tebal Lapisan (cm)	<i>Poisson Ratio</i>
1	5,00	0,4
2	15,00	0,45
3	-	0,45

4. Menu *Moduli*

Menu *Moduli* berisikan nilai modulus elastisitas pada tiap lapisan. Untuk lapisan eksisting perkerasan AC-WC menggunakan hasil perhitungan *Smix* sebelumnya. Adapun input *Moduli* analisis eksisting dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut ini.

Tabel 5. 11 *Input Data Moduli* Eksisting

No	Lapisan	Nilai Modulus Elastisitas (MPa)
1	AC-WC	1481,60
2	LPA	700
3	Tanah Dasar	700

5. Menu *Load*

Menu *Load* berisikan data jarak ban, nilai tekanan ban, dan titik tinjauan. Adapun input *Load* analisis eksisting dapat dilihat pada Tabel 5.12 berikut ini.

Tabel 5. 12 *Input Data Load* Eksisting

	<i>Input</i>	Keterangan
<i>Load</i>	1	<i>Single axle load</i>
<i>CR</i>	11	Jarak antar ban (cm)
<i>CP</i>	550	Tekanan Ban (kPa)
<i>YW</i>	33	
<i>XW</i>	0	
<i>NPT or NR</i>	3	Jumlah titik tinjauan

Dari beberap input data eksisting yang sudah dimasukkan pada KENPAVE, lalu dilakukan analisis menggunakan KENLAYER. Adapun hasil *output* dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut ini.

Tabel 5. 13 Hasil Tegangan Regangan Perkerasan Eksisting Menggunakan KENPAVE

Titik Tinjauan Pengulangan Beban	Vertical Strain Pada Kedalaman 4,997 cm	Horizontal Strain Pada Kedalaman 4,997 cm	Vertical Strain Pada Kedalaman 19,997 cm
1	0,000738	0,000961	0,000948
2	0,000026	0,000893	0,001004
3	0,000175	0,000778	0,001005
max	0,0007378	0,0009609	0,001005

Dari hasil yang didapatkan untuk analisis *fatigue cracking* sebesar 0,0007378. Untuk analisa *rutting* dan *permanent deformation* menggunakan data 0,0009609 dan 0,001005. Hasil ini dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan 3.8 hingga 3.10, adapun hasilnya seperti berikut ini.

Perhitungan Nf atau *fatigue cracking* :

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

$$N_f = 0,0796 \times (0,0007378)^{-3,921} \times (1481000)^{-0,854}$$

$$N_f = 816.717 \text{ ESAL}$$

Perhitungan Nr atau *rutting* :

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

$$N_r = 1,365 \times 10^{-9} \times (0,0009609)^{-4,47}$$

$$N_r = 44.023 \text{ ESAL}$$

Perhitungan Nd atau *permanent deformation* :

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

$$N_d = 1,365 \times 10^{-9} \times (0,001005)^{-4,47}$$

$$N_d = 36.011 \text{ ESAL}$$

5.3. Analisis Data Alternatif Desain

5.3.1 Perhitungan Data Lalu Lintas Harian Rata-rata Ruas Kautu Palam

Pertumbuhan lalu lintas di daerah Sulawesi Tengah dihitung menggunakan LHR kendaraan tahun 2023 dan tahun 2025 yang kemudian di rata-ratakan.

Adapaun perhitungan i aktual (pertumbuhan lalu lintas aktual) dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini.

I aktual dapat dihitung dari data LHR 2023 dan LHR 2025 dengan perhitungan berikut ini.

$$\begin{aligned}
 \text{LHR 2023} &= 1520 \text{ kend/hari} \\
 \text{LHR 2025} &= 1726 \text{ kend/hari} \\
 \text{I Aktual} &= \frac{1726-1520}{1520} \times 100 \% \\
 &= 13,6 \%/2 \text{ tahun} \\
 \text{I Aktual} &= 6,8\% \text{ pertahun}
 \end{aligned}$$

5.3.2 Data Perencanaan

Desain alternatif perkerasan menggunakan Bina Marga 2024 dengan umur rencana 20 Tahun dilakukan rekap data perencanaan dalam desain perkerasan dapat dilihat pada Tabel 5.14 berikut ini.

Tabel 5. 14 Data Perencanaan Ruas

No	Data	Keterangan
1.	Jenis Jalan	Kolektor
2.	Umur Rencana (UR)	20 Tahun
3.	Distribusi Kendaraan	2 Lajur 2 Arah
4.	Nilai CBR	7 %
5.	I aktual	6,8 %

5.3.3 Perhitungan Beban Lalu Lintas

Adapun langkah – langkah dalam perhitungan beban lalu lintas adalah sebagai berikut ini.

1. Faktor Pertumbuhan Lalu lintas

Umur perencanaan didesain selama 20 tahun, maka dengan Persamaan didapatkan nilai R (2028-2045) sebesar 17,09 , dan R (2025-2028) sebesar 3,00.

$$R = \frac{(1+i)^{UR} - 1}{i}$$

$$\begin{aligned}
R_{2025-2028} &= \frac{(1+0,01 \times 0,068)^3 - 1}{0,01 \times 0,068} \\
&= 3 \\
R &= \frac{(1+i)^{UR} - 1}{i} \\
R_{2028-2045} &= \frac{(1+0,01 \times 0,068)^{17} - 1}{0,01 \times 0,068} \\
&= 17,09
\end{aligned}$$

2. Faktor Distribusi Arah (DD)

Dalam sistem lalu lintas dua arah, nilai faktor distribusi arah (DD) ditetapkan sebesar 0,5.

3. Faktor Distribusi Jalur (DL)

Faktor distribusi laju digunakan untuk menyesuaikan pembagian beban lalu lintas kumulatif pada jalan yang memiliki dua lajur atau lebih dalam satu arah perjalanan. Adapun rincian factor distribusi jalan dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut ini.

Tabel 5. 15 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

Untuk nilai DL dikarenakan setiap arah memiliki 1 lajur maka nilai DL = 100% atau 1.

4. *Vehicle Damage Factor (VDF)*

Nilai *Vehicle Damage Factor* (VDF) diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu VDF4 dan VDF5, karena masing-masing akan digunakan dalam perhitungan *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (CESA). Nilai CESA ini mencerminkan total akumulasi beban lalu lintas dalam bentuk ekuivalen sumbu tunggal, dan digunakan sebagai input utama dalam

menentukan jenis dan dimensi struktur perkerasan, baik fleksibel maupun kaku.

Regulasi Bina Marga 2024 nilai VDF diklasifikasikan berdasarkan wilayah geografis, sehingga nilai VDF tidak lagi bersifat umum untuk seluruh Indonesia. Pendekatan Bina Marga 2024 memberikan estimasi kerusakan lalu lintas yang lebih representatif, karena mempertimbangkan perbedaan komposisi kendaraan berat, intensitas lalu lintas, serta kinerja aktual jaringan jalan pada setiap daerah. Penerapan VDF berbasis wilayah pada Bina Marga 2024 diharapkan mampu menghasilkan perancangan tebal perkerasan yang lebih akurat dan sesuai dengan kondisi setempat. Adapun kawasan Kautu Palam termasuk daerah Sulawesi Tengah maka nilai VDF dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut ini.

Tabel 5. 16 Rekapitulasi Nilai VDF4 dan VDF5 Kautu - Palam

Tipe Kendaraan	Jenis Kendaraan	VDF4 (Faktual)	VDF4 (Normal)	VDF 5 (Faktual)	VDF 5 (Normal)
1	Sepeda motor dan kendaraan roda-3	0	0	0	0
2	Sedan, Jeep, dan Station Wagon	0	0	0	0
3	Angkutan Penumpang	0	0	0	0
4	Kendaraan ringan - pick up dan micro truck	0	0	0	0
5a	Bus kecil	0	0	0	0
5b	Bus Besar	1,2	1,2	1,3	1,3
6a	Truck 2 sumbu - truk ringan	0,5	0,5	0,4	0,4
6b	Truck 2 As Sedang	0,9	0,4	0,9	0,3
7a1	Truck 3 As	0	0	0	0
7c1	Truck Besar, Semi Trailer	10,5	6,8	15,2	8,9

Sumber : Bina Marga (2024)

5. *Equivalent Single Axle Load (ESAL)*

Dari hasil LHR, Nilai R pertahun, 20 tahun, DD, DL dan VDF maka dilakukan perhitungan ESA untuk mengetahui seberapa banyak rancangan

kendaraan pada tahun rencana sehingga dapat sebagai acuan dalam penentuan jenis desain perkerasan. Nilai ESA4 dan ESA5 dapat dilihat seperti berikut ini.

$$\begin{aligned} \text{ESA4 (F)}_{2025-2028} &= (\sum \text{LHR}_{2025} \times \text{VDF}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \\ &= 48 \times 0,5 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 3,00 \\ &= 13069,23 \text{ ESAL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ESA4 (N)}_{2028-2045} &= (\sum \text{LHR}_{\text{JK}} \times \text{VDF}_{\text{JK}}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \\ &= 58 \times 0,5 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 17,09 \\ &= 90648,46 \text{ ESAL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CESA 4} &= \text{ESA5 (F)} + \text{ESA5 (N)} \\ &= 13069,23 \text{ ESAL} + 90,648,46 \text{ ESAL} \\ &= 103717,69 \text{ ESAL} \\ &= 0,103 \text{ Juta ESAL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ESA5 (F)}_{2025-2028} &= (\sum \text{LHR}_{2025} \times \text{VDF}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \\ &= 48 \times 0,4 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 3,00 \\ &= 10455,389 \text{ ESAL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ESA5 (N)}_{2028-2045} &= (\sum \text{LHR}_{\text{JK}} \times \text{VDF}_{\text{JK}}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \\ &= 58 \times 0,4 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 17,09 \\ &= 72518,76 \text{ ESAL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{CESA 5} &= \text{ESA5 (F)} + \text{ESA5 (N)} \\ &= 10455,389 \text{ ESAL} + 72518,76 \text{ ESAL} \\ &= 82974,15 \text{ ESAL} \\ &= 0,085 \text{ Juta ESAL} \end{aligned}$$

Adapun perhitungan ESA dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut ini.

Tabel 5. 17 Perhitungan Nilai CESA4 dan CESA5 Perencanaan Alternatif Perkerasan Ruas Kautu

Tipe kendaraan (Gol)	Jenis Kendaraan	LHR ₂₀₂₅	LHR ₂₀₂₈	VDF 4	VDF 4	VDF 5	VDF 5	DD	DL	ESA 4 (F)	ESA 4 (N)	ESA 5 (F)	ESA 5 (N)
		(kend/hari)	(kend/hari)	faktual	normal	faktual	normal			2025-2028	2028-2045	2025-2028	2028-2045
1	Sepeda motor dan kendaraan roda-3	1511	1840	0	0	0	0	0.5	1	0	0.00	0	0
2	Sedan, Jeep, dan Station Wagon	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0.00	0	0
3	Angkutan Penumpang	41	50	0	0	0	0	0.5	1	0	0.00	0	0
4	Kendaraan ringan - pick up dan micro truck	32	39	0	0	0	0	0.5	1	0	0.00	0	0
5a	Bus kecil	95	116	0	0	0	0	0.5	1	0	0.00	0	0
5b	Bus Besar	0	0	1,2	1,2	1,3	1,3	0.5	1	0	0.00	0	0
6a	Truck 2 sumbu - truk ringan	48	58	0,5	0,5	0,4	0,4	0.5	1	13069,2	90648,46	10455,38	72518,76
6b	Truck 2 As Sedang	0	0	0,9	0,4	0,9	0,3	0.5	1	0	0.00	0	0
7a	Truck 3 As	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0.00	0	0
7c	Truck Besar, Semi Trailer	0	0	10,5	6,8	15,2	8,9	0.5	1	0	0.00	0	0
										13069,2	90648,462	10455,38	72518,76
										103717,69		82974,16	
										1 x 10 ⁵ ESAL		0,83 x 10 ⁵ ESAL	
										0,103 Juta ESAL		0,083 Juta ESAL	

Adapun rekapitulasi rencana jumlah kendaraan setiap tahun pada Ruas Kautu Palam dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut ini.

Tabel 5. 18 Rekapitulasi Rencana Jumlah Kendaraan

Tahun	ESA4 (Juta)	ESA5 (Juta)
2025	0,0049	0,0040
2026	0,0099	0,0079
2027	0,0148	0,0119
2028	0,0198	0,0158
2029	0,0247	0,0198
2030	0,0296	0,0237
2031	0,0346	0,0277
2032	0,0395	0,0316
2033	0,0445	0,0356
2034	0,0494	0,0395
2035	0,0543	0,0435
2036	0,0593	0,0474
2037	0,0642	0,0514
2038	0,0691	0,0553
2039	0,0741	0,0593
2040	0,0790	0,0632
2041	0,0840	0,0672
2042	0,0889	0,0711
2043	0,0938	0,0751
2044	0,0988	0,0790
2045	0,1037	0,0830

6. Penentuan Tebal Lapis Perkerasan

Pemilihan jenis dan tebal desain struktur perkerasan baru ditentukan dari nilai CESA 5. Sebelumnya didapatkan nilai ESA 5 sebesar 0,083 Juta ESAL, maka didapatkan jenis perkerasan seperti pada Tabel 5.19 berikut ini.

Tabel 5. 19 Penentuan Jenis Perkerasan Berdasarkan ESA5

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

Sumber : Bina Marga (2024)

Pada penelitian ini, dengan nilai ESAL yang sudah didapatkan mana alternative yang ingin dilakukan adalah menggunakan bagan desain 3, 3A, dan 3B. Hal ini dilakukan untuk memberikan Alternatif desain yang lebih berumur panjang. Adapun hasil alternatif desain merujuk pada Tabel 3.8 sampai Tabel 3.11 dapat dilihat pada Tabel 5.20 hingga Tabel 5.24 berikut ini.

Tabel 5. 20 Alteratif CTB 150 mm

Lapisan	Tebal (mm)
AC WC	40
AC BC	60
CTB	150
LFA kelas B	150
Timbunan pilihan butir kasar atau LFA kelas C atau stabilitas semen	200

Tabel 5. 21 Alternatif CTB 200 mm

Lapisan	Tebal (mm)
AC WC	40
AC BC	60
CTB	200
LFA kelas B	150
Timbunan pilihan butir kasar atau LFA kelas C atau stabilitas semen	200

Tabel 5. 22 Alternatif FFF 1

Lapisan	Tebal (mm)
AC WC	40
LFA kelas A	200
LFA kelas B	150
LFA kelas C	-

Tabel 5. 23 Alternatif FFF 2

Lapisan	Tebal (mm)
AC WC	40
AC BC	65
AC BC	80
LFA kelas A	200
LFA kelas B	150
LFA kelas C	-

Tabel 5. 24 Alternatif HRS

Lapisan	Tebal (mm)
HRS WC	30
HRS Base	35
LFA kelas A	250
LFA kelas B	150

5.3.4 Hasil Analisis Alternatif Desain Perkerasan Menggunakan KENPAVE

Hasil analisis titik horizontal dan vertical alternative desain menggunakan KENPAVE dengan permodelan elastik dapat dilihat pada Tabel 5.25 dan Tabel 5.29 berikut ini.

Tabel 5. 25 Hasil Analisis Permodelan Alternatif CTB 150 mm

Titik Tinjauan Pengulangan Beban	Vertical Strain Pada Kedalaman 9,997 cm	Horizontal Strain Pada Kedalaman 9,997 cm	Vertical Strain Pada Kedalaman 59,997 cm
1	2,52E-05	1,22E-05	1,04E-04
2	3,32E-05	3,32E-05	1,07E-04
3	3,86E-05	3,86E-05	1,08E-04
max	0,00003864	0,00003864	0,0001076

Tabel 5. 26 Hasil Analisis Permodelan Alternatif CTB 200 mm

Titik Tinjauan Pengulangan Beban	Vertical Strain Pada Kedalaman 9,997 cm	Horizontal Strain Pada Kedalaman 9,997 cm	Vertical Strain Pada Kedalaman 64,997 cm
1	2,02E-05	1,10E-05	7,81E-05
2	2,77E-05	2,77E-05	8,03E-05
3	3,31E-05	3,31E-05	8,07E-05
max	0,00003308	0,00003308	0,0000807

Tabel 5. 27 Hasil Analisis Permodelan Alternatif FFF 1

Titik Tinjauan Pengulangan Beban	Vertical Strain Pada Kedalaman 5,997 cm	Horizontal Strain Pada Kedalaman 5,997 cm	Vertical Strain Pada Kedalaman 40,997 cm
1	6,46E-04	8,91E-04	4,47E-04
2	2,93E-05	8,48E-04	4,82E-04
3	2,92E-04	7,65E-04	4,88E-04
max	0,0006464	0,0008911	0,000488

Tabel 5. 28 Hasil Analisis Permodelan Alternatif FFF 2

Titik Tinjauan Pengulangan Beban	Vertical Strain Pada Kedalaman 18,497 cm	Horizontal Strain Pada Kedalaman 18,497 cm	Vertical Strain Pada Kedalaman 53,497 cm
	18.497	18.497	53.497
1	2,41E-04	3,66E-04	1,83E-04
2	1,73E-04	3,78E-04	1,91E-04
3	1,33E-04	3,75E-04	1,92E-04
max	0,0002405	0,0003776	0,0001924

Tabel 5. 29 Hasil Analisis Permodelan Alternatif HRS

Titik Tinjauan Pengulangan Beban	Vertical Strain Pada Kedalaman 6,497 cm	Horizontal Strain Pada Kedalaman 6,497 cm	Vertical Strain Pada Kedalaman 46,497 cm
1	1,14E-03	3,00E-04	4,00E-04
2	1,06E-03	9,80E-04	4,30E-04
3	9,37E-04	6,53E-04	4,40E-04
max	0,001144	0,00098	0,00044

Dari masing – masing nilai maksimum horizontal dan vertical dihitung ESAL pada tiap jenis kerusakan. Adapun hasil ESAL dapat dilihat pada Tabel 5.31 berikut ini.

Tabel 5. 30 Rekapitulasi ESAL Analisis KENPAVE

Alternatif Desain	Jenis Kerusakan	Jumlah Lintasan (ESAL)	Keterangan
Alternatif CTB 150 mm	<i>Fatigue Cracking</i>	92.749.636.265,96	Nf > Nr (Ya)
	<i>Rutting</i>	77.977.171.043,06	Ndr > Nr (Ya)
	<i>Permanent Deformation</i>	795.626.267,07	Ndp > Nr (Ya)
Alternatif CTB 200 mm	<i>Fatigue Cracking</i>	170.556.558.748,09	Nf > Nr (Ya)
	<i>Rutting</i>	156.328.407.548,63	Ndr > Nr (Ya)
	<i>Permanent Deformation</i>	2.884.428.887,93	Ndp > Nr (Ya)
Alternatif FFF 1	<i>Fatigue Cracking</i>	1.479.479,56	Nf > Nr (Ya)
	<i>Rutting</i>	61.703,81	Ndr < Nr (Tidak)
	<i>Permanent Deformation</i>	914.275,56	Ndp > Nr (Ya)

Lanjutan Tabel 5. 31 Rekapitulasi ESAL Analisis KENPAVE

Alternatif Desain	Jenis Kerusakan	Jumlah Lintasan (ESAL)	Keterangan
Alternatif FFF 2	<i>Fatigue Cracking</i>	71.405.641,04	Nf > Nr (Ya)
	<i>Rutting</i>	2.882.441,17	Ndr > Nr (Ya)
	<i>Permanent Deformation</i>	58.985.676,31	Ndp > Nr (Ya)
Alternatif HRS	<i>Fatigue Cracking</i>	157.759,79	Nf > Nr (Ya)
	<i>Rutting</i>	40.310,07	Ndr < Nr (Tidak)
	<i>Permanent Deformation</i>	1.453.433,01	Ndp > Nr (Ya)

Dari hasil perhitungan ESAL pada tiap jenis kerusakan pada alternatif desain perkerasan.

1. Alternatif Desain CTB 150 mm

$$\begin{aligned}
 N_r &= 106.569,226 \text{ ESAL} \\
 N_f &= 92.749.636.265,96 \text{ ESAL} \\
 N_{dr} &= 77.977.171.043,06 \text{ ESAL} \\
 N_{dp} &= 795.626.267,07 \text{ ESAL}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RL_{fatigue} &= 100 \times \left(1 - \frac{N_r}{N_f}\right) \\
 &= 100 \times \left(1 - \frac{106.569,226}{92.749.636.265,96}\right) \\
 &= 99,99 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RL_{rutting} &= 100 \times \left(1 - \frac{N_r}{N_{dr}}\right) \\
 &= 100 \times \left(1 - \frac{106.569,226}{77.977.171.043,06}\right) \\
 &= 99,99 \%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 RL_{permanent} &= 100 \times \left(1 - \frac{N_r}{N_{dp}}\right) \\
 &= 100 \times \left(1 - \frac{106.569,226}{795.626.267,07}\right) \\
 &= 99,98 \%
 \end{aligned}$$

Adapun rekapitulasi perhitungan sisa umur sisa pelayanan jalan dapat dilihat pada Tabel 5.32 berikut ini.

Tabel 5. 31 Rekapitulasi *Remaining Life* (20 tahun) Alternatif Desain

Alternatif Desain	Jenis <i>Remaining Life</i>	(%)
Alternatif CTB 150 mm	RL <i>Fatigue Cracking</i>	99,99
	RL <i>Rutting</i>	99,99
	RL <i>Permanent Deformation</i>	99,98
Alternatif CTB 200 mm	RL <i>Fatigue Cracking</i>	99,99
	RL <i>Rutting</i>	99,99
	RL <i>Permanent Deformation</i>	99,99
Alternatif FFF 1	RL <i>Fatigue Cracking</i>	92,79
	RL <i>Rutting</i>	-72,71
	RL <i>Permanent Deformation</i>	88,34
Alternatif FFF 2	RL <i>Fatigue Cracking</i>	99,85
	RL <i>Rutting</i>	96,30
	RL <i>Permanent Deformation</i>	99,81
Alternatif HRS	RL <i>Fatigue Cracking</i>	32,44
	RL <i>Rutting</i>	-164,37
	RL <i>Permanent Deformation</i>	92,66

Untuk rekapitulasi sisa umur pertahun dapat dilihat pada Tabel 5.33 hingga Tabel 5.34 berikut ini.

Tabel 5. 32 Rekapitulasi RL Pertahun Alternatif Desain CTB 150 mm, CTB 200 mm, dan FFF 1

Tahun	Nr (tahunan)	Alternatif CTB 150 mm			Alternatif CTB 200 mm			Alternatif FFF 1		
		RL <i>Fatigue</i> (%)	RL <i>Rutting</i> (%)	RL <i>dp</i> (%)	RL <i>Fatigue</i> (%)	RL <i>Rutting</i> (%)	RL <i>dp</i> (%)	RL <i>Fatigue</i> (%)	RL <i>Rutting</i> (%)	RL <i>dp</i> (%)
2025	5074,73	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	99,99	99,65	91,77	99,44
2026	10149,45	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	99,99	99,31	83,55	98,88
2027	15224,18	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	99,99	98,97	75,32	98,33
2028	20298,90	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	99,99	98,62	67,10	97,77
2029	25373,63	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	99,99	98,28	58,87	97,22
2030	30448,35	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	99,99	97,94	50,65	96,66
2031	35523,08	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	99,99	97,59	42,42	96,11
2032	40597,80	100,00	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	97,25	34,20	95,55
2033	45672,53	100,00	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	96,91	25,98	95,00
2034	50747,25	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	96,56	17,75	94,44
2035	55821,98	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	96,22	9,53	93,89
2036	60896,70	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	95,88	1,30	93,33
2037	65971,43	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	95,54	-6,91	92,78
2038	71046,15	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	95,19	-15,14	92,22
2039	76120,88	99,99	99,99	99,99	100,00	100,00	99,99	94,85	-23,36	91,67
2040	81195,60	99,99	99,99	99,98	100,00	99,99	99,99	94,51	-31,58	91,11
2041	86270,33	99,99	99,99	99,98	99,99	99,99	99,99	94,16	-39,81	90,56
2042	91345,05	99,99	99,99	99,98	99,99	99,99	99,99	93,82	-48,03	90,00
2043	96419,78	99,99	99,99	99,98	99,99	99,99	99,99	93,48	-56,26	89,45
2044	101494,5	99,99	99,99	99,98	99,99	99,99	99,99	93,13	-64,48	88,89
2045	106569,2	99,99	99,99	99,98	99,99	99,99	99,99	92,79	-72,71	88,34

Tabel 5. 33 Rekapitulasi RL Pertahun Alternatif Desain FFF 2 dan HRS

Tahun	CESA4	Alternatif FFF 2			Alternatif HRS		
		RL <i>Fatigue</i> (%)	RL <i>Rutting</i> (%)	RL <i>dp</i> (%)	RL <i>Fatigue</i> (%)	RL <i>Rutting</i> (%)	RL <i>dp</i> (%)
2025	5074,73	99,99	99,82	99,99	96,78	87,41	99,65
2026	10149,45	99,98	99,64	99,98	93,56	74,82	99,98
2027	15224,18	99,97	99,47	99,97	90,34	62,23	99,97
2028	20298,90	99,97	99,29	99,96	87,13	49,64	99,96
2029	25373,63	99,96	99,11	99,95	83,91	37,05	99,95
2030	30448,35	99,95	98,94	99,94	80,69	24,46	99,94
2031	35523,08	99,95	98,76	99,93	77,48	11,87	99,93
2032	40597,80	99,94	98,59	99,93	74,26	-0,71	99,93
2033	45672,53	99,93	98,41	99,92	71,04	-13,30	99,92
2034	50747,25	99,92	98,23	99,91	67,83	-25,89	99,91
2035	55821,98	99,92	98,06	99,90	64,61	-38,48	99,90
2036	60896,70	99,91	97,88	99,89	61,39	-51,07	99,89
2037	65971,43	99,90	97,71	99,88	58,18	-63,65	99,88
2038	71046,15	99,90	97,53	99,87	54,96	-76,24	99,87
2039	76120,88	99,89	97,35	99,87	51,74	-88,83	99,87
2040	81195,60	99,88	97,18	99,86	48,53	-101,42	99,86
2041	86270,33	99,87	97,00	99,85	45,31	-114,01	99,85
2042	91345,05	99,87	96,83	99,84	42,09	-126,60	99,84
2043	96419,78	99,86	96,65	99,83	38,88	-139,19	99,83
2044	101494,50	99,85	96,47	99,82	35,66	-151,78	99,82
2045	106569,23	99,85	96,30	99,81	32,44	-164,37	99,81

5.4. Pembahasan Identifikasi Tingkat Kerusakan

Berdasarkan hasil analisis tingkat kerusakan yang didapatkan maka terdapat kerusakan yang cukup signifikan disepanjang segment STA 15 + 000 hingga STA 17 + 000 dimana masih dalam kategori baik (ditandai dengan warna hijau) yang dimana lapisan perkerasan masih memiliki kemampuan dan daya dukung yang memadai terhadap lalu lintas, sedangkan pada STA 17 + 200 hingga STA 20 + 410 kondisi perkerasan mulai menunjukkan penurunan kondisi jalan yang signifikan. Pada bagian awal segmen ini perkerasan masih masuk zona orange yang menandakan rusak ringan akan tetapi seterusnya banyak diwarnai dengan warna orange hingga didominasi warna merah yang menandakan rusak berat sehingga segmen tersebut sudah tidak layak untuk operasional kendaraan. Segmen ini diperlukan penanganan perbaikan total atau *full depth reconstruction* agar fungsi jalan dapat dipulihkan.

Pemilihan segmen Km 17,2–Km 20,410 sebagai objek studi bersifat strategis karena pada rentang tersebut ditemukan penurunan kualitas perkerasan yang signifikan. Berdasarkan tingkat kerusakan yang terjadi mencerminkan degradasi struktural dan fungsional perkerasan jalan yang berpotensi mengganggu kenyamanan serta keselamatan pengguna jalan. Oleh karena itu, kajian terhadap segmen ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai kebutuhan rehabilitasi dan perencanaan pemeliharaan jalan yang lebih efektif serta berkelanjutan.

5.5. Pembahasan Kondisi Tebal, Drainase, Karakteristik *Marshall*, Modulus Elastisitas Kondisi Eksisting

Data ketebalan rata-rata *coredrill* didapatkan bahwa sebesar 5.89 cm yang minimal untuk jenis lapisan AC-WC tebal 5 cm, maka tebal perkerasan pada ruas Kautu – Palam sudah sesuai dengan spesifikasi Bina Marga Divisi 6 2018.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sistem drainase pada lokasi penelitian memang telah menggunakan saluran yang diperkeras, namun fungsinya belum optimal. Tidak seluruh air permukaan dapat dialirkan dengan baik sehingga sebagian masih tergenang di badan jalan. Kondisi ini diperburuk oleh dinding

saluran drainase yang mengalami retak serta berlubang, sehingga memungkinkan air masuk dan terserap langsung ke tanah di sisi jalan yang merupakan area lereng. Keadaan tersebut mengindikasikan bahwa struktur drainase telah mengalami penurunan kinerja sehingga tidak mampu menyalurkan limpasan air secara efektif. Selain itu, drainase yang tidak berfungsi optimal menyebabkan air menggenang di permukaan perkerasan. Genangan ini mengurangi kualitas ikatan antarpartikel pada lapisan perkerasan, yang selanjutnya memicu terjadinya kerusakan seperti butiran yang terlepas, pelapukan permukaan, serta deformasi struktural pada perkerasan. Kondisi-kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem drainase yang kurang baik memiliki kontribusi signifikan terhadap percepatan kerusakan perkerasan jalan di lokasi penelitian.

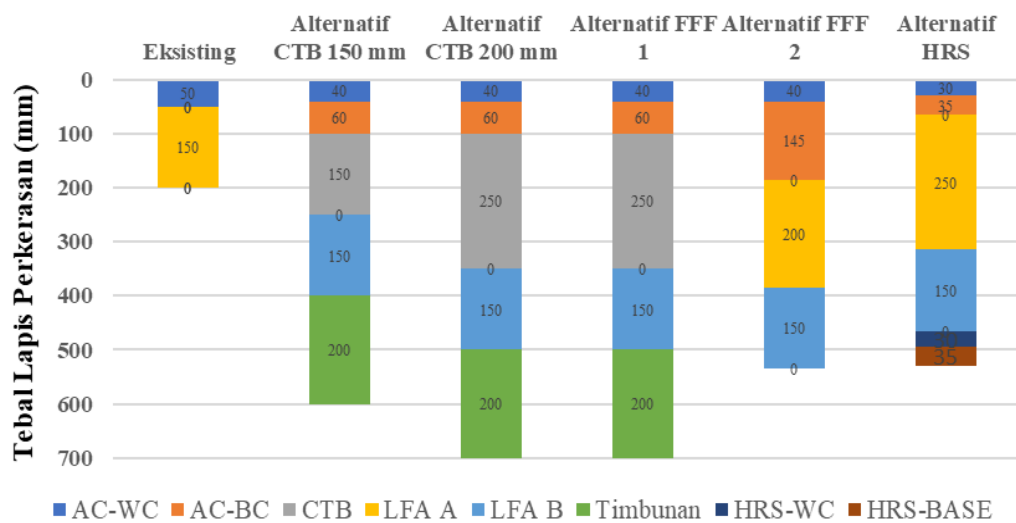
Data pengujian *Marshall* didapatkan bahwa untuk jenis lapisan AC-WC memenuhi semua aspek minimum spesifikasi yang sesuai dengan spesifikasi Bina Marga Divisi 6 2018 kecuali VITM. VITM yang didapatkan diatas 5% dimana sudah melebihi spesifikasi di 4-5%, menandakan bahwa rongga total campuran terlalu besar sehingga menyebabkan air dan udara dapat terjebak lebih banyak di rongga yang membuat reaksi oksidasi atau *hardening* pada dalam campuran semakin tinggi dan menyebabkan campuran menjadi tidak lentur lagi. Kondisi dengan nilai VITM diatas 5% mengindikasikan bahwa mutu campuran yang digunakan pada lapisan permukaan jalan tergolong kurang maksimal dalam kinerja terhadap beban lalu lintas rencana. Akan tetapi campuran ini dapat memiliki umur layanan yang cukup panjang, asalkan didukung dengan sistem drainase yang baik dan program pemeliharaan berkala.

Data pengujian *Marshall* diolah kembali untuk mendapatkan hasil modulus elastisitas *Sbit* dan *Smix*. Nilai modulus elastisitas yang didapatkan *Sbit* sebesar 10,94 MPa, dan *Smix* sebesar 1481 MPa. Nilai *Smix* memenuhi minimum spesifikasi Bina Marga 2024 dimana nilai modulus tipikal AC-WC sebesar 1.100 MPa sehingga kondisi eksisting dapat menahan beban lebih dari pada desain menggunakan modulus tipikal yang terdapat pada Bina 2024. Hadi dan Fauziah (2022) mengemukakan bahwa nilai *Smix* yang tinggi pada suatu campuran

menunjukkan bahwa campuran tersebut memiliki kapasitas yang lebih baik dalam menahan serta mendistribusikan beban yang bekerja di atasnya.

5.6. Pembahasan Alternatif Desain Menggunakan Bina Marga 2024

Tebal lapis perkerasan yang di desain menggunakan Bina Marga 2024 menggunakan nilai CESA5 sebagai nilai komulatif yang didapatkan dengan pertumbangan VDF pada daerah tersebut. Adapun alternatif desain yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.5 berikut ini.



Gambar 5. 5 Tebal Eksisting dan Alternatif Desain Perkerasan

Berdasarkan hasil analisis desain perkerasan menggunakan pedoman Bina Marga 2024, diperoleh beberapa alternatif struktur lapisan perkerasan sebagaimana ditunjukkan pada grafik di atas. Setiap alternatif menunjukkan kombinasi tebal lapisan yang berbeda pada masing-masing komponen perkerasan, yaitu lapisan AC-WC (*Asphalt Concrete – Wearing Course*), AC-BC (*Asphalt Concrete – Binder Course*), HRS (*Hot Rolled Sheet*), CTB (*Cement Treated Base*), LFA A, LFA B, dan lapisan timbunan.

Pada Alternatif CTB 150 mm, tebal total perkerasan meningkat menjadi sekitar 600 mm, dengan konfigurasi AC-WC 40 mm, AC-BC 60 mm, CTB 150 mm, LFA A 150 mm, dan timbunan 200 mm. Desain ini menunjukkan peningkatan signifikan pada daya dukung struktur melalui penambahan lapisan CTB dan material pondasi bawah. Selanjutnya, Alternatif CTB 200 mm juga menunjukkan

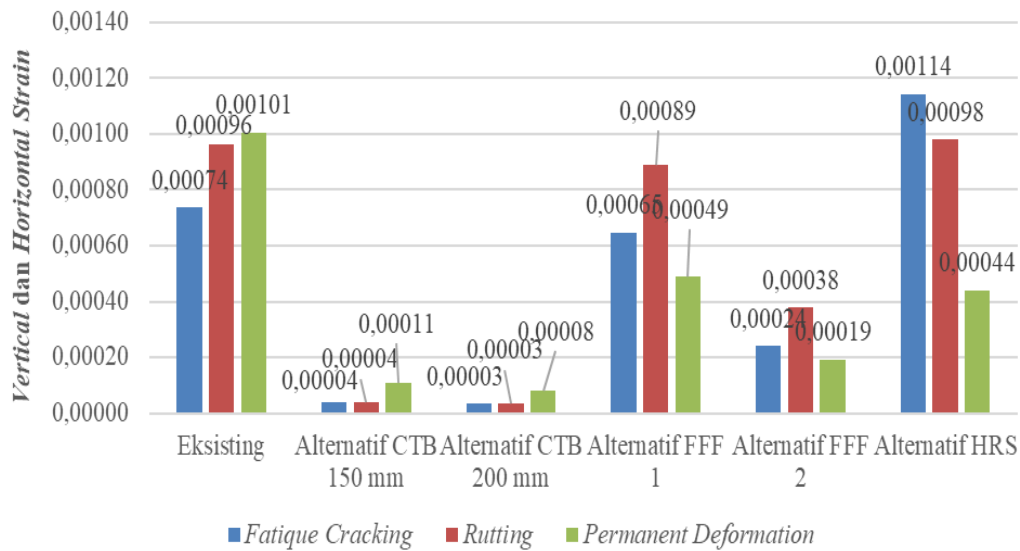
peningkatan tebal lapisan CTB menjadi 200 mm dengan total ketebalan mencapai lebih dari 600 mm. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kekakuan struktur serta mengurangi risiko deformasi permanen dan retak akibat beban berulang.

Sementara itu, Alternatif FFF 1 dan Alternatif FFF 2 menggunakan pendekatan berbeda, yaitu dengan meniadakan lapisan CTB dan menggantinya dengan kombinasi lapisan LFA A dan LFA B. Alternatif ini menghasilkan struktur perkerasan yang lebih fleksibel. Pendekatan ini lebih ekonomis dan sesuai untuk kondisi tanah dasar yang memiliki daya dukung cukup baik.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan *Cement Treated Base* (CTB) serta penambahan lapisan pondasi bawah memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kapasitas struktural perkerasan dalam menahan beban lalu lintas rencana. Penambahan ketebalan tersebut berfungsi meningkatkan kekakuan dan daya dukung struktur perkerasan, sehingga mampu mengurangi tegangan yang diteruskan ke tanah dasar. Meskipun demikian, penentuan desain akhir tidak hanya didasarkan pada aspek teknis semata, tetapi juga perlu mempertimbangkan efisiensi biaya konstruksi, ketersediaan dan mutu material di lapangan, serta kondisi tanah dasar eksisting. Oleh karena itu, penerapan metode perencanaan perkerasan berdasarkan Pedoman Bina Marga 2024 memungkinkan pemilihan alternatif struktur perkerasan yang paling optimal, efisien, dan andal, sesuai dengan kebutuhan fungsional serta umur rencana jalan

5.7. Analisis Tegangan Regangan Menggunakan KENPAVE

Dari perencanaan tebal perkerasan dilakukan analisis dengan metode Elastik menggunakan KENPAVE. Berdasarkan hasil analisis tegangan dan regangan menggunakan aplikasi KENPAVE, diperoleh perbandingan kinerja struktural dari beberapa alternatif desain perkerasan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.6 berikut ini.



Gambar 5. 6 Hasil Analisis Permodelan Berdasarkan Jenis Kerusakan

Hasil analisis permodelan tersebut memperlihatkan bahwa kondisi eksisting memiliki nilai regangan tertinggi dengan nilai *fatigue cracking* sebesar 0,00074, *rutting* sebesar 0,00096, dan *permanent deformation* sebesar 0,00101. Nilai-nilai tersebut mengindikasikan bahwa struktur perkerasan eksisting memiliki daya tahan yang rendah terhadap beban lalu lintas berulang, serta berpotensi mengalami retak lelah dan deformasi plastis lebih cepat akibat ketidakmampuan lapisan dalam mendistribusikan tegangan dengan baik.

Pada alternatif CTB 150 mm terjadi penurunan regangan yang sangat signifikan dengan nilai *fatigue cracking* 0,00004, *rutting* 0,00004, dan *permanent deformation* 0,00011. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan lapisan *Cement Treated Base* (CTB) setebal 150 mm mampu meningkatkan kekakuan struktur perkerasan dan mengurangi deformasi akibat pembebanan berulang. Tren penurunan regangan juga terlihat pada Alternatif CTB 200 mm dengan nilai regangan sedikit lebih kecil, yaitu sekitar 0,00003–0,00008. Peningkatan ketebalan CTB secara langsung memperkuat daya dukung lapisan pondasi, sehingga beban yang diterima oleh lapisan bawah dapat terdistribusi lebih merata, mengurangi risiko terjadinya kelelahan material dan deformasi permanen.

Sementara itu, Alternatif FFF 1 menunjukkan nilai regangan yang kembali meningkat dengan nilai *fatigue cracking* sebesar 0,00065, *rutting* sebesar 0,00089,

dan *permanent deformation* sebesar 0,00049. Hal ini disebabkan oleh ketiadaan lapisan CTB yang menyebabkan struktur menjadi lebih fleksibel, sehingga lebih rentan terhadap deformasi plastis akibat beban lalu lintas. Namun, Alternatif FFF 2v memperlihatkan performa yang lebih baik dibandingkan FFF1 dengan penurunan nilai regangan menjadi 0,00024 untuk *fatigue cracking*, 0,00038 untuk *rutting*, dan 0,00019 untuk *permanent deformation*. Penelitian serupa dari Saputra dkk (2023) dimana alternatif FFF2 menghasilkan nilai mekanistik empirik yang lebih besar dari pada alternatif FFF1, dan menghasilkan nilai ESAL serta umur layanan yang lebih besar.

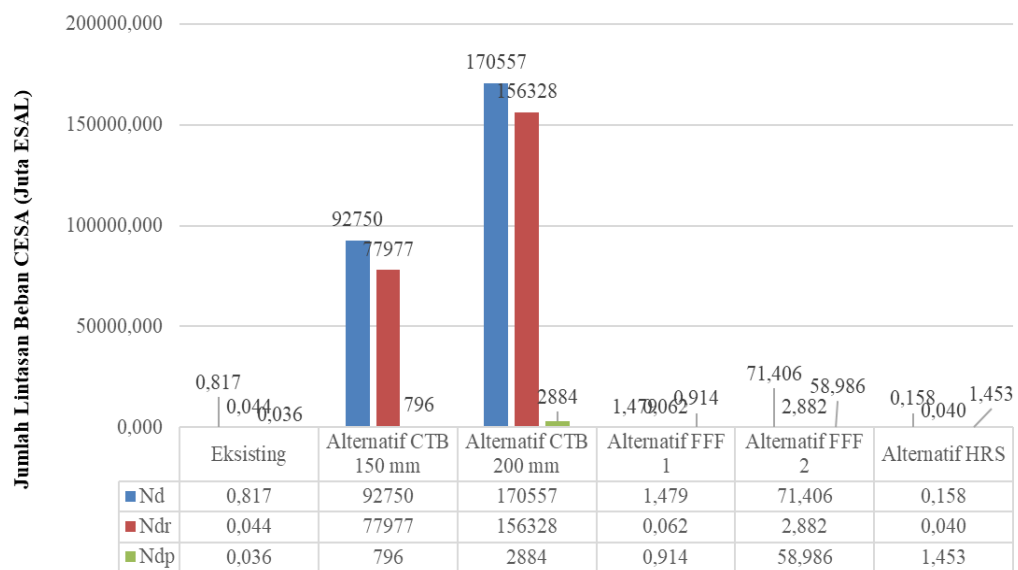
Hasil Alternatif HRS menghasilkan nilai *fatigue cracking* yang lebih besar dari pada kondisi eksistingnya walaupun tebal perkerasan aspal Alternatif HRS lebih tebal Eksisting, hal ini dikarenakan nilai modulus HRS WC dan HRS Base lebih rendah yaitu sebesar 800 MPa dan 900 Mpa dari pada AC-WC sebesar 1100 MPa. Untuk *permanent deformation* menghasilkan nilai yang lebih rendah yaitu 0,004 dari kondisi Eksisting sebesar 0,001, hal ini dikarenakan tebal lapisan pondasi Alternatif HRS menggunakan 2 lapisan yaitu lapis pondasi kelas A, dan lapis pondasi kelas B setebal 400 mm dibanding Eksisting hanya menggunakan lapis pondasi kelas A setebal 150 mm.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa penambahan dan peningkatan tebal lapisan CTB memberikan dampak positif yang signifikan terhadap penurunan nilai regangan, baik akibat kelelahan maupun deformasi permanen. Desain perkerasan dengan lapisan CTB terbukti lebih kaku dan memiliki kemampuan lebih baik dalam menahan beban lalu lintas berat, sedangkan desain FFF dan HRS lebih fleksibel namun memerlukan pengaturan tebal lapisan yang optimal agar dapat mencapai kinerja struktural yang sebanding. Dengan demikian, penggunaan CTB dengan ketebalan yang sesuai dapat direkomendasikan untuk meningkatkan keandalan dan umur layanan perkerasan jalan sesuai dengan beban lalu lintas rencana.

Hadi & Fauziah (2022) pada penelitiannya memiliki hasil yang sama dimana hasil permodelan elastik Alternatif yang menggunakan CTB memiliki nilai

tegangan dan regangan yang lebih kecil dibandingkan Alternatif yang menggunakan lapis pondasi agregat, sehingga kerusakan secara urutan Nd, Nr dan Nf.

Berdasarkan hasil analisis beban lalu lintas ekuivalen (*Equivalent Single Axle Load/ESAL*) menggunakan aplikasi KENPAVE, diperoleh hasil perbandingan nilai Nd (*Fatigue Cracking*), Ndr (*Rutting*), dan Ndp (*Permanent Deformation*) pada berbagai alternatif desain perkerasan seperti pada Gambar 5.7 berikut ini.



Gambar 5. 7 Hasil Beban Lalu Lintas

Pada kondisi eksisting hasil nilai ESAL lebih rendah dari pada hasil alternatif desain lainnya, yaitu Nd sebesar $0,817 \times 10^6$, Ndr sebesar $0,044 \times 10^6$, dan Ndp sebesar $0,036 \times 10^6$. Hal ini menandakan bahwa struktur perkerasan eksisting memiliki daya dukung yang kecil sehingga tidak mampu menahan beban lalu lintas berat dalam jangka panjang.

Pada Alternatif CTB 150 mm terjadi peningkatan yang signifikan dengan nilai Nd sebesar 92750×10^6 , Ndr sebesar 77977×10^6 , dan Ndp sebesar 796×10^6 . Peningkatan ini menandakan bahwa penambahan lapisan *Cement Treated Base* (CTB) setebal 150 mm telah memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan kekakuan struktur perkerasan, sehingga mampu menahan jumlah lintasan beban lebih banyak sebelum terjadi kerusakan. Tren peningkatan yang sama terlihat pada Alternatif CTB 200 di mana nilai ESAL meningkat secara signifikan hingga

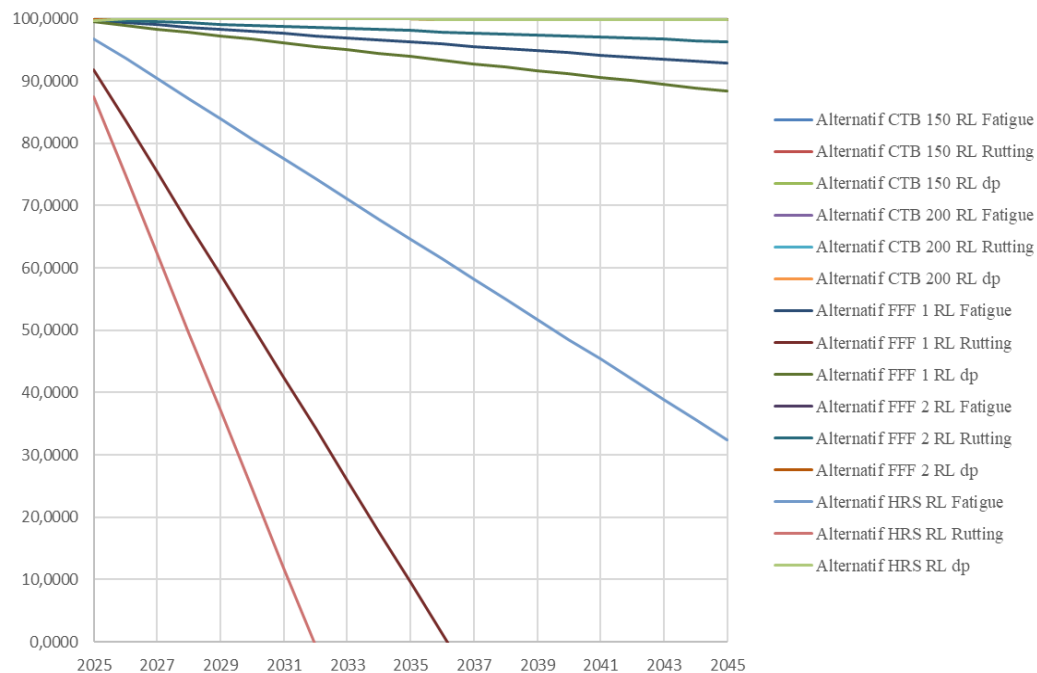
mencapai N_d sebesar 170557×10^6 , N_{dr} sebesar 156328×10^6 , dan N_{dp} sebesar 2884×10^6 . Hal ini menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan CTB, maka semakin tinggi pula ketahanan struktur terhadap beban lalu lintas berulang akibat peningkatan modulus elastisitas dan distribusi tegangan yang lebih efisien.

Sebaliknya, pada Alternatif FFF 1 dan Alternatif FFF 2 yang tidak menggunakan lapisan CTB, nilai ESAL turun secara drastis. Alternatif FFF1 memiliki N_d sebesar $1,479 \times 10^6$, N_{dr} sebesar $0,062 \times 10^6$, dan N_{dp} sebesar $0,914 \times 10^6$, sedangkan FFF2 sedikit lebih baik dengan N_d sebesar $71,406 \times 10^6$, N_{dr} sebesar $2,882 \times 10^6$, dan N_{dp} sebesar $58,985 \times 10^6$. Alternatif HRS menghasilkan nilai yang lebih rendah yaitu N_d sebesar $0,158 \times 10^6$, N_{dr} sebesar $0,040 \times 10^6$, dan N_{dp} sebesar $1,453 \times 10^6$.

Penurunan nilai *Equivalent Single Axle Load* (ESAL) pada Alternatif FFF1, FFF2, dan HRS secara umum menunjukkan bahwa struktur perkerasan tanpa lapisan *Cement Treated Base* (CTB) memiliki kemampuan yang lebih rendah dalam mendistribusikan tegangan akibat repetisi beban lalu lintas. Secara teoritis, CTB berfungsi sebagai lapisan pondasi kaku yang meningkatkan modulus struktural keseluruhan sistem perkerasan. Dengan modulus yang lebih tinggi, lapisan CTB mampu mengurangi deformasi vertikal dan menyebarkan beban secara lebih merata ke lapisan tanah dasar. Hal ini berdampak langsung pada meningkatnya nilai umur lelah (*fatigue life*) dan umur deformasi permanen (*rutting life*) dari perkerasan.

5.8. Umur Sisa Layanan

Umur sisa layanan dapat dilihat pada Gambar 5.8 berikut ini.



Gambar 5. 8 Umur Sisa Layanan

Hasil analisis menunjukkan bahwa Alternatif CTB 150 mm, dan Alternatif CTB 200 mm memiliki kinerja paling stabil selama 20 tahun masa rencana, dengan nilai RL *Fatigue*, RL *Rutting*, dan RL *Permanent Deformation* yang secara konsisten berada di atas 99,99% hingga tahun 2045. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan lapisan *Cement Treated Base* (CTB) dengan ketebalan memadai mampu meningkatkan kekakuan struktural dan menurunkan regangan yang terjadi pada lapisan bawah, sehingga memperpanjang umur lelah dan menekan potensi deformasi permanen. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Rahman dkk. (2019) dan Putra & Wicaksono (2022) yang menyatakan bahwa penggunaan CTB secara signifikan meningkatkan modulus elastisitas lapisan pondasi dan memperpanjang umur pelayanan perkerasan terhadap beban lalu lintas berat. Secara umum, alternatif ini memberikan ketahanan tertinggi terhadap beban lalu lintas, meskipun secara ekonomi mungkin memerlukan biaya konstruksi yang lebih besar karena ketebalan CTB yang tinggi.

Sebaliknya, Alternatif FFF 1 dan Alternatif FFF 2 yang merupakan desain tanpa lapisan CTB menunjukkan penurunan signifikan pada nilai RL, terutama untuk parameter rutting. Mulai tahun 2030, nilai RL *rutting* pada Alternatif FFF 1

menurun di bawah 50%, bahkan mencapai nilai negatif setelah tahun 2037, menandakan bahwa struktur perkerasan sudah tidak lagi mampu menahan beban lalu lintas dan mengalami kegagalan permanen. Fenomena serupa terjadi pada Alternatif FFF 2, dengan nilai RL *rutting* turun hingga sekitar -72,7% pada tahun 2045. Alternatif HRS memiliki penurunan nilai RL *rutting* hingga -164,37% pada tahun 2045. Hal ini menegaskan bahwa struktur perkerasan tanpa lapisan CTB cenderung mengalami deformasi plastis yang cepat akibat beban lalu lintas berat dan tingginya regangan pada lapisan tanah dasar.

Dari ketiga jenis kerusakan yang dianalisis, *fatigue cracking* menunjukkan ketahanan yang lebih baik dibandingkan *rutting* pada seluruh alternatif desain. Artinya, faktor kritis utama yang memengaruhi umur sisa pelayanan adalah *rutting* atau deformasi plastis, khususnya pada desain yang tidak memiliki lapisan pondasi berstabilisasi. Dengan demikian, hasil analisis umur sisa pelayanan ini menunjukkan bahwa desain perkerasan dengan lapisan CTB memberikan kinerja terbaik dan paling andal dalam menjaga umur layanan jalan. Sementara itu, desain Alternatif FFF 1 dan HRS tidak direkomendasikan untuk kondisi lalu lintas berat atau masa rencana jangka panjang, karena berpotensi mengalami penurunan kinerja secara signifikan sebelum akhir umur rencana. Oleh karena itu, penerapan CTB dengan ketebalan optimal menjadi strategi yang efektif dalam meningkatkan keandalan struktural dan efisiensi umur pelayanan perkerasan jalan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari analisis dan pembahasan terkait kondisi eksisting, nilai modulus, alternatif desain, hasil analisis KENPAVE, dan umur sisa layan, maka disimpulkan sebagai berikut.

1. Kondisi tingkat kerusakan pada Jalan Kautu – Palam pada STA 17 + 200 hingga STA 20 + 410 mengalami kerusakan berat ditandai dengan warna merah pada hasil *stripmap*. Hal ini menandakan bahwa ruas ini sudah tidak layak operasional dan diperlukan perbaikan rekonstruksi.
2. Kondisi tebal lapis perkerasan yang didapatkan dari hasil *Coredrill* memiliki tebal rata-rata 5,89 cm dimana sudah sesuai dengan desain perencanaan 5 cm. Nilai modulus eksisting didapatkan 1481,59 Mpa dimana sudah melebihi nilai modulus tipikal pada Bina Marga 2024 sebesar 1100 Mpa.
3. Alternatif desain perkerasan menggunakan tiga jenis yaitu jenis penggunaan CTB 150 mm, dan 200mm, serta penggunaan lapis pondasi FFF1, FFF2, dan penggunaan lapisan HRS. Pemilihan beberapa alternatif ini untuk memberikan gambaran dan pilihan terkait perencanaan rekonstruksi selanjutnya. Alternatif CTB 150 mm, Alternatif CTB 200 mm, dan Alternatif FFF 2 aman untuk digunakan dikarenakan sudah memenuhi perhitungan beban lalu lintas untuk umur perkerasan 20 tahun. Alternatif FFF 1 dan HRS mengalami penurunan umur *rutting* yang sangat signifikan sehingga tidak dapat digunakan sebagai alternatif rekonstruksi.
4. Hasil analisis menggunakan KENPAVE dengan metode elastik menunjukkan bahwa alternatif desain dengan penggunaan lapisan CTB secara signifikan meningkatkan kapasitas nilai ESAL dikarenakan lapisan CTB mampu

memberikan kekakuan struktural yang lebih tinggi dari pada penggunaan lapisan pondasi agregat.

5. Hasil alternatif desain dengan CTB menunjukkan kinerja unggul sepanjang 20 tahun masa rencana dengan RL masih diatas 99,9 %, sebaliknya desain FFF1 dan HRS mengalami penurunan yang derastis hingga rutting mencapai nilai negatif menjelang akhir umur rencana, sehingga membuktikan bahwa campuran dengan *full* lapisan pondasi kurang mampu menahan bebas lalu linta berat dalam jangka panjang.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, penelitian ini bisa dikembangkan dari berbagai sisi seperti berikut ini.

1. Penelitian selanjutkan dapat menggunakan beberapa alternatif desain yang disediakan oleh bagan desain Bina Marga 2024.
2. Evaluasi STA lainnya untuk melihat sisa umur serta perencanaan *overlay* sebelum ruas pada STA lainnya mengalami kerusakan yang lebih parah atau harus di rekonstruksi.
3. Penggunaan analisis program *KENPAVE* dengan metode *viskoelastik*.
4. Perlu mengkaji lebih komprehensif tentang faktor penyebab kerusakan yang lain seperti drainase.

DAFTAR PUSTAKA

- Arrahman, M. F. (2023). *Evaluasi Kinerja Perkerasan Lentur dan Nilai Sisa Berdasarkan Metode Bina Marga 2017 Menggunakan Program Kenpave Pada Ruas Jalan Tawang-Ngalang Segmen 1 STA 0+000 - STA 1+950*. 2(1), 41–49.
- Arianto, R. (2023). *Evaluasi Kinerja Struktur Perkerasan Lentur Dengan Menggunakan Pendekatan Elastik dan Viskoelastik Pada Ruas Jalan Cipatujah-Kalapagenep-Pangandaran*.
- Biradar, B. (2019). *Stress Analysis Using KENPAVE Software to the Rigid Pavement Constructed By Using Recycled Aggregates*. IRE Journals, 9 (5), 1-7.
- Direktorat Jenderal Bina Marga, (2024). *Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) 2024*. Jakarta: Kementerian PUPR.
- Fauziah, M., & Ramadhani, R. I. (2018). *Evaluasi Desain Struktur Perkerasan Lentur Dengan Metode Bina Marga 2013 dan Metode Mekanistik-Empirik Menggunakan Program KENPAVE Pada Ruas Jalan Jogja-Solo*. Prosiding CEES 2018, 127-132
- Hadi, M. A., & Fauziah, M. (2022). *Comparative Study of Service Life Prediction Between Superpave and AC-WC Mixtures Using Viscoelastic and Elastic Modeling*. Jurnal Teknisia, 27(02), 71–82.
- Hadi, M. A. (2024). *Ekplorasi Dampak Perubahan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017 ke 2024 Menggunakan Program KENPAVE*. Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil, 29, 416–427.
- Maher, A., & Bennert, T. (2008). *Evaluation of Poisson ' s Ratio for Use in the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide*. Department of Transportation, The State of New Jersey, FHWA-NJ(004), 60.
- Pambudi, R. A., & Fauziah, M. (2021). *Evaluasi Perancangan Struktur Perkerasan Dengan Metode Bina Marga 2017 Dan Program KENPAVE Menggunakan Pendekatan Elastik dan Viscoelastik*. 303–314.
- Panjago, F., Hadi, M. A., Sipil, J. T., & Indonesia, U. I. (n.d.). *MENGGUNAKAN PROGRAM KENPAVE DENGAN*.

- Pradasari, N. K. (2023). *Evaluasi Rancangan Struktur Perkerasan Untuk Memprediksi Umur Layan Menggunakan Metode Bina Marga 2017, AASHTO 1993 dan Metode Mekanistik Empirik KENPAVE*. Universitas Islan Indonesia.
- Purwahono, F. P., & Solichin, I. (2023). Analisa Pengaruh Beban Kendaraan Terhadap Sisa Umur Rencana Jalan Dengan Metode Bina Marga 2017 Pada Ruas Jalan Brigjend Katamso - Jalan Raya Berbek - Jalan Raya Wadung Asri (STA 0+000 – STA 5+000). *INNOVATIVE: Journal Of Social Science Research*, 3, 9919–9933.
- Rahmawati, A., Aldiansyah, F., & Setiawan, D. M. (2021). Desain Tebal Perkerasan Lentur Jalan Menggunakan Program Kenpave di Ruas Jalan Maospati - Sukomoro, Kabupaten Magetan, Jawa Timur. *Bulletin of Civil Engineering*, 1(1), 19–23. <https://doi.org/10.18196/bce.v1i1.11050>
- Regar, N. B. (2021). *Analisis Tebal Perkerasan Lentur Dengan Menggunakan Program Kenpave*.
<https://repositori.uma.ac.id/handle/123456789/15874%0Ahttps://repositori.uma.ac.id/bitstream/123456789/15874/1/188110162> - Nursyafitri Br Regar - Fulltext.pdf
- Regar, N. B. (2021). *Analisis Tebal Perkerasan Lentur Dengan Menggunakan Program Kenpave*.
<https://repositori.uma.ac.id/handle/123456789/15874%0Ahttps://repositori.uma.ac.id/bitstream/123456789/15874/1/188110162> - Nursyafitri Br Regar - Fulltext.pdf
- Safari, R.S.I. & Fauziah, M. (2024). Analisis Pengaruh *Overload* Kendaraan Terhadap Umur Perkerasan Jalan: Perbandingan Metode Bina Marga 2017 dan Bina Marga 2024 Menggunakan Simulasi KENPAVE. Prosiding KNILT 2024. ISSN 2987-3177, Vo. 7.
- Saputra, A., Purwanto, E., & Fauziah, M. (2023). Alternatif Desain Perkerasan Jalan dan Perkuatan Lereng Longsor. *Rekayasa Sipil*, 17(2), 192–198. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2023.017.02.11>
- Sukirman, S. (1999). *Perkerasan Lentur Jalan Raya*. Bandung: Nova.
- Sukirman, S. (2010). *Perencanaan Tebal Struktur Perkerasan Lentur*. Bandung: Nova.
- Widhiatmoko, G., & Fauziah, M. (2024). Analisis Perbandingan Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Viskoelastik Pada MDPJ 2017 Dan MDP 2024 Menggunakan KENPAVE (Studi Kasus : Ruas Jalan Tol Solo - Yogyakarta - NYIA Kulon Progo Pada STA 02+00 - STA 07+500). *Konferensi Nasional Inovasi Lingkungan Terbangun - FTSP UII*, 7, 209–217.

Lampiran 1 Hasil Analisis Perkerasan Eksisting Menggunakan KENPAVE

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.003
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 3
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 5
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
 unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 5 15
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.45 0.45
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 4.997 5 19.997 20
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.611E+06 2 7.000E+04
 3 7.000E+04

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

RESPONSE PT. NO. AND (XPT, YPT) ARE: 1 0.000 0.000 2 0.000 5.000
 3 0.000 20.000

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000 (STRAIN)	0.11991 7.530E-04	550.000 -8.742E-04	2529.297 8.135E-04	587.215 -8.742E-04	2459.701 7.530E-04
1	4.99700 (STRAIN)	0.11421 -9.292E-04	305.946 1.180E-03	305.965 1.180E-03	-2120.622 -9.292E-04	-1865.018 -7.071E-04

1	5.00000	0.11420	305.909	305.928	-2123.584	-1867.672
	(STRAIN)	-9.304E-04	1.181E-03	1.181E-03	-9.304E-04	-7.080E-04
1	19.99700	0.08015	144.317	147.070	15.327	31.744
	(STRAIN)	-9.306E-04	1.741E-03	1.798E-03	-9.306E-04	-5.905E-04
1	20.00000	0.08015	144.297	147.051	15.321	31.736
	(STRAIN)	-9.305E-04	1.741E-03	1.798E-03	-9.305E-04	-5.904E-04
2	0.00000	0.12073	550.000	2384.990	533.453	2186.331
	(STRAIN)	6.325E-04	-8.039E-04	8.051E-04	-8.039E-04	6.325E-04
2	4.99700	0.11514	287.767	288.005	-1990.926	-1510.761
	(STRAIN)	-9.322E-04	1.048E-03	1.048E-03	-9.322E-04	-5.150E-04
2	5.00000	0.11513	287.732	287.961	-1993.739	-1512.995
	(STRAIN)	-9.334E-04	1.049E-03	1.049E-03	-9.334E-04	-5.156E-04
2	19.99700	0.08304	147.222	147.587	15.861	39.001
	(STRAIN)	-9.729E-04	1.748E-03	1.756E-03	-9.729E-04	-4.936E-04
2	20.00000	0.08303	147.204	147.569	15.855	38.992
	(STRAIN)	-9.728E-04	1.748E-03	1.756E-03	-9.728E-04	-4.936E-04
3	0.00000	0.11309	0.000	1656.362	306.744	1106.808
	(STRAIN)	1.996E-04	-4.957E-04	6.772E-04	-4.957E-04	1.996E-04
3	4.99700	0.10714	183.980	283.891	-1102.643	177.609
	(STRAIN)	-7.990E-04	3.191E-04	4.059E-04	-7.990E-04	3.135E-04
3	5.00000	0.10714	183.982	283.907	-1104.134	177.933
	(STRAIN)	-8.000E-04	3.194E-04	4.062E-04	-8.000E-04	3.141E-04
3	19.99700	0.08454	140.319	140.324	15.588	48.158
	(STRAIN)	-9.890E-04	1.595E-03	1.595E-03	-9.890E-04	-3.143E-04
3	20.00000	0.08453	140.307	140.312	15.583	48.146
	(STRAIN)	-9.889E-04	1.595E-03	1.595E-03	-9.889E-04	-3.144E-04
POINT	VERTICAL	NORMAL X	NORMAL Y	SHEAR XY	SHEAR YZ	SHEAR XZ
NO.	COORDINATE	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)
1	0.00000	2.529E+03	2.460E+03	0.000E+00	-1.278E-05	0.000E+00
	(STRAIN)	8.135E-04	7.530E-04	0.000E+00	-2.222E-11	0.000E+00
1	4.99700	-2.121E+03	-1.865E+03	0.000E+00	-6.392E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.292E-04	-7.071E-04	0.000E+00	-1.111E-05	0.000E+00
1	5.00000	-2.124E+03	-1.868E+03	0.000E+00	-6.420E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.304E-04	-7.080E-04	0.000E+00	-1.116E-05	0.000E+00
1	19.99700	1.533E+01	3.450E+01	0.000E+00	-1.760E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.306E-04	-5.335E-04	0.000E+00	-7.293E-04	0.000E+00
1	20.00000	1.532E+01	3.449E+01	0.000E+00	-1.760E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.305E-04	-5.334E-04	0.000E+00	-7.293E-04	0.000E+00
2	0.00000	2.385E+03	2.186E+03	0.000E+00	1.316E-06	0.000E+00
	(STRAIN)	8.051E-04	6.325E-04	0.000E+00	2.288E-12	0.000E+00
2	4.99700	-1.991E+03	-1.511E+03	0.000E+00	2.070E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.322E-04	-5.147E-04	0.000E+00	3.597E-05	0.000E+00
2	5.00000	-1.994E+03	-1.513E+03	0.000E+00	2.029E+01	0.000E+00

	(STRAIN)	-9.334E-04	-5.154E-04	0.000E+00	3.527E-05	0.000E+00
2	19.99700	1.586E+01	3.937E+01	0.000E+00	-6.285E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.729E-04	-4.860E-04	0.000E+00	-2.604E-04	0.000E+00
2	20.00000	1.585E+01	3.936E+01	0.000E+00	-6.288E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.728E-04	-4.860E-04	0.000E+00	-2.605E-04	0.000E+00
3	0.00000	1.656E+03	1.107E+03	0.000E+00	-2.825E-05	0.000E+00
	(STRAIN)	6.772E-04	1.996E-04	0.000E+00	-4.910E-11	0.000E+00
3	4.99700	-1.103E+03	2.775E+02	0.000E+00	-2.523E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-7.990E-04	4.004E-04	0.000E+00	-4.385E-05	0.000E+00
3	5.00000	-1.104E+03	2.779E+02	0.000E+00	-2.459E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-8.000E-04	4.009E-04	0.000E+00	-4.273E-05	0.000E+00
3	19.99700	1.559E+01	4.816E+01	0.000E+00	-6.900E-01	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.890E-04	-3.142E-04	0.000E+00	-2.859E-05	0.000E+00
3	20.00000	1.558E+01	4.815E+01	0.000E+00	-6.880E-01	0.000E+00
	(STRAIN)	-9.889E-04	-3.143E-04	0.000E+00	-2.850E-05	0.000E+00

Lampiran 2 Hasil Analisis Alternatif Desain CTB 200 mm Menggunakan KENPAVE

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.003
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 6
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 5
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
 unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 4 6 15 15 20
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.4 0.2 0.45 0.45 0.45
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 9.997 10 59.997 60
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.481E+06 2 1.200E+06
 3 3.000E+06 4 7.000E+04 5 7.000E+04 6 7.000E+04

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

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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.03914	550.000	376.879	153.633	367.239
	(STRAIN)	1.047E-04	-9.724E-05	1.138E-04	-9.724E-05	1.047E-04
1	9.99700	0.04116	393.191	404.839	282.280	305.047
	(STRAIN)	1.220E-05	1.280E-04	1.416E-04	-1.395E-06	2.517E-05

1	10.00000	0.04116	393.078	404.744	282.303	305.080
	(STRAIN)	1.225E-05	1.279E-04	1.415E-04	-1.356E-06	2.522E-05
1	59.99700	0.03014	19.273	19.602	3.225	3.665
	(STRAIN)	-1.035E-04	2.289E-04	2.357E-04	-1.035E-04	-9.439E-05
1	60.00000	0.03014	19.272	19.601	3.225	3.665
	(STRAIN)	-1.035E-04	2.289E-04	2.357E-04	-1.035E-04	-9.439E-05
2	0.00000	0.03951	550.000	369.069	143.825	360.095
	(STRAIN)	1.046E-04	-9.982E-05	1.131E-04	-9.982E-05	1.046E-04
2	9.99700	0.04194	211.049	305.302	127.721	213.071
	(STRAIN)	3.322E-05	3.086E-05	1.408E-04	-6.636E-05	3.322E-05
2	10.00000	0.04194	210.999	305.284	127.633	213.081
	(STRAIN)	3.326E-05	3.083E-05	1.408E-04	-6.643E-05	3.326E-05
2	59.99700	0.03071	20.143	20.196	3.317	3.811
	(STRAIN)	-1.069E-04	2.416E-04	2.427E-04	-1.069E-04	-9.671E-05
2	60.00000	0.03071	20.143	20.195	3.317	3.811
	(STRAIN)	-1.069E-04	2.416E-04	2.427E-04	-1.069E-04	-9.671E-05
3	0.00000	0.03958	0.000	340.211	104.747	329.315
	(STRAIN)	1.022E-04	-1.101E-04	1.125E-04	-1.101E-04	1.022E-04
3	9.99700	0.04189	81.852	170.794	81.852	147.431
	(STRAIN)	3.864E-05	-3.787E-05	6.590E-05	-3.787E-05	3.864E-05
3	10.00000	0.04189	81.873	170.635	81.873	147.401
	(STRAIN)	3.866E-05	-3.778E-05	6.577E-05	-3.778E-05	3.866E-05
3	59.99700	0.03082	20.307	20.307	3.333	3.839
	(STRAIN)	-1.076E-04	2.440E-04	2.440E-04	-1.076E-04	-9.713E-05
3	60.00000	0.03082	20.306	20.306	3.333	3.839
	(STRAIN)	-1.076E-04	2.440E-04	2.440E-04	-1.076E-04	-9.712E-05

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	NORMAL X STRESS (STRAIN)	NORMAL Y STRESS (STRAIN)	SHEAR XY STRESS (STRAIN)	SHEAR YZ STRESS (STRAIN)	SHEAR XZ STRESS (STRAIN)
1	0.00000	3.769E+02	3.672E+02	0.000E+00	2.680E-06	0.000E+00
	(STRAIN)	1.138E-04	1.047E-04	0.000E+00	5.066E-12	0.000E+00
1	9.99700	3.050E+02	2.939E+02	0.000E+00	-3.594E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	2.516E-05	1.220E-05	0.000E+00	-8.387E-05	0.000E+00
1	10.00000	3.051E+02	2.940E+02	0.000E+00	-3.595E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	2.522E-05	1.225E-05	0.000E+00	-8.388E-05	0.000E+00
1	59.99700	3.225E+00	3.994E+00	0.000E+00	-2.266E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.035E-04	-8.757E-05	0.000E+00	-9.389E-05	0.000E+00
1	60.00000	3.225E+00	3.994E+00	0.000E+00	-2.266E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.035E-04	-8.757E-05	0.000E+00	-9.389E-05	0.000E+00
2	0.00000	3.691E+02	3.601E+02	0.000E+00	6.510E-07	0.000E+00
	(STRAIN)	1.131E-04	1.046E-04	0.000E+00	1.231E-12	0.000E+00
2	9.99700	2.131E+02	2.220E+02	0.000E+00	8.862E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	3.322E-05	4.361E-05	0.000E+00	2.068E-04	0.000E+00
2	10.00000	2.131E+02	2.219E+02	0.000E+00	8.866E+01	0.000E+00

	(STRAIN)	3.326E-05	4.357E-05	0.000E+00	2.069E-04	0.000E+00
2	59.99700	3.317E+00	3.864E+00	0.000E+00	-9.291E-01	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.069E-04	-9.561E-05	0.000E+00	-3.849E-05	0.000E+00
2	60.00000	3.317E+00	3.864E+00	0.000E+00	-9.291E-01	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.069E-04	-9.561E-05	0.000E+00	-3.849E-05	0.000E+00
3	0.00000	3.402E+02	3.293E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	1.125E-04	1.022E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	9.99700	1.474E+02	1.708E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	3.864E-05	6.590E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	10.00000	1.474E+02	1.706E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	3.866E-05	6.577E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	59.99700	3.333E+00	3.839E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.076E-04	-9.713E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	60.00000	3.333E+00	3.839E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.076E-04	-9.712E-05	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

1	10.00000	0.03510	407.211	413.981	290.210	304.591
	(STRAIN)	1.021E-05	1.388E-04	1.467E-04	2.317E-06	1.910E-05
1	64.99700	0.02640	14.862	15.071	2.717	2.997
	(STRAIN)	-7.735E-05	1.742E-04	1.786E-04	-7.735E-05	-7.153E-05
1	65.00000	0.02640	14.862	15.071	2.717	2.997
	(STRAIN)	-7.734E-05	1.742E-04	1.786E-04	-7.734E-05	-7.153E-05
2	0.00000	0.03301	550.000	262.364	84.075	256.986
	(STRAIN)	7.350E-05	-7.676E-05	7.817E-05	-7.676E-05	7.350E-05
2	9.99700	0.03550	223.190	314.031	135.276	211.499
	(STRAIN)	2.648E-05	4.012E-05	1.461E-04	-6.245E-05	2.648E-05
2	10.00000	0.03550	223.147	314.025	135.201	211.528
	(STRAIN)	2.653E-05	4.009E-05	1.461E-04	-6.252E-05	2.653E-05
2	64.99700	0.02680	15.422	15.456	2.774	3.082
	(STRAIN)	-7.953E-05	1.825E-04	1.831E-04	-7.953E-05	-7.317E-05
2	65.00000	0.02680	15.421	15.455	2.774	3.082
	(STRAIN)	-7.953E-05	1.824E-04	1.831E-04	-7.953E-05	-7.317E-05
3	0.00000	0.02565	0.000	101.413	20.575	94.438
	(STRAIN)	2.833E-05	-3.586E-05	3.439E-05	-3.586E-05	2.833E-05
3	9.99700	0.02750	1.258	55.796	-26.284	46.031
	(STRAIN)	7.783E-06	-2.371E-05	3.991E-05	-5.585E-05	2.852E-05
3	10.00000	0.02750	1.259	55.793	-26.294	46.015
	(STRAIN)	7.775E-06	-2.370E-05	3.992E-05	-5.585E-05	2.851E-05
3	64.99700	0.02333	10.857	12.145	2.255	2.403
	(STRAIN)	-6.132E-05	1.169E-04	1.436E-04	-6.132E-05	-5.824E-05
3	65.00000	0.02333	10.857	12.145	2.254	2.403
	(STRAIN)	-6.132E-05	1.169E-04	1.436E-04	-6.132E-05	-5.824E-05
POINT	VERTICAL	NORMAL X	NORMAL Y	SHEAR XY	SHEAR YZ	SHEAR XZ
NO.	COORDINATE	STRESS	STRESS	STRESS	STRESS	STRESS
		(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)	(STRAIN)
1	0.00000	2.263E+02	2.234E+02	0.000E+00	6.951E-08	0.000E+00
	(STRAIN)	6.694E-05	6.440E-05	0.000E+00	1.208E-13	0.000E+00
1	9.99700	3.045E+02	2.969E+02	0.000E+00	-2.814E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	1.904E-05	1.015E-05	0.000E+00	-6.566E-05	0.000E+00
1	10.00000	3.046E+02	2.970E+02	0.000E+00	-2.814E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	1.910E-05	1.021E-05	0.000E+00	-6.567E-05	0.000E+00
1	64.99700	2.717E+00	3.206E+00	0.000E+00	-1.575E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-7.735E-05	-6.720E-05	0.000E+00	-6.525E-05	0.000E+00
1	65.00000	2.717E+00	3.206E+00	0.000E+00	-1.575E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-7.734E-05	-6.720E-05	0.000E+00	-6.525E-05	0.000E+00
2	0.00000	2.624E+02	2.570E+02	0.000E+00	-7.418E-07	0.000E+00
	(STRAIN)	7.818E-05	7.350E-05	0.000E+00	-1.289E-12	0.000E+00
2	9.99700	2.115E+02	2.261E+02	0.000E+00	8.937E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	2.648E-05	4.353E-05	0.000E+00	2.085E-04	0.000E+00
2	10.00000	2.115E+02	2.261E+02	0.000E+00	8.940E+01	0.000E+00

	(STRAIN)	2.653E-05	4.351E-05	0.000E+00	2.086E-04	0.000E+00
2	64.99700	2.774E+00	3.115E+00	0.000E+00	-6.437E-01	0.000E+00
	(STRAIN)	-7.953E-05	-7.247E-05	0.000E+00	-2.667E-05	0.000E+00
2	65.00000	2.774E+00	3.115E+00	0.000E+00	-6.437E-01	0.000E+00
	(STRAIN)	-7.953E-05	-7.247E-05	0.000E+00	-2.667E-05	0.000E+00
3	0.00000	1.014E+02	9.444E+01	0.000E+00	-9.123E-07	0.000E+00
	(STRAIN)	3.439E-05	2.833E-05	0.000E+00	-1.586E-12	0.000E+00
3	9.99700	4.603E+01	2.825E+01	0.000E+00	3.876E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	2.852E-05	7.783E-06	0.000E+00	9.043E-05	0.000E+00
3	10.00000	4.601E+01	2.824E+01	0.000E+00	3.876E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	2.851E-05	7.775E-06	0.000E+00	9.045E-05	0.000E+00
3	64.99700	2.255E+00	3.691E+00	0.000E+00	3.300E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-6.132E-05	-3.156E-05	0.000E+00	1.367E-04	0.000E+00
3	65.00000	2.254E+00	3.691E+00	0.000E+00	3.300E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-6.132E-05	-3.156E-05	0.000E+00	1.367E-04	0.000E+00

Lampiran 4 Hasil Analisis Alternatif Desain FFF 1 Menggunakan KENPAVE

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.003
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 4
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 5
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
 unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 6 20 15
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.45 0.45 0.45
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 5.997 6 40.997 41
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.481E+06 2 7.000E+04
 3 7.000E+04 4 7.000E+04

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

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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.10763	550.000	1816.552	440.285	1785.868
	(STRAIN)	5.963E-04	-6.757E-04	6.253E-04	-6.757E-04	5.963E-04
1	5.99700	0.10644	262.317	262.351	-1852.094	-1593.210
	(STRAIN)	-8.911E-04	1.108E-03	1.108E-03	-8.911E-04	-6.464E-04

1	6.00000	0.10644	262.284	262.318	-1854.290	-1595.148
	(STRAIN)	-8.921E-04	1.109E-03	1.109E-03	-8.921E-04	-6.471E-04
1	40.99700	0.05377	63.896	66.448	1.657	6.836
	(STRAIN)	-4.474E-04	8.418E-04	8.947E-04	-4.474E-04	-3.402E-04
1	41.00000	0.05376	63.890	66.442	1.656	6.834
	(STRAIN)	-4.474E-04	8.417E-04	8.946E-04	-4.474E-04	-3.401E-04
2	0.00000	0.10832	550.000	1576.781	346.870	1332.688
	(STRAIN)	3.803E-04	-5.516E-04	6.110E-04	-5.516E-04	3.803E-04
2	5.99700	0.10541	206.739	207.810	-1376.955	-511.092
	(STRAIN)	-8.478E-04	6.492E-04	6.503E-04	-8.478E-04	-2.933E-05
2	6.00000	0.10540	206.723	207.742	-1378.605	-511.758
	(STRAIN)	-8.487E-04	6.499E-04	6.508E-04	-8.487E-04	-2.931E-05
2	40.99700	0.05661	70.056	70.432	1.858	8.621
	(STRAIN)	-4.817E-04	9.310E-04	9.388E-04	-4.817E-04	-3.416E-04
2	41.00000	0.05661	70.049	70.426	1.857	8.620
	(STRAIN)	-4.816E-04	9.309E-04	9.387E-04	-4.816E-04	-3.415E-04
3	0.00000	0.10513	0.000	1237.646	252.729	973.276
	(STRAIN)	2.546E-04	-4.265E-04	5.046E-04	-4.265E-04	2.546E-04
3	5.99700	0.10220	163.235	282.369	-953.989	163.236
	(STRAIN)	-7.645E-04	2.916E-04	4.042E-04	-7.645E-04	2.916E-04
3	6.00000	0.10220	163.240	282.705	-955.039	163.240
	(STRAIN)	-7.653E-04	2.918E-04	4.047E-04	-7.653E-04	2.918E-04
3	40.99700	0.05714	71.113	71.113	1.894	9.004
	(STRAIN)	-4.880E-04	9.458E-04	9.458E-04	-4.880E-04	-3.407E-04
3	41.00000	0.05714	71.106	71.106	1.893	9.002
	(STRAIN)	-4.879E-04	9.458E-04	9.458E-04	-4.879E-04	-3.407E-04

POINT	VERTICAL	NORMAL X	NORMAL Y	SHEAR XY	SHEAR YZ	SHEAR XZ
NO.	COORDINATE	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)
1	0.00000	1.817E+03	1.786E+03	0.000E+00	-7.542E-06	0.000E+00
	(STRAIN)	6.253E-04	5.963E-04	0.000E+00	-1.426E-11	0.000E+00
1	5.99700	-1.852E+03	-1.593E+03	0.000E+00	-7.955E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-8.911E-04	-6.464E-04	0.000E+00	-1.504E-05	0.000E+00
1	6.00000	-1.854E+03	-1.595E+03	0.000E+00	-7.966E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-8.921E-04	-6.471E-04	0.000E+00	-1.506E-05	0.000E+00
1	40.99700	1.657E+00	9.388E+00	0.000E+00	-1.207E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-4.474E-04	-2.873E-04	0.000E+00	-4.999E-04	0.000E+00
1	41.00000	1.656E+00	9.386E+00	0.000E+00	-1.207E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-4.474E-04	-2.873E-04	0.000E+00	-4.999E-04	0.000E+00
2	0.00000	1.577E+03	1.333E+03	0.000E+00	1.768E-05	0.000E+00
	(STRAIN)	6.110E-04	3.803E-04	0.000E+00	3.342E-11	0.000E+00
2	5.99700	-1.377E+03	-5.100E+02	0.000E+00	2.773E+01	0.000E+00
	(STRAIN)	-8.478E-04	-2.832E-05	0.000E+00	5.242E-05	0.000E+00
2	6.00000	-1.379E+03	-5.107E+02	0.000E+00	2.705E+01	0.000E+00

	(STRAIN)	-8.487E-04	-2.835E-05	0.000E+00	5.115E-05	0.000E+00
2	40.99700	1.858E+00	8.998E+00	0.000E+00	-4.812E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-4.817E-04	-3.338E-04	0.000E+00	-1.994E-04	0.000E+00
2	41.00000	1.857E+00	8.996E+00	0.000E+00	-4.812E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-4.816E-04	-3.337E-04	0.000E+00	-1.993E-04	0.000E+00
3	0.00000	1.238E+03	9.733E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	5.046E-04	2.546E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	5.99700	-9.540E+02	2.824E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-7.645E-04	4.042E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	6.00000	-9.550E+02	2.827E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-7.653E-04	4.047E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	40.99700	1.894E+00	9.004E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-4.880E-04	-3.407E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	41.00000	1.893E+00	9.002E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-4.879E-04	-3.407E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

Lampiran 5 Hasil Analisis Alternatif Desain FFF 2 Menggunakan KENPAVE

MATL = 1 FOR LINEAR ELASTIC LAYERED SYSTEM
 NDAMA = 0, SO DAMAGE ANALYSIS WILL NOT BE PERFORMED
 NUMBER OF PERIODS PER YEAR (NPY) = 1
 NUMBER OF LOAD GROUPS (NLG) = 1
 TOLERANCE FOR INTEGRATION (DEL) -- = 0.003
 NUMBER OF LAYERS (NL)----- = 6
 NUMBER OF Z COORDINATES (NZ)----- = 5
 LIMIT OF INTEGRATION CYCLES (ICL)- = 80
 COMPUTING CODE (NSTD)----- = 9
 SYSTEM OF UNITS (NUNIT)----- = 1

Length and displacement in cm, stress and modulus in kPa
 unit weight in kN/m³, and temperature in C

THICKNESSES OF LAYERS (TH) ARE : 4 6.5 8 20 15
 POISSON'S RATIOS OF LAYERS (PR) ARE : 0.4 0.4 0.4 0.45 0.45 0.45
 VERTICAL COORDINATES OF POINTS (ZC) ARE: 0 18.497 18.5 53.497 53.5
 ALL INTERFACES ARE FULLY BONDED

FOR PERIOD NO. 1 LAYER NO. AND MODULUS ARE : 1 1.481E+06 2 1.200E+06
 3 1.200E+06 4 7.000E+04 5 7.000E+04 6 7.000E+04

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

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

PERIOD NO. 1 LOAD GROUP NO. 1

POINT NO.	VERTICAL COORDINATE	VERTICAL DISPL. (HORIZONTAL P. STRAIN)	VERTICAL STRESS (STRAIN)	MAJOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	MINOR PRINCIPAL STRESS (STRAIN)	INTERMEDIATE PRINCIPAL STRESS (STRAIN)
1	0.00000	0.05417	550.000	516.626	153.633	503.801
	(STRAIN)	1.592E-04	-1.719E-04	1.713E-04	-1.719E-04	1.591E-04
1	18.49700	0.05630	71.933	72.029	-612.345	-504.701
	(STRAIN)	-3.661E-04	4.323E-04	4.324E-04	-3.661E-04	-2.405E-04

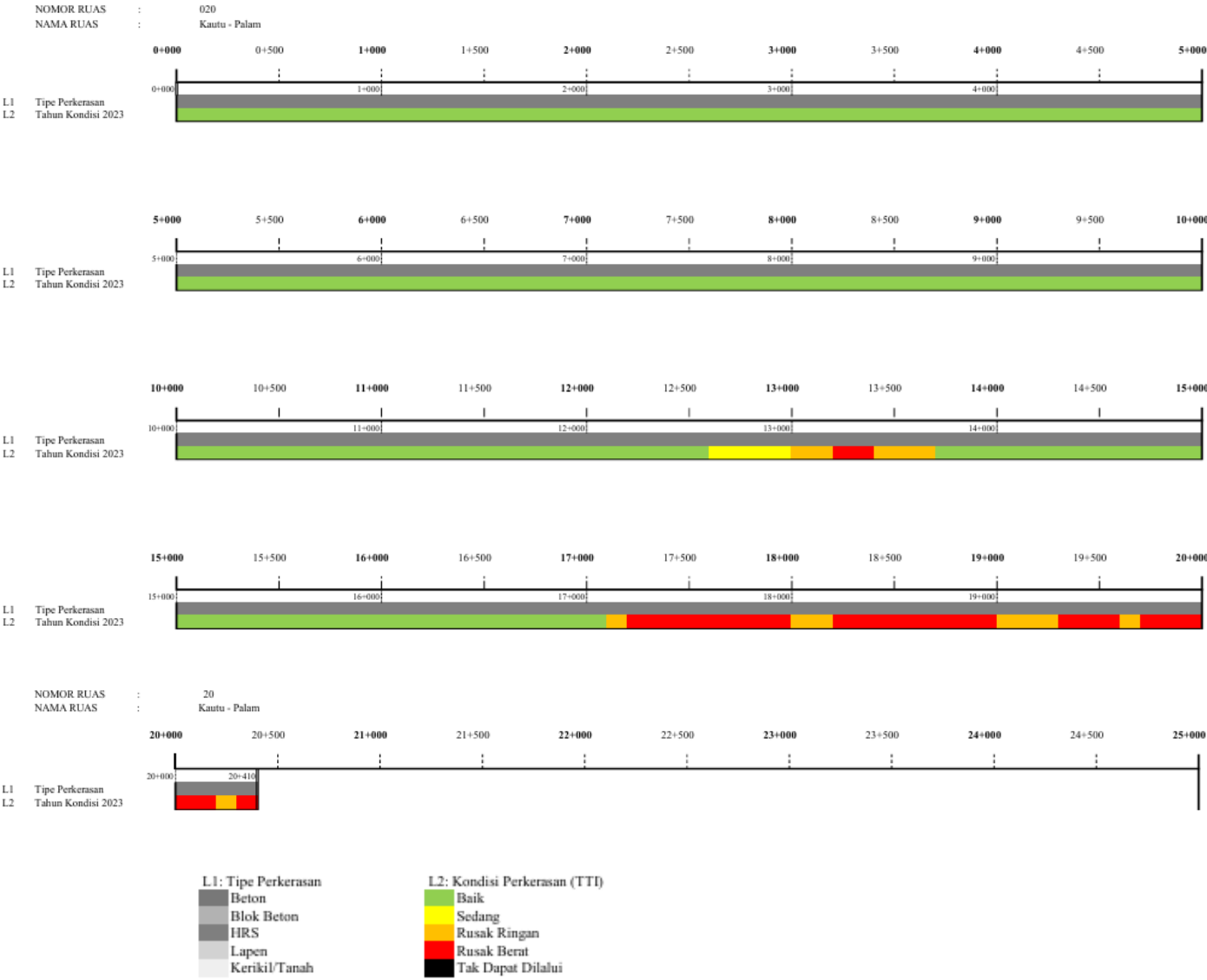
1	18.50000	0.05630	71.925	72.021	-612.629	-504.944
	(STRAIN)	-3.662E-04	4.324E-04	4.325E-04	-3.662E-04	-2.406E-04
1	53.49700	0.03762	30.274	31.040	3.027	4.100
	(STRAIN)	-1.827E-04	3.817E-04	3.976E-04	-1.827E-04	-1.604E-04
1	53.50000	0.03762	30.272	31.038	3.027	4.100
	(STRAIN)	-1.826E-04	3.817E-04	3.976E-04	-1.826E-04	-1.604E-04
2	0.00000	0.05744	550.000	583.869	166.229	553.750
	(STRAIN)	1.713E-04	-1.950E-04	1.998E-04	-1.950E-04	1.713E-04
2	18.49700	0.05831	71.084	71.084	-590.652	-414.957
	(STRAIN)	-3.776E-04	3.944E-04	3.944E-04	-3.776E-04	-1.726E-04
2	18.50000	0.05831	71.079	71.079	-590.901	-415.120
	(STRAIN)	-3.777E-04	3.946E-04	3.946E-04	-3.777E-04	-1.727E-04
2	53.49700	0.03870	32.176	32.299	3.163	4.425
	(STRAIN)	-1.909E-04	4.101E-04	4.126E-04	-1.909E-04	-1.648E-04
2	53.50000	0.03869	32.174	32.297	3.163	4.424
	(STRAIN)	-1.909E-04	4.101E-04	4.126E-04	-1.909E-04	-1.648E-04
3	0.00000	0.05450	0.000	434.909	104.747	416.259
	(STRAIN)	1.353E-04	-1.592E-04	1.529E-04	-1.592E-04	1.353E-04
3	18.49700	0.05849	68.972	68.972	-564.958	-357.467
	(STRAIN)	-3.746E-04	3.650E-04	3.650E-04	-3.746E-04	-1.326E-04
3	18.50000	0.05849	68.968	68.968	-565.183	-357.584
	(STRAIN)	-3.748E-04	3.651E-04	3.651E-04	-3.748E-04	-1.326E-04
3	53.49700	0.03890	32.532	32.532	3.189	4.489
	(STRAIN)	-1.924E-04	4.154E-04	4.154E-04	-1.924E-04	-1.655E-04
3	53.50000	0.03890	32.530	32.530	3.188	4.489
	(STRAIN)	-1.924E-04	4.154E-04	4.154E-04	-1.924E-04	-1.655E-04

POINT	VERTICAL	NORMAL X	NORMAL Y	SHEAR XY	SHEAR YZ	SHEAR XZ
NO.	COORDINATE	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)	STRESS (STRAIN)
1	0.00000	5.166E+02	5.038E+02	0.000E+00	-1.663E-06	0.000E+00
	(STRAIN)	1.713E-04	1.592E-04	0.000E+00	-3.144E-12	0.000E+00
1	18.49700	-6.123E+02	-5.046E+02	0.000E+00	-7.452E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-3.661E-04	-2.404E-04	0.000E+00	-1.739E-05	0.000E+00
1	18.50000	-6.126E+02	-5.048E+02	0.000E+00	-7.430E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-3.662E-04	-2.405E-04	0.000E+00	-1.734E-05	0.000E+00
1	53.49700	3.027E+00	4.866E+00	0.000E+00	-4.478E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.827E-04	-1.446E-04	0.000E+00	-1.855E-04	0.000E+00
1	53.50000	3.027E+00	4.866E+00	0.000E+00	-4.477E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.826E-04	-1.446E-04	0.000E+00	-1.855E-04	0.000E+00
2	0.00000	5.839E+02	5.537E+02	0.000E+00	1.390E-06	0.000E+00
	(STRAIN)	1.998E-04	1.713E-04	0.000E+00	2.627E-12	0.000E+00
2	18.49700	-5.907E+02	-4.150E+02	0.000E+00	2.707E-01	0.000E+00
	(STRAIN)	-3.776E-04	-1.726E-04	0.000E+00	6.317E-07	0.000E+00
2	18.50000	-5.909E+02	-4.151E+02	0.000E+00	2.242E-01	0.000E+00

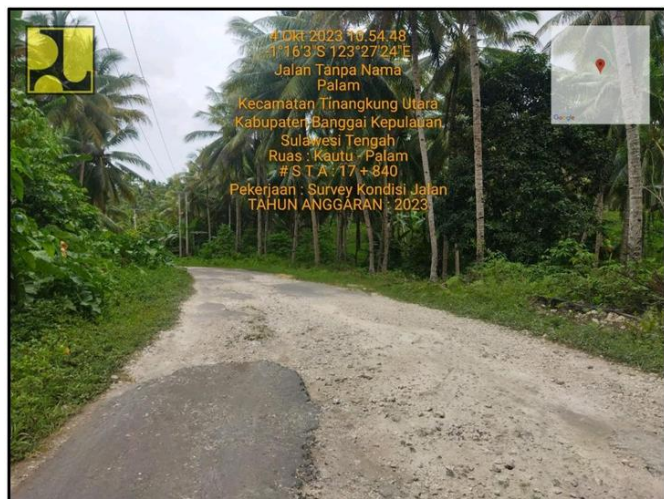
	(STRAIN)	-3.777E-04	-1.727E-04	0.000E+00	5.231E-07	0.000E+00
2	53.49700	3.163E+00	4.547E+00	0.000E+00	-1.845E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.909E-04	-1.622E-04	0.000E+00	-7.642E-05	0.000E+00
2	53.50000	3.163E+00	4.547E+00	0.000E+00	-1.845E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.909E-04	-1.622E-04	0.000E+00	-7.642E-05	0.000E+00
3	0.00000	4.349E+02	4.163E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	1.529E-04	1.353E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	18.49700	-5.650E+02	-3.575E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-3.746E-04	-1.326E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	18.50000	-5.652E+02	-3.576E+02	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-3.748E-04	-1.326E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	53.49700	3.189E+00	4.489E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.924E-04	-1.655E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
3	53.50000	3.188E+00	4.489E+00	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
	(STRAIN)	-1.924E-04	-1.655E-04	0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

Lampiran 6 Data Kerusakan Stripmap

STRIPMAP



Lampiran 7 Kondisi Ruas Kautu Palam STA 17+000 – STA 20+410





Lampiran 8 Hasil Pengujian Karakteristik Campuran *Marshall*

PENGUJIAN KARAKTERISTIK CAMPURAN DENGAN MARSHALL DENGAN METODA MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

No. Benda Uji	Tinggi Benda Uji	Kadar Aspal B	Berat Jenis Maks. 83 C	Berat (Gram)			Isi G	Bj Bulk Campuran H	(%)			Angka Koreksi	Stabilitas		Kelelahan Plastis (Flow) N	Marshall Quotient (MQ) O
				di Udara D	dalam Air E	SSD F			Rongga dlm camp (VITM) I	Rongga dalam Aggrt (VMA) J	Rongga terisi Aspal (VFWA) K		di Baca L	di Sesuaikan M		
		% Total Campuran	$\frac{100}{100-B} + \frac{B}{T}$ Gse	Data Timbangan Laborat	Data Timbangan Laborat	Data Timbangan Laborat	F - E	D / G	C - H x 100 ----- C	100 - (H x (100-B)) / Gsb	$\frac{B \times H}{T}$ (B x H / T)+1 x 100%		Data Pembc. Prov. Ring	Nilai Stabilitas (kg)	Data Pembc. Lab	M ----- N
1	65,04	6,2	2,470	999,92	575,79	1002,72	426,93	2,342					72	995,155	3,31	
	65,23												70	967,511	3,32	
	64,54												70	967,511	3,15	
	64,9367							2,342	5,192	18,604	73,05	0,934	70,67	976	3,260	299,387
2	63,23	6,2	2,470	1056,98	610,22	1060,1	449,88	2,349					67	1004,216	3,45	
	63,66												64	959,251	3,55	
	63,11												64	959,251	3,53	
	63,3333							2,349	4,9	18,36	74,227	1,0133	65,00	974	3,510	277,493
3	50,88	6,2	2,470	805,11	465,84	810,78	344,94	2,334					50	1011,263	3,34	
	54,49												46	930,362	3,41	
	53,38												45	910,137	3,47	
	52,9167							2,334	5,51	18,88	71,790	1,367	47,00	950	3,407	278,865
4	54,04	6,2	2,470	895,34	515,51	897,16	381,65	2,346					50	960,357	3,54	
	54,59												52	998,771	3,44	
	54,84												49	941,150	3,31	
	54,49							2,346	5,03	18,47	73,698	1,299	50,33	966	3,430	281,633
5	62,05	6,2	2,470	932,77	538,05	936,79	398,74	2,339					51	979,564	3,51	
	57,81												48	921,943	3,49	
	57,59												50	960,357	3,64	
	59,15							2,339	5,31	18,71	72,575	1,126	49,67	953	3,547	268,703
	4 - 7								4-5	-15	-65			min 800	2-4	200 - 350

PENGUJIAN KARAKTERISTIK CAMPURAN DENGAN MARSHALL
DENGAN METODA MARSHALL (AASHTO : T 245 - 78)

