

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PERBANDINGAN DESAIN STRUKTUR
PERKERASAN LENTUR MENGGUNAKAN METODE
EMPIRIS DAN METODE MEKANISTIK EMPIRIS
PADA RUAS JALAN LEGUNDI-KANIGORO-
PLANJAN**

***(COMPARISON ANALYSIS OF PAVEMENT
STRUCTURE DESIGN USING EMPIRICAL AND
EMPIRICAL-MECHANISTIC METHOD)***

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



Annisa Pradnya Widiastuti

13511111

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

2018

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PERBANDINGAN DESAIN STRUKTUR
PERKERASAN LENTUR MENGGUNAKAN METODE
EMPIRIS DAN METODE MEKANISTIK EMPIRIS
PADA RUAS JALAN LEGUNDI-KANIGORO-
PLANJAN**

**(COMPARISON ANALYSIS OF PAVEMENT
STRUCTURE DESIGN USING EMPIRICAL AND
EMPIRICAL-MECHANISTIC METHOD)**

disusun oleh

Annisa Pradnya Widiastuti

13511111

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

Diuji pada tanggal

9 Januari 2018

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Berlian Kushari, S.T, M.Eng
NIK : 015110101

Penguji I

Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK : 995110103

Penguji II

Ir. Corry Ya'cub, M.T.
NIK : 815110102

19/1-18

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D.
NIK : 995110103

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

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

Yogyakarta, 09 Januari 2018

Yang membuat pernyataan,



Annisa Radnya Widiastuti

(13511111)

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT atas kebaikannya dalam memberi rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir yang berjudul Analisis Perbandingan Perencanaan Desain Struktur Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Empiris dan Metode Mekanistik Empiris Pada Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini penulis mengalami banyak hambatan, namun berkat saran, kritik, doa, dukungan, semangat dan dorongan dari berbagai pihak, Alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih tak terhingga kepada :

1. Bapak Berlian Kushari, S.T, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan kritik dan saran untuk Tugas Akhir ini. Juga telah banyak meluangkan waktu, tenaga dan pikiran untuk memberikan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini,
2. Ibu Miftahul Fauziah, S.T., M.T., Ph.D., dan Bapak Ir. Corry Ya'cub, M.T. selaku Dosen Penguji yang telah bersedia meluangkan waktu untuk menguji, membimbing dan mengarahkan penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini,
3. Seluruh Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta yang telah memberikan ilmu dan wawasan selama kuliah,
4. Semua pihak dari Satuan Kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional (P2JN) yang telah mengizinkan untuk pengambilan data penelitian sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir saya ini,
5. Ibu, Bapak dan Adik tercinta, atas cinta dan kasih tak terhingga yang Ibu berikan. Terima kasih untuk motivasi, dukungan, kekuatan, inspirasi,

nasihat, doa dan kesabarannya dalam membimbing saya menjadi pribadi yang lebih baik,

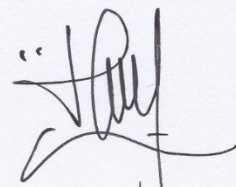
6. Mentor terbaik, Widya Wulandari, yang telah membantu memahami, mengajari metode dan materi yang digunakan oleh penulis,
7. Haidar Ramadhan. Terima kasih atas doa, dukungan, motivasi, dan waktu yang telah diberikan sehingga Tugas Akhir ini selesai,
8. Teman-teman Cetem Jakwir yang sudah memberikan semangat, uluran tangan, dukungan, pelajaran dan motivasi yang tidak ternilai selama masa perkuliahan sehingga terselesaikannya Tugas Akhir ini,
9. Teman-Teman semasa Kerja Praktik, Amanda, Brian, Aji dan Arthana yang senantiasa memberikan motivasi dan semangat agar saya tidak mudah menyerah,
10. Saudara-saudara Sipil Angkatan 2013. Terima kasih atas bantuan dan dukungannya sehingga terselesaikannya Tugas Akhir ini, dan
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, baik yang telah membantu dan mendoakan penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan yang terdapat dalam penulisan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu penulis minta maaf kepada semua pihak yang merasa kurang berkenan akan Tugas Akhir ini. Namun demikian, penulis selalu berusaha untuk memberikan yang terbaik. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penyusun dan semua pihak yang membutuhkannya.

Wassalamualaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, Desember 2017

Penulis,



Annisa Pradnya Widiastuti

13511111

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Halaman Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xiv
ABSTRAK	xvi
<i>ABSTRACT</i>	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Perkerasan Jalan Raya	6
2.2 Perencanaan Tebal Lapis Perkerasan Jalan	8
2.3 Kegagalan Perkerasan Lentur	11
2.4 Posisi Penelitian	14
BAB III LANDASAN TEORI	16
3.1 Perkerasan Lentur	16
3.1.1 Lapis Permukaan (<i>Surface Course</i>)	17
	vi

3.1.2	Lapis Pondasi Atas (<i>Base Course</i>)	18
3.1.3	Lapis Pondasi Bawah (<i>Subbase Course</i>)	18
3.1.4	Tanah Dasar (<i>Subgrade</i>)	19
3.2	Beban Lalu Lintas	21
3.2.1	Prosedur Desain	21
3.2.2	Lalu Lintas Harian (LHR)	24
3.3	Tegangan dan Regangan Perkerasan Lentur	25
3.3.1	Konsep Sistem Lapisan	25
3.3.2	Pemodelan Lapis Perkerasan Jalan	27
3.4	Karakteristik Material	31
3.4.1	Layer Viskoelastis	31
3.4.2	Layer Non-Linear Elastis	32
3.4.3	Layer Linear Elastis	32
3.5	Metode Analisa Komponen Bina Marga	32
3.5.1	Umur Rencana	33
3.5.2	Lalu Lintas	34
3.5.3	Faktor Lajur	36
3.5.4	Perkiraan Faktor Ekuivalen Beban (<i>Vehicle Damage Factor</i>)	37
3.5.5	Modulus Bahan	41
3.5.6	Beban Lalu Lintas	42
3.5.7	Desain Perkerasan	43
3.6	Metode <i>Kenpave</i>	48
3.6.1	Menu Program <i>Kenpave</i>	48
3.6.2	Program <i>Kenlayer</i>	50
3.7	Analisis Kerusakan Perkerasan	57
3.7.1	<i>Fatigue Cracking</i>	57
3.7.2	<i>Rutting</i>	58
3.7.3	<i>Permanent Deformation</i>	59
BAB IV METODE PENELITIAN		60
4.1	Metode Penelitian	60
4.2	Pengumpulan Data	60

4.3 Lokasi Studi Kasus	61
4.4 Prosedur Perancangan	62
4.4.1 Tahapan Penelitian	62
4.4.2 Prosedur Desain Perkerasan Jalan Lentur No 02/M/BM/2013	64
4.4.3 Prosedur Metode <i>Kenpave</i>	66
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	68
5.1 Data Penelitian	68
5.1.1 Data Lalu Lintas	68
5.1.2 Data Nilai <i>CBR</i>	69
5.1.3 Data Tebal Perkerasan Eksisting	69
5.2 Desain Perkerasan Lentur	69
5.2.1 Desain Perkerasan Eksisting	69
5.2.2 Desain Perkerasan Alternatif	81
5.3 Pembahasan	97
5.3.1 Desain Sturuktur Perkerasan Eksisting Dan Alternatif Struktur Berdasarkan Data Sekunder dengan Menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M.BM/2017	97
5.3.2 Nilai Tegangan dan Regangan dengan Menggunakan Metode Mekanistik Empiris Dibantu dengan Program <i>Kenpave-Kenlayer</i>	89
5.3.3 Perbandingan Perkiraan Umur Masa Layanan Struktur Perkerasan Eksisting Dan Struktur Perkerasan Alternatif Menggunakan Bina Marga 2017	101
5.3.4 Perbandingan Metode Bina Marga 2017 dan Metode Mekanistik-Empiris (Program <i>Kenpave</i>)	102
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	109
6.1 Kesimpulan	109
6.2 Saran	112

DAFTAR PUSTAKA	113
LAMPIRAN	115

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penelitian Terdahulu	14
Tabel 3.1	Kecepatan Rencana Berdasarkan Tipe dan Kelas Jalan	24
Tabel 3.2	Nilai Elastisitas Tipikal	28
Tabel 3.3	Nilai <i>Poisson's Ratio</i>	29
Tabel 3.4	Analisa Struktur Perkerasan	31
Tabel 3.5	Umur Rencana Perkerasan Jalan Baru (UR)	34
Tabel 3.6	Faktor Pertumbuhan Lalulintas (i)	36
Tabel 3.7	Faktor Distribusi Lajur	37
Tabel 3.8	Nilai <i>VDF</i> Standar	39
Tabel 3.9	Nilai <i>VDF</i> Masing – Masing Jenis Kendaraan Niaga	40
Tabel 3.10	Karakteristik Modulus Bahan Berpengikat	41
Tabel 3.11	Karakteristik Modulus Bahan Berbutir Lepas	41
Tabel 3.12	Ketentuan Pertimbangan Jenis Desain Perkerasan	44
Tabel 3.13	Desain Perkerasan Lentur-Aspal dengan Lapis Pondasi Berbutir	46
Tabel 3.14	Penyesuaian Tebal Lapis Pondasi Agregat A untuk Tanah Dasar $CBR \geq 7\%$	47
Tabel 5.1	Perhitungan Lalu Lintas Ruas Jalan Yogyakarta-Piyungan	68
Tabel 5.2	Rekapitulasi Parameter Tiap Lapis Perkerasan	70
Tabel 5.3	<i>Input General</i>	71
Tabel 5.4	<i>Input Zcoord</i>	73
Tabel 5.5	<i>Input Parameter Layer</i>	73
Tabel 5.6	<i>Input Moduli</i>	74
Tabel 5.7	<i>Input NPT</i>	75
Tabel 5.8	<i>Time Durations for Creep Compliances</i>	76

Tabel 5.9	Nilai <i>Creep Compliances</i>	77
Tabel 5.10	Hasil Perhitungan <i>Kenlayer</i>	78
Tabel 5.11	Rekapitulasi Hasil dari Perhitungan <i>Kenlayer</i>	79
Tabel 5.12	Rekapitulasi Nilai <i>VDF₄</i> dan <i>VDF₅</i>	84
Tabel 5.13	Prediksi Jumlah Kendaraan Selama Umur Perkerasan	84
Tabel 5.14	Rekapitulasi Parameter Tiap Lapis Perkerasan	86
Tabel 5.15	<i>Input General</i>	87
Tabel 5.16	<i>Input Zcoord</i>	89
Tabel 5.17	<i>Input Parameter Layer</i>	89
Tabel 5.18	<i>Input Moduli</i>	90
Tabel 5.19	<i>Input NPT</i>	91
Tabel 5.20	<i>Time Durations for Creep Compliances</i>	91
Tabel 5.21	Nilai <i>Creep Compliances</i>	92
Tabel 5.22	Hasil Perhitungan <i>Kenlayer</i>	93
Tabel 5.23	Rekapitulasi Hasil dari Perhitungan <i>Kenlayer</i>	95
Tabel 6.1	Perbandingan Metode Bina Marga 2017 dan Metode <i>Kenpave</i>	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Keadaan Ruas Legundi-Kanigoro-Planjan Km 0+000	2
Gambar 1.2	Keadaan Ruas Legundi-Kanigoro-Planjan Km 2+950	2
Gambar 2.1	Komponen Perkerasan Lentur	7
Gambar 2.2	Komponen Perkerasan Kaku	7
Gambar 2.3	Komponen Perkerasan Komposit	8
Gambar 2.4	Konsep Desain Perkerasan Pertama Mekanistik Empiris	10
Gambar 2.5	Retak Lelah (<i>Fatigue Cracking</i>)	11
Gambar 2.6	Retak Alur (<i>Rutting</i>)	12
Gambar 2.7	Deformasi Permanen (<i>Permanent Deformation</i>)	13
Gambar 3.1	Penyebaran beban pada perkerasan lentur	16
Gambar 3.2	Jenis Tanah Dasar Ditinjau dari Muka Tanah Asli	20
Gambar 3.3	Konfigurasi roda pada tipikal kendaraan semi trailer	22
Gambar 3.4	Sumbu Standar Ekuivalen Indonesia	22
Gambar 3.5	<i>Multi Layered Elastic System</i>	26
Gambar 3.6	Modulus Elastisitas	28
Gambar 3.7	Lokasi Analisa Struktur Perkerasan	31
Gambar 3.8	Tampilan Awal <i>Kenpave</i>	48
Gambar 3.9	Tampilan Layar <i>LAYERINP</i>	51
Gambar 3.10	Tampilan Layar <i>General</i>	52
Gambar 3.11	Tampilan Layar <i>Zcoord</i>	53
Gambar 3.12	Tampilan Layar <i>Layer</i>	54
Gambar 3.13	Tampilan Layar <i>Interface</i>	54
Gambar 3.14	Tampilan Layar <i>Moduli</i>	55
Gambar 3.15	Tampilan Layar <i>Moduli for Period</i>	55

Gambar 3.16	Tampilan Layar <i>Load</i>	56
Gambar 4.1	Peta Lokasi Objek Penelitian	62
Gambar 4.2	Bagan Alir Tahapan Penelitian	63
Gambar 4.3	Bagan Alir Desain Perkerasan Jalan Lentur No 04/SE/Db/2017	65
Gambar 4.4	Bagan Alir Program <i>Kenpave</i>	67
Gambar 5.1	Tampilan Awal <i>Layerinp</i>	71
Gambar 5.2	Letak Titik Tinjauan	73
Gambar 5.3	<i>Plan View Multiple Wheels</i>	75
Gambar 5.4	Tampilan Awal <i>Layerinp</i>	87
Gambar 5.5	Letak Titik Tinjauan Kerusakan	88
Gambar 5.6	Letak Titik Tinjauan Kerusakan	99
Gambar 5.7	Letak Titik Tinjauan Kerusakan	100
Gambar 5.8	Prosedur Desain Perkerasan Jalan Lentur Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017	107
Gambar 5.9	Prosedur Desain Menggunakan Program <i>Kenpave</i>	108
Gambar 6.1	Tebal Perkerasan yang Diperoleh	110

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Jadwal Penyusunan Tugas Akhir	116
Lampiran 2	Data Lalu Lintas Harian Rata-rata	117
Lampiran 3	Data <i>CBR</i>	118
Lampiran 4	Tebal Eksisting	119

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

a	= tekanan ban (kPa)
Ac	= kontak area (mm ²)
AC-WC	= <i>Asphalt Concrete-Wearing Course</i>
AC-BC	= <i>Asphalt Concrete-Binder Course</i>
Ai, Bi	= titik-titik pada lapis yang ditinjau
CBR	= <i>California Bearing Ratio</i>
CESA	= <i>Cumulative Equivalent Standard Axle</i>
CP	= <i>Contact Pressure on Circular Loaded Area</i>
CR	= <i>Contact Radius of Circular Loaded Area</i>
CTB	= <i>Cement Treated Base</i>
d	= lendutan (mm)
DD	= faktor distribusi arah
DL	= faktor distribusi lajur
E*	= modulus dinamis dari campuran beton aspal
E	= angka ekivalen
E	= modulus elastisitas
EALF	= <i>Equivalent Axle Load Factor</i>
ESA	= lintasan sumbu standar ekivalen (<i>Equivalent Standard Axle</i>)
ESAL	= <i>Equivalent Single Axle Load</i>
f ₄ , f ₅	= koefisien kriteria deformasi permanen
hn	= kedalaman masing-masing lapisan
HRS	= <i>Hot Rolled Sheet</i>
i	= Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas
LHR	= Lalu lintas Harian Rata-rata
LHRT	= Lalu lintas Harian Rata-rata Tahunan

LMC	= <i>Lean Mix Concrete</i>
LPA	= Lapis Pondasi Atas
LPB	= Lapis Pondasi Bawah
MEPDG	= <i>Mechanistic Empirical Pavement Design Guide</i>
MKJI	= Manual Kapasitas Jalan Indonesia
MR	= Modulus Resilient
MST	= Modulus Sumbu Terberat
Nd	= Jumlah repetisi beban gandar standar yang memicu terjadinya kerusakan <i>permanent deformation</i>
Nd	= Jumlah repetisi beban gandar standar yang memicu terjadinya kerusakan <i>rutting</i>
Nf	= Jumlah repetisi beban gandar standar yang memicu terjadinya kerusakan <i>fatigue cracking</i>
P	= beban terpusat
Pd	= beban satu roda (kN)
PI	= <i>Plasticity Index</i>
Q	= tekanan kontak roda (kPa)
R	= faktor pengali pertumbuhan lalu lintas
r	= jari-jari
Sd	= jarak antara 2 roda
UR	= Umur Rencana
VDF	= angka ekivalen kendaraan tertentu (<i>vehicle damage factor</i>)
WIM	= <i>Weight in Motion</i>
XW	= <i>Center to center spacing between two axles along the X</i>
YW	= <i>Center to center spacing between two dual wheels along the Y axis</i>
ϵ	= regangan
ϵ_c	= regangan tekan vertikal diatas lapisan dasar
ϵ_t	= regangan tarik horizontal di bagian bawah aspal
μ	= <i>Poisson's Ratio</i>
σ	= tegangan (N/m ²) atau Pascal (Pa)

τ = tegangan geser

ABSTRAK

Sarana transportasi berupa jalan raya merupakan kebutuhan pokok dan tidak dapat dipisahkan dari perkembangan keseharian aktivitas manusia. Terciptanya sistem transportasi yang baik, maka kegiatan masyarakat dapat berjalan dengan lancar, sehingga dapat memenuhi tuntutan efisiensi waktu dan tenaga. Namun dengan tingginya kegiatan masyarakat dewasa ini secara tidak langsung berimbas pada naiknya angka kepemilikan kendaraan yang berbanding lurus dengan meningkatnya volume kendaraan di jalan. Disini pemerintah memiliki banyak upaya untuk mengurai kepadatan, salah satunya yakni membuat jalan alternatif lain agar kendaraan tidak menumpuk pada satu ruas jalan yang sama. Jalan alternatif tersebut dapat berupa pembangunan jalan baru. Penelitian ini dimaksudkan untuk mendesain ulang kebutuhan struktur perkerasan pada ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan dan memperkirakan kerusakan apa yang akan terjadi terlebih dahulu.

Adapun untuk mendesain kebutuhan struktur perkerasan menggunakan metode empiris yaitu Bina Marga 2017, sedangkan untuk prediksi penurunan pelayanan jalan akibat penambahan beban menggunakan metode mekanistik-empiris dibantu dengan program *Kenpave*. Setelah didapatkan kondisi perkerasan dan beban lalu lintas maka dapat dibandingkan hasil keduanya.

Respon tegangan dan regangan maksimum penyebab terjadinya *permanent deformation* terjadi di titik kritis pada permukaan tanah dasar (*subgrade*), sehingga dilakukan perhitungan beban gandar 8.000 kg dengan hasil sebesar 139.684.993 Esal dan dapat diperoleh umur perkerasan sebesar 28 tahun dimana angka tersebut melampaui angka umur rencana yang direncanakan pada Bina Marga 2017 yaitu 20 tahun. Simulasi tersebut menunjukkan bahwa perkerasan lentur yang dirancang dapat dengan baik mengakomodasi beban lalu lintas yang melewatinya berdasarkan data sekunder dan sesuai dengan umur rencana ditandai dengan jumlah repetisi yang melewati perkerasan kurang dari kontrol kerusakan yang telah diperkirakan oleh program *Kenlayer*.

Kata Kunci : Mekanistik-Empiris, kerusakan jalan, Program *Kenpave*, Bina Marga 2017

ABSTRACT

Highway is a basic needs and can't be separated from the daily development of human activities. A good transportation system can makes the community activities run smoothly, so the demands of time and energy can be optimally fulfilled. However, the high activity of the society today is indirectly impact on the rise of vehicle ownership and it figures the increased volume of vehicles on the road. Build an alternative like the construction of a new road, is become one of the government's way to break down the traffic. This research is intended to redesign the need for pavement structures on Legundi-Kanigoro-Planjan road and estimate which damage will come first.

Bina Marga 2017 has become one of the empirical method to design the need of pavement structure, while Kenpave program as one of the empirical-mechanistic method to predict the decrease of road service. Then, the result of both methods can be compared.

The maximum of stress and strain response on the cause of permanent deformation occurs at the critical point on the subgrade surface. So the calculation of axle load 8000 kg with the result of 139.684.993 Esal, can be obtained the pavement age of 28 years where the figure exceeds the planned age at Bina Marga 2017, which 20 years only. The simulation shows that the designed of flexible pavement can well accommodate the traffic load through which it is based on secondary data and compatible to the age of the plan. It is shown by the number of reps passing through the pavement less than the damage control predicted by the Kenlayer program.

Keywords : *Empirical-Mechanistics, road damage, Kenpave Program, Bina Marga 2017*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keseharian aktivitas manusia dewasa ini semakin meningkat. Di kota-kota besar, perkembangan tersebut relatif tinggi. Dengan adanya perkembangan yang pesat tersebut, tuntutan akan efisiensi dalam segala kegiatan juga akan semakin tinggi, termasuk dalam hal sarana dan prasarana transportasi. Sarana dan prasarana transportasi berperan sangat penting dalam mendistribusikan barang dan jasa termasuk mobilitas manusia. Salah satu prasarana transportasi yang sangat penting dikembangkan adalah jalan. Prasarana transportasi berupa jalan raya merupakan kebutuhan pokok dan tidak dapat dipisahkan dari perkembangan keseharian aktivitas manusia. Terciptanya sistem transportasi yang baik, maka kegiatan masyarakat dapat berjalan dengan lancar, sehingga dapat memenuhi tuntutan efisiensi waktu dan tenaga.

Selain itu, kendaraan bermotor juga menjadi salah satu sarana yang berkaitan untuk menunjang dan memperlancar segala aktivitas manusia. Namun dengan begitu kebutuhan akan kendaraan bermotor ini akan berakibat pada naiknya angka kepemilikan kendaraan yang berbanding lurus dengan meningkatnya volume kendaraan di jalan. Volume kendaraan yang tinggi pun akan berimbas pada kepadatan jalan yang tinggi dimana hal itu dapat menjadi masalah yang seringkali menghambat pergerakan masyarakat. Disini pemerintah memiliki banyak upaya untuk mengurai kepadatan, salah satunya yakni membuat jalan alternatif lain agar kendaraan tidak menumpuk pada satu ruas jalan yang sama. Jalan alternatif tersebut dapat berupa pembangunan jalan baru ataupun dengan peningkatan status jalan.

Salah satu ruas jalan yang menjadi jalan alternatif tersebut adalah ruas jalan Legundi-Kanigoro-Planjan, Dusun Triwono, Kabupaten Gunung Kidul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan merupakan jalan baru yang berstatus sebagai jalan nasional dengan lebar jalan yaitu 7 m.

Adapun panjang penanganan ruas ini adalah 3,14 km, yakni dari km 28+100 hingga km 31+240. Ruas jalan tersebut diharapkan dapat mengurangi kepadatan kendaraan yang terjadi di Jalur Pantura, terutama saat menjelang Hari Raya Idul Fitri. Berikut ini adalah Gambar 1.1 dan Gambar 1.2 yang merupakan keadaan Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan pada saat selesai dibangun pada tahun 2014.



Gambar 1.1 Keadaan Ruas Legundi-Kanigoro-Planjan Km 0+000

(Sumber : Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I. Yogyakarta, 2014)



Gambar 1.2 Keadaan Ruas Legundi-Kanigoro-Planjan Km 2+950

(Sumber : Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I. Yogyakarta, 2014)

Adapun persyaratan dasar suatu perkerasan jalan pada hakekatnya adalah dapat menyediakan lapisan permukaan yang selalu rata, daya dukung yang kuat, sehingga dapat menjamin kenyamanan dan keamanan yang tinggi untuk masa pelayanan (umur rencana) yang cukup lama. Oleh karena itu, dibutuhkan adanya perencanaan perkerasan jalan dengan melakukan kajian dan penelitian tentang perkerasan jalan yang baik. Pada umumnya lapisan perkerasan direncanakan untuk mampu memikul beban lalu lintas yang sudah ditentukan selama jangka waktu tertentu (umur rencana). Apabila kendaraan yang lewat mengangkut beban yang lebih (*over load*), maka perkerasan jalan akan rusak sebelum umurnya tercapai. Hal ini mengakibatkan kerugian yang besar untuk memperbaikinya, maka dari itu perlu adanya kajian ulang perencanaan perkerasan jalan untuk mengetahui apakah desain yang digunakan telah sesuai agar dapat melayani transportasi sesuai kebutuhannya.

Banyak metode yang bisa digunakan untuk mengkaji perencanaan perkerasan jalan ini, diantaranya yakni metode empiris dan metode mekanistik-empiris. Pendekatan empirik dikembangkan berdasarkan pengalaman penelitian dari jalan-jalan yang dibuat khusus untuk penelitian atau dari jalan yang sudah ada dengan menggunakan menggunakan persamaan, tabel, dan gambar untuk menilai performa perkerasan lentur. Sedangkan itu, metode mekanistik-empirik adalah metode yang didasarkan pada kaidah teoritis dan karakteristik material, dilengkapi dengan perhitungan secara eksak terhadap respons struktur perkerasan terhadap beban sumbu kendaraan. Prinsip utama metode mekanistik untuk perkerasan lentur yaitu dengan mengasumsikan perkerasan jalan menjadi suatu struktur "*multi-layer (elastic) structure*". Tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan lendutan (*deflection*) adalah respon dari material perkerasan yang mengalami pembebanan. Perhitungan dari respon tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan lendutan (*deflection*) pun terbilang kompleks dan membutuhkan ketelitian sangat tinggi, sehingga akan rumit dilakukan dengan cara manual. Maka dari itu diperlukan perhitungan dengan menggunakan bantuan komputer untuk mempermudahnya. Keuntungan dari metode mekanistik-empirik adalah peningkatan keandalan desain, kemampuan untuk memprediksi jenis kerusakan dan kelayakan untuk ekstrapolasi dari data lapangan dan laboratorium yang terbatas.

Berdasarkan uraian di atas, pada tugas akhir ini dilakukan komparasi hasil perencanaan tebal perkerasan jalan baru dengan metode empirik dan mekanistik-empirik. Metode empirik menggunakan metode Bina Marga 2017 dengan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 dan metode mekanistik-empirik menggunakan program *Kenpave*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana desain struktur perkerasan eksisting dan alternatif pada Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan menurut metode empiris?
2. Pada jumlah repetisi beban gandar standar berapa saja alternatif struktur perkerasan eksisting dan alternatif yang diusulkan tersebut akan mengalami kerusakan retak leleh, alur, ataupun deformasi permanen menurut metode mekanistik-empiris?
3. Bagaimana perbandingan perkiraan umur masa layanan alternatif struktur perkerasan eksisting dan alternatif menurut tinjauan metode empiris dan mekanistik-empiris?
4. Bagaimana perbandingan perbedaan konsep, parameter desain, dan prosedur desain antara metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik-empirik dengan program *Kenpave*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui desain struktur perkerasan eksisting dan alternatif pada Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan menurut metode empiris.
2. Memperkirakan jumlah repetisi beban gandar standar alternatif struktur perkerasan eksisting dan alternatif yang diusulkan akan mengalami kerusakan retak leleh, alur, ataupun deformasi permanen menurut metode mekanistik-empiris.

3. Mengetahui perbandingan perkiraan umur masa layanan alternatif struktur perkerasan eksisting dan alternatif menurut tinjauan metode empiris dan mekanistik-empiris.
4. Mengetahui perbandingan perbedaan konsep, parameter desain, dan prosedur desain antara metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik-empirik dengan program *Kenpave*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui tingkat kelayakan dari kondisi Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan.
2. Mengantisipasi terjadinya kerusakan yang berkelanjutan.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini mengacu pada batasan penelitian sebagai berikut.

1. Lokasi yang ditinjau adalah Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan.
2. Identifikasi tebal perkerasan dengan menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017.
3. Perhitungan respon tegangan dan regangan menggunakan program *Kenpave*.
4. Data yang digunakan dalam analisis menggunakan data yang diperoleh dari Kantor Satuan Kerja Pelaksanaan Jalan Nasional DIY dan tidak melakukan pengukuran di lapangan.
5. Parameter yang tidak diketahui (yang tidak sesuai dengan keadaan geografis di Indonesia) menggunakan simplifikasi dengan memperhatikan kondisi di negara acuan dan di Indonesia.
6. Prediksi kerusakan struktural perkerasan lentur hanya *fatigue cracking*, *deformation* dan *rutting*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

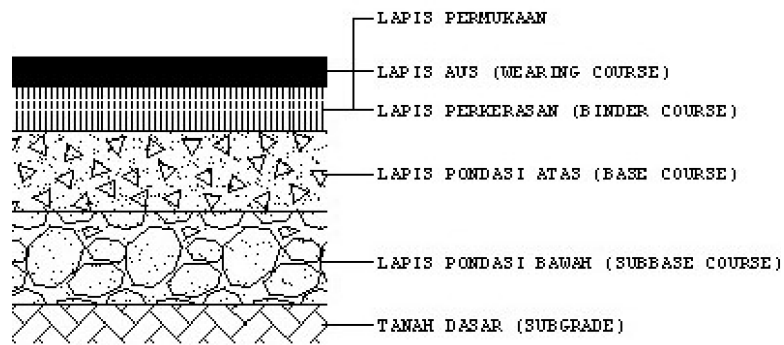
2.1 Perkerasan Jalan Raya

Perkerasan jalan raya adalah bagian jalan raya yang diperkeras dengan lapis konstruksi tertentu, yang memiliki ketebalan, kekuatan, dan kekakuan, serta kestabilan tertentu agar mampu menyalurkan beban lalu lintas di atasnya ke tanah dasar secara aman. Agar perkerasan jalan yang sesuai dengan mutu yang diharapkan, maka pengetahuan tentang sifat, pengadaan dan pengolahan dari bahan penyusun perkerasan jalan sangat diperlukan (Sukirman, 1999).

Secara sederhana dapat dikatakan bahwa fungsi perkerasan jalan adalah menyediakan dan memberikan pelayanan kepada lalu lintas yang lewat di atasnya sedemikian rupa sehingga lalu lintas dapat bergerak dengan aman, cepat, dan nyaman sesuai tuntutan dan klasifikasi lalu lintas yang ada (Aly, 2000)

Konstruksi perkerasan terdiri dari beberapa jenis sesuai dengan bahan ikat yang digunakan serta komposisi dari komponen. Menurut Sukirman (1999), berdasarkan bahan pengikatnya konstruksi perkerasan jalan terbagi menjadi sebagai berikut.

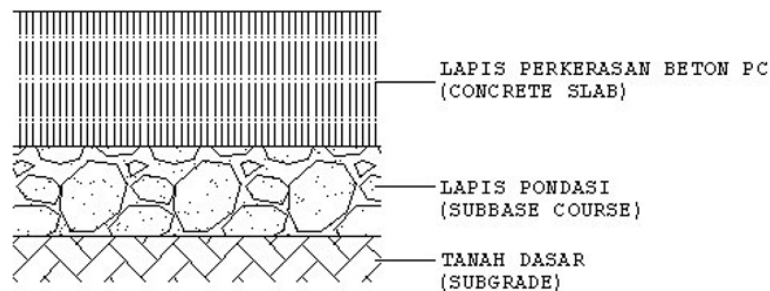
- 1 Konstruksi perkerasan lentur (*flexible pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan-lapisan perkerasannya bersifat memikul dan menyebarkan beban lalu lintas ke tanah dasar seperti pada Gambar 2.1. Umumnya akibat dari pengaruh repetisi beban yakni timbul *rutting* atau lendutan pada jalur roda. Sedangkan pengaruh terhadap penurunan tanah dasar yaitu jalan bergelombang atau mengikuti tanah dasar,



Gambar 2.1 Komponen Perkerasan Lentur

(Sumber: Sukirman, 1999)

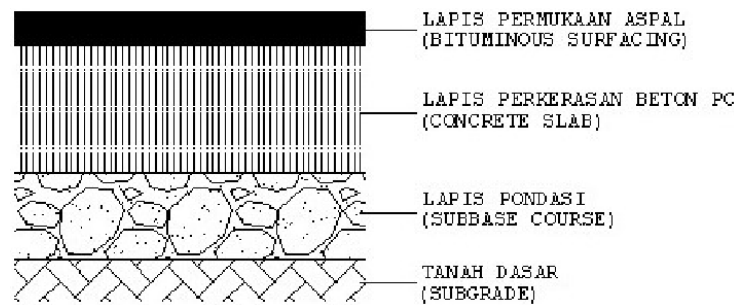
2. Konstruksi perkerasan kaku (*rigid pavement*), yaitu perkerasan yang menggunakan semen (*portland cement*) sebagai pengikatnya seperti pada Gambar 2.2. Lapis utamanya bersifat memikul sebagian besar beban lalu lintas. Umumnya akibat dari repetisi beban adalah timbulnya retak-retak pada permukaan jalan, dan



Gambar 2.2 Komponen Perkerasan Kaku

(Sumber: Sukirman, 1999)

3. Konstruksi perkerasan komposit (*composite pavement*), yaitu perkerasan kaku yang dikombinasikan dengan perkerasan lentur dapat berupa perkerasan lentur di atas perkerasan kaku, atau sebaliknya dan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Komponen Perkerasan Komposit

(sumber: Sukirman, 1999)

2.2 Perencanaan Tebal Lapis Perkerasan Jalan

Simanjuntak (2014), menyatakan bahwa konstruksi lapisan lentur terdiri dari lapisan-lapisan, dimana lapisan tersebut berfungsi untuk menerima beban lalu lintas dan menyebarkannya ke lapisan di bawahnya. Sifat penyebaran gaya yang diterima setiap lapisan berbeda-beda dimana semakin ke bawah akan semakin kecil. Hasil rancangan teknologi lapisan campuran aspal yang pertama kali diimplementasikan adalah aspal makadam. Teknologi desain struktur perkerasan juga mengalami berbagai kemajuan. Kemajuan yang telah dicapai dalam memodelkan perilaku bahan dan struktur perkerasan yang ditunjang dengan kemajuan teknologi komputer, maka desain analisis struktur yaitu tegangan regangan dan lendutan mulai banyak digunakan. Dalam teknik perkerasan telah dikemukakan beberapa metode dalam desain perkerasan secara teori, pengalaman atau percobaan maupun penggabungan dari keduanya. Jadi, secara umum ada tiga metode dalam perencanaan perkerasan lentur, yaitu:

1 metode empiris

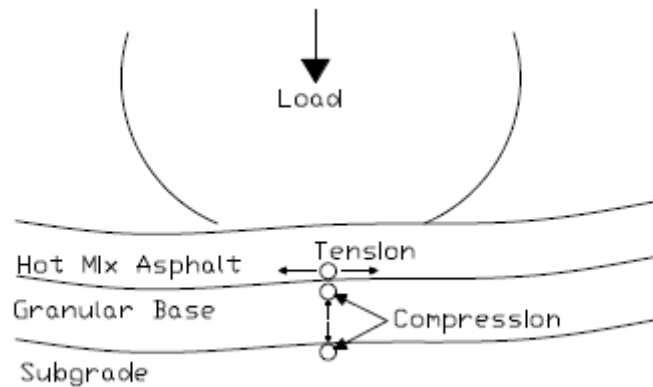
Pendekatan perencanaan secara empiris adalah perencanaan yang berdasarkan percobaan atau pengalaman. Pengamatan digunakan untuk membuktikan hubungan antara data masukan dan hasilnya dari sebuah proses misalnya perencanaan perkerasan dan kinerjanya. Pendekatan secara empiris sering digunakan sebagai jalan keluar ketika sangat sulit untuk menetapkan secara teori hubungan yang tepat sebab akibat dari sebuah

kejadian. Terdapat banyak metode empiris yang telah dikembangkan oleh berbagai negara seperti *NAASRA* Australia, *AASHTO* Amerika Serikat, Metode *Road Note 29* dan *31* Inggris, dan juga Bina Marga yang berasal dari Indonesia.

2 metode mekanistik-empiris

Metode desain mekanistik-empiris didasarkan pada mekanika bahan yang berhubungan dengan data yang diperlukan seperti beban roda, respon perkerasan seperti tegangan dan regangan. Nilai respon ini digunakan untuk memprediksi tekanan dari tes laboratorium dan data kinerja lapangan. Penggunaan regangan tekan vertikal untuk mengontrol deformasi permanen didasarkan pada fakta bahwa regangan plastis sebanding dengan regangan elastis pada bahan perkerasan. Dengan demikian, dengan membatasi regangan elastis pada tanah dasar, regangan elastis pada bahan di atas tanah dasar juga dapat di kontrol atau dikendalikan, maka besarnya deformasi permanen pada permukaan juga pada akhirnya dapat dikontrol.

Kerkhoven dan Dormon (Huang, 2004), pertama kali menyarankan penggunaan regangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar sebagai kriteria kegagalan untuk mengurangi deformasi permanen. Saal dan Pell (1960) merekomendasikan penggunaan regangan tarik horisontal di bawah lapisan aspal untuk meminimalkan kelelahan retak, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Penggunaan konsep untuk desain perkerasan pertama kali disajikan di Amerika Serikat oleh Dormon dan Metcalf (Huang, 2004).



Gambar 2.4 Konsep Desain Perkerasan Pertama Mekanistik Empiris

(Sumber: Huang, 2004)

Salah satu pendekatan mekanistik-empiris adalah metode *Kenpave* dan sub program *Kenlayer*. Sub program *Kenlayer* menggunakan konsep *multi-layered system* dimana setiap lapisan perkerasan memiliki sifat, bahan, dan tebal masing-masing. Maka dari itu program akan meminta input data berupa sifat karakteristik dari perkerasan seperti tebal lapisan perkerasan, modulus elastisitas, dan *poisson ratio*.

2.3 Kegagalan Perkerasan Lentur

Salah satu pertimbangan penting dalam mendesain perkerasan adalah mengetahui perkiraan kerusakan yang akan terjadi nantinya. Dalam metode mekanistik empiris, setiap kriteria kegagalan harus dikembangkan secara terpisah untuk menangani setiap tekanan tertentu. Selain itu, evaluasi kerusakan perkerasan merupakan bagian penting dari *pavement management system* dimana strategi yang paling efektif untuk pemeliharaan dan rehabilitasi dapat dikembangkan (Huang, 2004).

Adapun kegagalan perkerasan lentur yang mungkin terjadi adalah :

1. *fatigue cracking*

Retak adalah suatu gejala kerusakan/pecahnya permukaan perkerasan sehingga akan menyebabkan air pada permukaan perkerasan masuk ke lapisan dibawahnya dan hal ini merupakan salah satu faktor yang

akan membuat luas/parah suatu kerusakan (Departemen Pekerjaan Umum, 2007). Di dalam pendekatan mekanika retak diasumsikan ada bagian yang lemah pada setiap material. Ketika pembebanan terjadi, ada konsentrasi tegangan yang lebih tinggi di sekitar bagian tersebut, sehingga material tersebut tidak lagi memiliki distribusi tegangan yang seragam dan terjadilah kerusakan/retak pada bagian tersebut dan berkembang ke bagian yang lainnya. Mekanika retak juga menggambarkan perkembangan retak tergantung pada sifat material tersebut.

Retak struktural yang disebut juga sebagai retak lelah (*fatigue cracking*) adalah serangkaian retak memanjang dan saling berhubungan pada permukaan jalan yang disebabkan oleh pembebanan yang berulang dari roda kendaraan. Jenis retak ini umumnya dimulai sebagai retak longitudinal pendek di jalan dan berkembang menjadi retak berpola kulit buaya (retak saling berhubungan). Jenis retak ini terjadi karena aksi lentur yang berulang pada perkerasan saat beban diberikan. Hal ini menghasilkan tegangan tarik yang akhirnya membuat retak pada bagian bawah aspal. Retak secara bertahap merambat ke bagian atas lapisan dan kemudian berkembang dan saling berhubungan. Jenis kerusakan ini akhirnya akan menyebabkan hilangnya integritas struktural dari sistem perkerasan. Kerusakan *fatigue cracking* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Retak Lelah (*Fatigue Cracking*)

(Sumber: *Pavement Interactive*, 2008)

2. *rutting*

Alur adalah deformasi permukaan perkerasan aspal dalam bentuk turunnya perkerasan ke arah memanjang pada lintasan roda kendaraan seperti pada Gambar 2.6. Faktor penyebab kerusakannya, yaitu :

- a. pemadatan lapis permukaan dan pondasi (*base*) kurang, sehingga akibat beban lalu lintas lapis pondasi memadat lagi,
- b. kualitas campuran aspal rendah, ditandai dengan gerakan arah lateral dan ke bawah dari campuran aspal di bawah beban roda berat,
- c. gerakan lateral dari satu atau lebih dari komponen pembentuk lapis perkerasan yang kurang padat. Contohnya terjadinya alur pada lintasan roda yang disebabkan oleh deformasi dalam lapis pondasi atau tanah, dan
- d. tanah dasar lemah atau agregat pondasi kurang tebal, pemadatan kurang, atau terjadi pelemahan akibat infiltrasi air tanah.

Cara perbaikannya adalah jika penyebabnya adalah lemahnya lapis pondasi atau tanah dasar, maka pembangunan kembali perkerasan secara total mungkin diperlukan, termasuk juga penambahan drainase, terutama jika air menjadi salah satu faktor penyebab utamanya.



Gambar 2.6 Retak Alur (*Rutting*)

(Sumber : *Pavement Interactive*, 2008)

3. *permanent deformation*

Deformasi merupakan kerusakan penting dari kondisi perkerasan yang merupakan perubahan permukaan jalan dari profil aslinya (sesudah pembangunan), karena mempengaruhi kualitas kenyamanan lalu lintas (kekasaran, genangan air yang mengurangi kekesatan permukaan) dan dapat mencerminkan kerusakan struktur perkerasan (Hardiyatmo, 2015).

Adapun penyebab deformasi pada perkerasan adalah :

- a. beban lalu lintas,
- b. pengaruh lingkungan, atau pengaruh lain, misalnya tanah pondasi mudah mengembang, mudah membeku atau penurunan tanah pondasi yang berlebihan, dan
- c. pemadatan yang kurang sempurna pada lapis perkerasan.

Perbaikan deformasi permanen adalah dengan cara menentukan akar permasalahan dari kerusakan (penurunan pada tanah dasar atau akibat tekanan air). Deformasi dapat diatasi dengan membuang perkerasan yang rusak kemudian digali dan diganti area yang tanah dasarnya buruk dengan cara menambalnya. Untuk kerusakan deformasi permanen dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Deformasi Permanen (*Permanent Deformation*)

(Sumber : *Pavement Interactive*, 2008)

2.4 Posisi Penelitian

Dari kumpulan – kumpulan penelitian yang terdahulu yang telah diuraikan, jika dibandingkan dengan penelitian yang akan dilakukan memiliki beberapa persamaan dan juga memiliki beberapa perbedaan. Rangkuman penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1	Putri (2014)	Prediksi Nilai Kerusakan Perkerasan Lentur Dengan Metode Mekanistik-Empirik (Studi Kasus : Rekonstruksi Jl. Arteri Selatan)	Metode Mekanistik Empiris dengan <i>software Kenpave</i>	Berdasarkan <i>AASHTO</i> 2006, umur rencana perkerasan Jalan Arteri Selatan akan mengalami kerusakan <i>alligator cracking</i> dan <i>rutting</i> yang melebihi batas toleransi maksimum sebelum tahun ke-7 dari umur rencana selama 10 tahun. Sehingga sebelum tahun ke-7, perkerasan tersebut harus diperbaiki agar tidak mengalami kerusakan yang lebih parah.
2	Simanjuntak (2014)	Evaluasi Tebal Lapis Perkerasan Lentur Manual Desain Perkerasan Jalan No.22.2/KPTS/Db/2012 Dengan Menggunakan Program <i>Kenpave</i>	Metode Mekanistik Empiris dengan <i>software Kenpave</i>	Dari hasil evaluasi untuk tebal perkerasan tipe A menghasilkan jumlah repetisi beban yang lebih kecil dari jumlah repetisi beban yang direncanakan, dan untuk tebal perkerasan tipe B menghasilkan jumlah repetisi beban yang jauh lebih besar dari jumlah repetisi beban yang direncanakan.

Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
3	Wulandari (2017)	Prediksi Kebutuhan Biaya Investasi Tambahan Akibat Peningkatan Kelas Jalan Pada Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Mekanistik Empiris	Metode Mekanistik Empiris dengan <i>software Kenpave</i>	Dari hasil analisis, Jalan Jogja-Solo masih mampu menahan dengan baik beban lalu lintas sesuai dengan data sekunder. Akan tetapi akan mengalami penurunan umur pelayanan jalan ketika dibebani dengan beban gandar sebesar 10.000 kg dari beban lalu lintas, sehingga akan mengalami penurunan menjadi 9 tahun, Penambahan tebal aspal Ac-Wc sebesar 3 cm sesuai dengan asumsi <i>Kenpave</i> sehingga memenuhi pelayanan jalan pada umur 15 tahun.

Dari Tabel 2.2 di atas, dapat disimpulkan persamaan dan perbedaan penelitian ini dengan penelitian terdahulu tersebut adalah :

1. Persamaan dengan penelitian Putri (2014) yakni penelitian ini menggunakan metode mekanistik-empiris dengan program *Kenpave* dan membahas prediksi nilai kerusakan pada perkerasan lentur. Namun perbedaannya yaitu penelitian Putri (2014) tidak mengevaluasi perencanaan tebal perkerasan lentur jalan,
2. Persamaan dengan penelitian Simanjuntak (2014) adalah merencanakan tebal perkerasan lentur dengan menggunakan program *Kenpave*. Perbedaan dengan penelitian ini yakni perencanaan tebal perkerasan lentur jalan dengan metode *AASHTO* 1993, dan program *Kenpave* hanya digunakan untuk merencanakan tebal perkerasan bukan untuk mengevaluasi jalan, dan,
3. Persamaan dengan Wulandari (2017) adalah menggunakan metode mekanistik empiris dengan *software Kenpave* untuk menganalisa kerusakan jalan yang akan terjadi beserta umur layan jalannya. Namun perbedaannya yakni penelitian ini memprediksi kebutuhan nilai investasi tambahan.

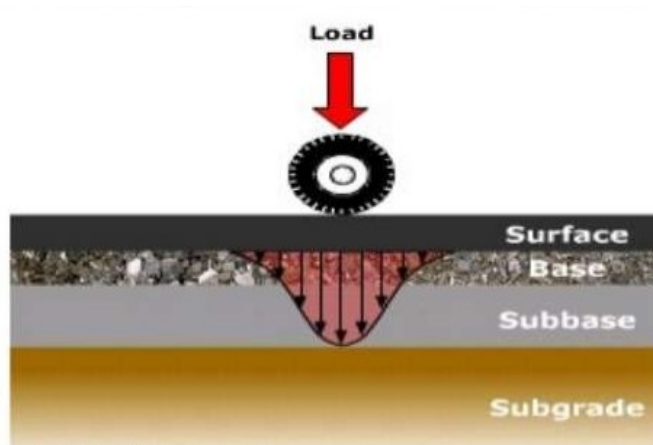
BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Perkerasan Lentur

Perkerasan lentur adalah perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Pada umumnya perkerasan lentur baik digunakan untuk jalan yang melayani beban lalu lintas ringan sampai sedang, seperti jalan perkotaan, jalan dengan system utilitas terletak di bawah perkerasan jalan, perkerasan bahu jalan, atau perkerasan dengan konstruksi bertahap (Sukirman, 1999). Berikut merupakan konstruksi perkerasan lentur tiap lapisnya.

1. Lapis Permukaan (*Surface Course*)
2. Lapis Pondasi Atas (*Base Course*)
3. Lapis Pondasi Bawah (*Subbase Course*)
4. Tanah Dasar (*Subgrade*)



Gambar 3.1 Penyebaran beban pada perkerasan lentur

(Sumber: *Pavement Interactive*, 2008)

Sifat penyebaran gaya muatan yang diterima oleh masing-masing lapisan berbeda dan semakin ke bawah semakin kecil. Seperti yang terlihat pada Gambar

3.1, lapisan permukaan harus mampu menerima seluruh jenis gaya yang bekerja lalu lapis pondasi atas menerima gaya vertikal dan getaran, sedangkan tanah dasar dianggap hanya menerima gaya vertikal saja dan mampu menopang beban diterima dengan daya dukung yang dimilikinya. Oleh karena itu terdapat perbedaan syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh masing-masing lapisan.

3.1.1 Lapis Permukaan (*Surface Course*)

Lapisan yang terletak paling atas disebut lapis permukaan dan memiliki fungsi sebagai berikut.

1. Lapis perkerasan penahan beban roda, lapisan mempunyai stabilitas tinggi untuk menahan beban roda selama masa pelayanan.
2. Lapis kedap air, sehingga air hujan yang jatuh di atasnya tidak meresap ke lapisan di bawahnya dan melemahkan lapisan-lapisan tersebut.
3. Lapis aus (*wearing course*), lapisan yang langsung menerima gesekan akibat rem kendaraan sehingga mudah menjadi aus.
4. Lapis yang menyebarkan beban ke lapisan bawah, sehingga dapat dipikul oleh lapisan lain yang mempunyai daya dukung yang lebih lemah.

Guna dapat memenuhi fungsi diatas, pada umumnya lapisan permukaan dibuat dengan menggunakan bahan pengikat aspal sehingga menghasilkan lapisan yang kedap air dengan stabilitas yang tinggi dan daya tahan yang lama. Namun akibat kontak langsung dengan roda kendaraan, hujan, dingin, dan panas, lapis paling atas cepat menjadi aus dan rusak, sehingga disebut lapis aus. Lapisan di bawah lapis aus yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat disebut dengan lapis permukaan antar (*binder course*), berfungsi memikul beban lalu lintas dan mendistribusikannya ke lapis pondasi. Dengan demikian lapis permukaan dapat dibedakan menjadi sebagai berikut.

1. Lapis aus (*wearing course*), merupakan lapis permukaan yang kontak dengan roda kendaraan dan perubahan cuaca
2. Lapis permukaan antar (*binder course*), merupakan lapis permukaan yang terletak di bawah lapis aus dan diatas lapis pondasi

3.1.2 Lapis Pondasi Atas (*Base Course*)

Adapun kegunaan lapis pondasi atas ini antara lain sebagai berikut.

1. Bagian perkerasan yang menahan gaya lintang dari beban roda dan menyebarkan beban ke lapisan di bawahnya.
2. Lapisan peresapan untuk lapisan pondasi bawah.
3. Bantalan terhadap lapisan permukaan.

Material yang akan digunakan untuk lapisan pondasi atas adalah material yang cukup kuat. Bahan-bahan alam seperti batu pecah, kerikil pecah, stabilisasi tanah dengan semen dan kapur dapat digunakan sebagai lapis pondasi atas.

3.1.3 Lapis Pondasi Bawah (*Subbase Course*)

Lapis perkerasan yang terletak antara lapis pondasi atas dan tanah dasar dinamakan lapis pondasi bawah (*subbase*). Lapis ini memiliki fungsi sebagai berikut.

1. Bagian dari konstruksi perkerasan untuk menyebarkan beban roda ke tanah dasar.
2. Lapis peresapan agar air tanah tidak berkumpul di pondasi.
3. Sebagai lapisan pertama agar pekerjaan dapat berjalan lancar. Hal ini sehubungan dengan kondisi lapangan yang memaksa harus segera menutup tanah dasar dari pengaruh cuaca, atau lemahnya daya dukung tanah dasar menahan roda-roda alat besar.

Jenis lapis pondasi baik untuk lapis pondasi atas maupun lapis pondasi bawah adalah :

1. Lapis Pondasi Agregat

Terdapat tiga kelas yang berbeda dari Lapis Pondasi agregat yaitu Kelas A, Kelas B dan Kelas S. Pada umumnya Lapis Pondasi Agregat Kelas A adalah mutu Lapis Pondasi Atas untuk di bawah lapisan beraspal, dan Lapis Pondasi Agregat Kelas B adalah untuk lapis pondasi Bawah. Lapis Pondasi Agregat Kelas S digunakan untuk bahu jalan tanpa penutup.

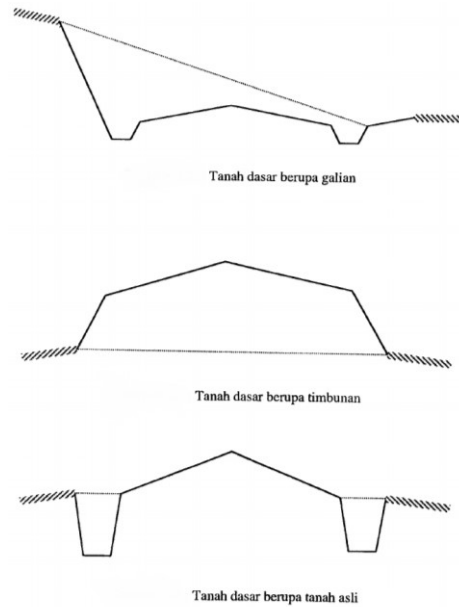
2. Lapis Pondasi Atas Bersemen (*CTB*)

CTB menawarkan penghematan yang signifikan dibanding perkerasan pondasi bebutir untuk jalan yang dilewati lalu lintas sedang dan berat. Biaya *CTB* tersebut lebih murah secara tipikal untuk kisaran beban sumbu 2,5 sampai 30 juta *CESA* tergantung pada harga setempat dan kemampuan kontraktor. *CTB* juga menghemat penggunaan aspal dan material berbutir, kurang sensitif terhadap air dibandingkan dengan lapis pondasi berbutir, dan juga dengan biaya yang lebih murah dibandingkan dengan lapisan aspal yang berlapis-lapis. *LMC (Lean Mix Concrete)* dapat digunakan sebagai pengganti *CTB*, dan memberi kemudahan pelaksanaan di daerah yang sempit misalnya pada pelebaran perkerasan berdampingan dengan lajur yang sedang dilalui lalu lintas.

3.1.4 Tanah Dasar (*Subgrade*)

Lapisan tanah dasar dapat berupa tanah asli yang dipadatkan jika tanah aslinya tidak baik, tanah yang didatangkan dari tempat lain dan dipadatkan, atau tanah yang distabilisasi dengan kapur atau bahan lainnya. Pemadatan yang baik diperoleh jika dilakukan pada kadar air optimum dan diusahakan kadar air tersebut konstan selama umur rencana. Hal ini dapat dicapai dengan kelengkapan drainase yang memenuhi syarat. Ditinjau dari muka tanah asli, maka lapisan tanah dasar dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan dibedakan atas :

1. Lapisan tanah dasar, tanah galian
2. Lapisan tanah dasar, tanah timbunan
3. Lapisan tanah dasar, tanah asli



Gambar 3.2 Jenis Tanah Dasar Ditinjau dari Muka Tanah Asli

(Sumber: Sukirman, 1999)

Sebelum diletakkan lapisan-lapisan lainnya, tanah dasar dipadatkan terlebih dahulu sehingga tercapai kestabilan yang tinggi terhadap perubahan volume. Kekuatan dan keawetan konstruksi perkerasan jalan sangat ditentukan oleh sifat-sifat daya dukung tanah dasar. Bahan subgrade akan berpengaruh terhadap daya dukung tanah dasar tersebut. Semakin bagus aspek tanah untuk subgrade maka akan semakin besar daya dukung tanah tersebut. Terutama untuk tanah dasar berupa tanah timbunan, maka perlu diperhatikan beberapa hal sehubungan dengan daya dukung tanah tersebut, antara lain :

1. Klasifikasi tanah, sifat butiran, plastisitas tanah, sifat teknis tanah serta nilai *CBR* tanah. Semua hal itu berhubungan dengan kepadatan tanah, semakin padat tanah dasar maka akan semakin tinggi daya dukungnya.
2. Kadar air, semakin tinggi kadar air maka daya dukung tanah itu akan semakin jelek.
3. Kontrol pemadatan baik di laboratorium maupun lapangan.

3.2 Beban Lalu Lintas

2.2.1 Prosedur Desain

Faktor yang terpenting dalam desain perkerasan adalah beban lalu lintas. Pertimbangan dalam perhitungan lalu lintas harus meliputi konfigurasi dan besarnya beban serta jumlah pengulangan beban lalu lintas, yaitu : *fixed traffic*, *fixed vehicles*, dan *variable traffic and vehicle*.

Analisis dengan metode *fixed traffic*, tebal perkerasan dihitung dengan beban roda tunggal sedangkan jumlah pengulangan beban tidak menjadi pertimbangan dalam analisis. Metode ini umumnya digunakan untuk perkerasan lapangan terbang (*airport*) atau pada perkerasan yang dibebani beban yang sangat besar namun frekuensinya rendah.

Metode *fixed vehicle* menghitung ketebalan perkerasan berdasarkan pada jumlah pengulangan beban kendaraan/sumbu standar, biasanya 18-kip (80-KN) *single axle load*. Beban kendaraan/sumbu yang tidak 18 kip (80 KN) atau terdiri dari tandem/tridem harus diubah menjadi 18-kip *single axle load* dengan menggunakan *Equivalent Axle Load Factor* (EALF).

Penggunaan metode *variable traffic and vehicles* mempertimbangkan volume lalu lintas dan beban kendaraan/gandar secara sendiri-sendiri, sehingga tidak diperlukan faktor penyesuaian (*equivalent factor*) untuk tiap beban roda. Beban roda/gandar dapat dibagi menjadi beberapa grup/kelompok dan tegangan-regangan-lendutan dapat dianalisis secara terpisah untuk keperluan perencanaan. Prosedur ini sangat sesuai untuk desain metode analitis dimana respon dari perkerasan akibat beban yang berbeda dapat dihitung secara manual/komputer.

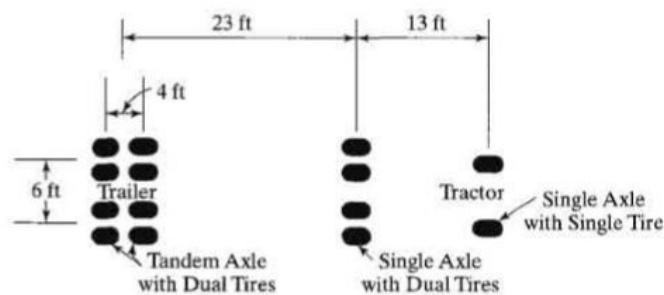
Lalu lintas dan pembebanan tergantung dari beberapa faktor antara lain :beban gandar (*axle load*), jumlah repetisi beban (*the number of load repetitions*), kontak area ban (*tire-contact areas*), kecepatan kendaraan (*vehicle speed*).

1. Beban gandar (*axle load*)

Beban yang diperhitungkan adalah beban hidup yang berupa beban tekanan sumbu roda kendaraan yang lewat di atasnya. Dengan demikian, beban mati (berat sendiri) konstruksi diabaikan.

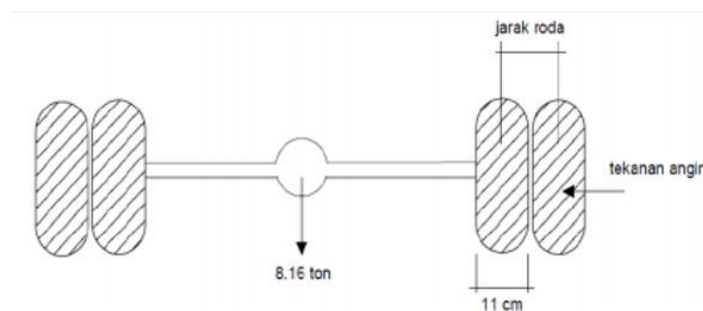
2. Jumlah repetisi beban (*the number of load repetitions*)

Kapasitas konstruksi perkerasan jalan dalam besaran sejumlah repetisi (lintasan) beban sumbu roda lalu-lintas dalam satuan standar axle load yang dikenal dengan satuan EAL (*Equivalent Axle Load*) atau ESAL (*Equivalent Single Axle Load*). Satuan standar *axle load* adalah yang mempunyai daya rusak kepada kontruksi perkerasan sebesar 1 dan *axle load* yang bernilai daya rusak sebesar 1 tersebut adalah *single axle load* sebesar 18000 lbs atau 18 kips atau 8,16 ton.



Gambar 3.3 Konfigurasi Roda pada Tipikal Kendaraan Semi Trailer

(Sumber : Huang, 2004)



Gambar 3.4 Sumbu Standar Ekuivalen Indonesia

(Sumber : Sukirman, 1999)

3. Kontak area ban (*tire contact areas*)

Luasan area kontak antara ban dan perkerasan jalan perlu diketahui terutama dalam perencanaan dengan metode mekanistik sehingga beban sumbu dapat diasumsikan terbagi merata pada area kontak. Luasan area kontak roda bergantung pada tekanan kontak. Pada perencanaan perkerasan, tekanan

kontak diasumsikan sama dengan tekanan ban. Beban sumbu roda yang berat biasanya diaplikasikan dengan penggunaan sumbu tandem dan tridem.

$$A_c = \frac{q}{a} \quad (3.1)$$

dengan :

- A_c = *the area of contact* (kontak area),
- q = *load* (beban maksimum 1 roda), dan
- a = *tire pressure* (tekanan ban).

Apabila beban roda berupa tandem (dual tire) maka area kontak roda harus dikonversi menjadi area lingkaran. Radius kontak dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$\alpha = \sqrt{\frac{0,852 Pd}{q\pi} + \frac{Sd}{\pi} \left(\frac{Pd}{0,5227q}\right)^{0,5}} \quad (3.2)$$

dengan :

- a = Radius kontak roda,
- Pd = Beban untuk satu roda,
- Q = Tekanan kontak roda, dan
- Sd = Jarak antara 2 roda.

4. Kecepatan kendaraan (*vehicle speed*)

Batasan kecepatan bagi jalan-jalan perkotaan haruslah sesuai dengan tipe dan kelas jalan yang bersangkutan. Informasi mengenai kecepatan rencana berdasarkan tipe dan kelas jalan disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kecepatan Rencana Berdasarkan Tipe dan Kelas Jalan

Tipe	Kelas	Kecepatan Rencana (km/jam)
Tipe I	1	100,80
	2	80,60
Tipe II	1	60
	2	60,50
	3	40,30
	4	30,20

Sumber : Bina Marga (1997)

2.2.2 Lalu Lintas Harian (LHR)

Dalam perencanaan perkerasan lentur biasanya menggunakan metode dengan membagi beban sumbu kendaraan menjadi sejumlah kelompok/grup. Kelompok kendaraan yang diperhitungkan dalam perencanaan sesuai dengan hasil survei volume lalu lintas. Jumlah pengulangan beban dihitung dengan mempertimbangkan Lalu lintas Harian Rata-rata Tahunan (LHRT) pada ruas jalan yang akan direncanakan.

Lalu lintas Harian Rata-rata Tahunan (LHRT) adalah jumlah lalu lintas kendaraan rata-rata yang melewati satu jalur jalan selama 24 jam dan diperoleh dari data selama satu tahun penuh. LHRT dinyatakan dalam smp/hari/2 arah atau kendaraan/hari/2 arah untuk jalan 2 lajur 2 arah, atau smp/hari/1 arah atau kendaraan/hari/1 arah untuk jalan berlajur banyak dengan median.

$$\text{LHRT} = \frac{\text{Jumlah Lalu Lintas dalam 1 Tahun}}{365} \quad (3.3)$$

Untuk dapat menghitung LHRT harus tersedia data jumlah kendaraan yang terus menerus selama 1 tahun penuh. Mengingat akan biaya yang diperlukan dan membandingkan dengan ketelitian yang dicapai serta tak semua tempat di Indonesia mempunyai data volume lalu lintas selama 1 tahun, maka untuk kondisi tersebut

dapat pula dipergunakan satuan Lalu lintas Harian Rata-rata (LHR). LHR adalah hasil bagi jumlah kendaraan yang diperoleh selama pengamatan dengan lamanya pengamatan.

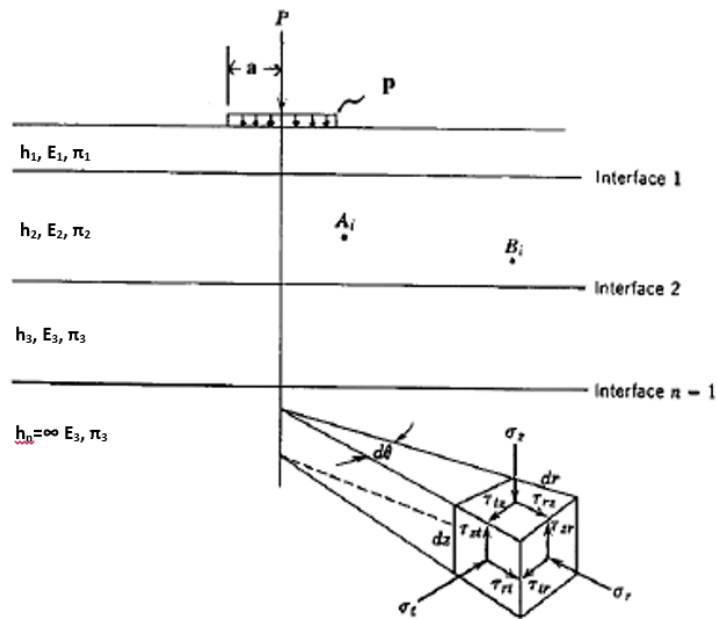
$$\text{LHR} = \frac{\text{Jumlah Volume Lalu Lintas Selama Pengamatan}}{\text{Lamanya Pengamatan}} \quad (3.4)$$

3.3 Tegangan Dan Regangan Perkerasan Lentur

3.3.1 Konsep Sistem Lapisan

Multilayer Elastic System (Sistem Multilapis Elastis) merupakan salah satu penyelesaian secara analisis pada metode mekanistik. Pada sistem struktur lapisan banyak ini berkenaan dengan tegangan, regangan, dan lendutan yang merupakan respon dari perkerasan terhadap beban roda kendaraan yang melintas di atasnya. Dalam *multi-layered elastic system*, menggunakan beberapa asumsi dalam menghitung respon struktur seperti yang disebutkan di atas, antara lain (Yodder and Witczak, 1975) :

1. Sifat-sifat bahan dari setiap lapisan perkerasan dianggap homogen. Contohnya sifat di titik Ai sama dengan sifat-sifat bahan di titik Bi. (Lihat Gambar 3.5).
2. Tiap lapisan mempunyai batas ketebalan, kecuali untuk lapisan paling bawah (tanah dasar memiliki ketebalan tidak terbatas) dan lebar setiap lapisan perkerasan dianggap tidak terbatas.
3. Tiap lapisan dianggap isotopik, yakni sifat bahan di suatu titik tertentu, titik Ai contohnya sama di setiap arah.
4. Friksi yang terjadi di antara lapisan yaitu di *interface*.
5. Sifat-sifat bahan diwakili oleh dua parameter struktural, yaitu modulus resilient (E atau MR) dan Rasio *Poisson* (μ)



Gambar 3.5 Multi layered elastic system

(Sumber: Yoder dan Witczak, 1975)

Tegangan normal (σ_z , σ_r , σ_t) yang bekerja tegak lurus pada bagian permukaan. Tegangan geser (τ_{rt} , τ_{tr} , τ_{rz} , τ_{zr} , τ_{tz} , τ_{zt}) yang bekerja sejajar permukaan. Dalam kondisi keseimbangan statis diperlihatkan bahwa tegangan geser yang bekerja pada tiap-tiap permukaan adalah sama besar yaitu τ_{rt} , τ_{tr} , τ_{rz} , τ_{zr} , τ_{tz} , τ_{zt} . Dalam kondisi tersebut, maka dapat dikatakan bahwa resultan tegangan geser sama dengan nol. Regangan yang terjadi dirumuskan pada persamaan berikut.

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (3.5)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (3.6)$$

$$\epsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_z + \sigma_r)] \quad (3.7)$$

Dengan :

P = beban terpusat roda,

h_n = kedalaman masing-masing lapisan,

E	= modulus elastisitas bahan tiap lapisan,
μ	= nilai banding poisson tiap lapis,
Ai, Bi	= titik-titik pada lapis yang ditinjau,
σ	= tegangan normal, dan
τ	= tegangan geser.

3.3.2 Pemodelan Lapis Perkerasan Jalan

Sistem lapisan banyak atau model lapisan elastis dapat menghitung tekanan dan regangan pada satu titik dalam suatu struktur perkerasan. Model ini berasumsi bahwa setiap lapis perkerasan memiliki sifat-sifat seperti homogen, isotropis dan linear elastik yang berarti akan kembali ke bentuk aslinya ketika beban dipindahkan. Dalam pemodelan lapis perkerasan jalan dengan model lapisan elastis ini diperlukan data input untuk mengetahui tegangan dan regangan pada struktur perkerasan dan respon terhadap beban. Parameter-parameter yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Parameter setiap *layer*
 - a. Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas adalah perbandingan antara tegangan dan regangan suatu benda. Hampir semua bahan elastis yang artinya dapat kembali ke bentuk aslinya setelah diregangkan atau ditekan. Modulus elastisitas biasa disebut juga *Modulus Young* dan dilambangkan dengan E.

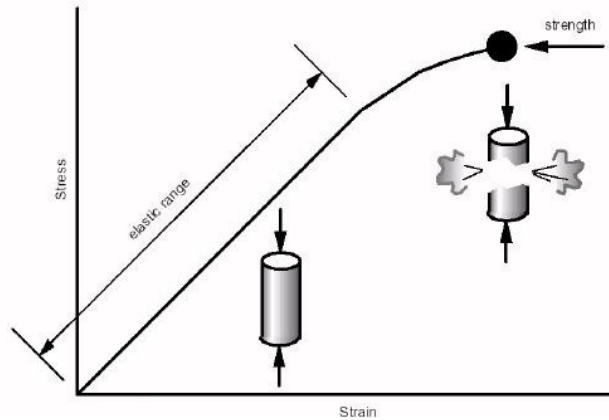
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

dengan :

- E = Modulus Elastisitas (Psi atau kPa),
 σ = Tegangan (kPa), dan
 ε = Regangan.

Modulus elastisitas untuk suatu benda mempunyai batas regangan dan tegangan elastisitasnya. Grafik tegangan dan regangan dapat dilihat pada Gambar 3.6 batas elastisitasnya suatu bahan bukan sama dengan

kekuatan bahan tersebut menanggung tegangan atau regangan, melainkan suatu ukuran dari seberapa baik suatu bahan kembali ke ukuran dan bentuk aslinya.



Gambar 3.6 Modulus Elastisitas

(Sumber : *Pavement Interactive*)

Tabel 3.2 Nilai Elastisitas Tipikal

Material	Modulus Elastisitas	
	Psi	kPa
<i>Cement Treated Granular Base</i>	1000000-2000000	7000000-14000000
<i>Cement Aggregate Mixtures</i>	500000-1000000	3500000-7000000
<i>Asphalt Treated Base</i>	70000-450000	490000-3000000
<i>Asphalt Concrete</i>	20000-2000000	140000-14000000
<i>Bituminous Stabilized Mixtures</i>	40000-300000	280000-2100000
<i>Unbound Granular Materials</i>	15000-45000	105000-315000
<i>Fine Grained or Natural Subgrade</i>	3000-40000	21000-28000

Sumber : Huang (2004)

b. *Poisson's Ratio*

Salah satu parameter penting yang digunakan dalam analisa elastis dari sistem perkerasan jalan adalah *poisson's ratio* yang merupakan angka perbandingan antara regangan horisontal (*lateral strain*) dan regangan vertikal (*axial strain*) yang disebabkan oleh beban sejajar sumbu dan regangan aksial (Yoder dan Witzcak, 1975)

Tabel 3.3 Nilai *Poisson's Ratio*

<i>Materials</i>	Nilai μ	μ tipikal
<i>Hot mix asphalt</i>	0,3-0,4	0,35
<i>Portland cement concrete</i>	0,15-0,20	0,15
<i>Untreated granular material</i>	0,30-0,40	0,35
<i>Cement-treated granular material</i>	0,10-0,20	0,15
<i>Cement-treated fine-grained material</i>	0,15-0,35	0,25
<i>Lime-stabilized material</i>	0,10-0,25	0,20
<i>Lime-flyash mixture</i>	0,10-0,15	0,15
<i>Loose sand/silty sand</i>	0,20-0,40	0,3
<i>Dense sand</i>	0,30-0,45	0,35
<i>Fine-grained soil</i>	0,30-0,50	0,4
<i>Saturated soft clay</i>	0,4	0,45

Sumber : Huang (2004)

2. Ketebalan Setiap Lapis Perkerasan

Ketebalan setiap lapis perkerasan diperlukan dalam teori elastis lapis banyak sebagai input dalam penyelesaian menggunakan program. Ketebalan setiap lapis dalam satuan mm atau inch.

3. Kondisi Beban

Data ini terdiri dari data beban roda, P (kN/Lbs), tekanan ban, q (Kpa/Psi) dan khusus untuk sumbu roda belakang, jarak antara roda ganda, d (mm/inch). Nilai q dan d pada prinsipnya dapat ditentukan sesuai dengan data spesifikasi teknis kendaraan yang digunakan. Adapun nilai P dipengaruhi oleh barang

yang diangkut oleh kendaraan. Analisa struktural perkerasan yang akan dilakukan pada langkah selanjutnya juga memerlukan jari-jari bidang kontak, a (mm/inch) antara roda bus dan permukaan perkerasan yang dianggap berbentuk lingkaran.

$$\alpha = \sqrt{\frac{p}{\pi x q}} \quad (3.9)$$

dengan :

- a = jari-jari bidang kontak,
- p = beban kendaraan, dan
- q = tekanan beban.

Nilai yang akan dihasilkan dari permodelan lapis perkerasan dengan sistem lapis banyak adalah nilai tegangan, regangan dan lendutan.

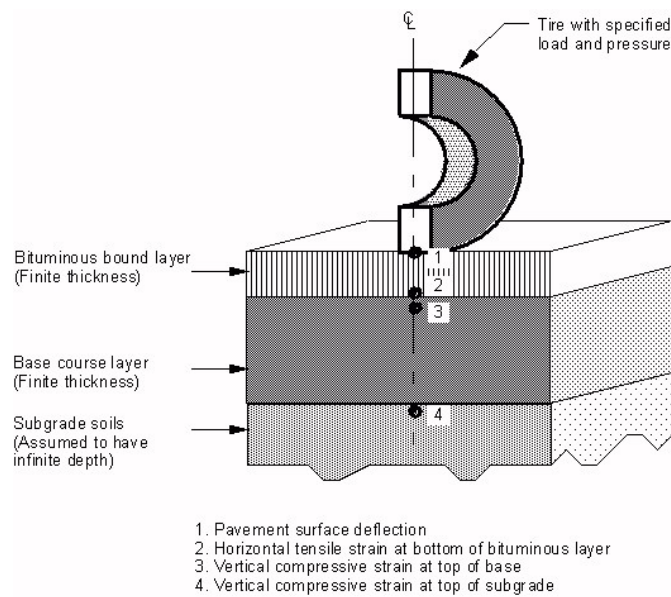
- a. Tegangan, yaitu berupa intensitas internal di dalam struktur perkerasan pada berbagai titik dengan satuan (N/m^2 , Pa, atau Psi)
- b. Regangan, menyatakan sebagai rasio perubahan bentuk dari bentuk asli (mm/mm atau in/in), karena regangan di dalam perkerasan nilainya sangat kecil maka dinyatakan dalam *microstrain* (10^{-6})
- c. Defleksi/lendutan, adalah perubahan linier dalam suatu bentuk dinyatakan dalam satuan panjang (μm atau inch atau mm)

Dengan menggunakan *Kenpave* akan mempermudah perhitungan tegangan, regangan, dan lendutan di berbagai titik pada struktur perkerasan. Namun, ada beberapa titik atau lokasi penting yang biasa digunakan dalam analisa perkerasan yang disajikan pada Tabel 3.4 dan Gambar 3.7.

Tabel 3.4 Analisa Struktur Perkerasan

Lokasi	Respon	Analisa Struktur Perkerasan
Permukaan Perkerasan	Defleksi	Digunakan dalam desain lapis tambah
Bawah Lapis Permukaan	Regangan Tarik Horizontal	Digunakan untuk memprediksi retak fatik pada lapis permukaan
Bagian atas tanah dasar/ bawah lapis pondasi bawah	Regangan tekan vertikal	Digunakan untuk memprediksi kegagalan <i>rutting</i> yang terjadi

(Sumber : *National Cooperative Highway Research Program, 2004*)



Gambar 3.7 Lokasi Analisa Struktur Perkerasan

(Sumber : *Pavement Interactive*)

3.4 Karakteristik Material

3.4.1 Layer Viskoelastis

Sifat viskoelastis diterapkan untuk menganalisis *layer* aspal. Perilaku aspal tergantung pada waktu pembebanan, sehingga teori viskoelastis normal untuk digunakan. Durasi beban adalah 0,1 detik untuk memindahkan beban 40 km/jam.

Metode untuk mengkarakterisasi bahan viskoelastis adalah dengan spesifikasi *creep compliances*. Temperatur yang disarankan untuk *creep compliances* digunakan untuk *input* pada *Layerinp*. Temperatur standar pada perkerasan lentur sebesar 25°C (Aschuri, dkk 2003), dan ditampilkan sebagai berikut :

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \left(1 - \frac{t}{T_0}\right) + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \left(1 + \exp \frac{t}{T_0}\right) \quad (3.10)$$

$$D(t) = \frac{1}{E_0} (1 - e^{-0,833t}) \quad (3.11)$$

Creep compliances diukur dengan 11 variasi waktu antara lain : 0,001 ; 0,003 ; 0,01 ; 0,03 ; 0,1 ; 0,3 ; 1 ; 3 ; 10 ; 30 ; dan 100 detik.

3.4.2 Layer Non-linear Elastis

Telah diketahui bahwa material granular dan tanah dasar adalah non linear dengan modulus elastisitas karena berbagai macam level dari tegangan. Modulus elastisitas yang digunakan dengan sistem berlapis adalah modulus resilien. Modulus resilien dari material granular bertambah seiring dengan bertambahnya intensitas tegangan.

3.4.3 Layer Linear Elastis

Permodelan layer secara linear elastis dapat menghitung tegangan, regangan, dan defleksi di struktur perkerasan yang permukaannya telah dibebani. Layer linear elastis menganggap bahwa setiap layer struktur perkerasan homogen, isotropis, dan elastis secara linear.

3.5 Metode Analisa Komponen Bina Marga

Desain jalan di Indonesia telah berkembang dari tahun ke tahun. Dimulai dari Metode Analisa Komponen pada tahun 1987, kemudian berkembang menjadi desain perkerasan lentur Pt T-01-2002-B yang diadopsi dari metode *AASHTO* pada penelitiannya pada tahun 1958-1960 di Ottawa, Illinois menggunakan kendaraan dengan sumbu tunggal roda ganda dengan muatan sumbu terberat 8.16 ton/18000

pon. Dalam rangka peningkatan dan pengembangan kinerja jalan untuk pelaksanaan kegiatan pekerjaan konstruksi jalan guna menjamin kualitas perkerasan jalan, Pemerintahan Indonesia melalui Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jendral Bina Marga mengeluarkan draft manual desain perkerasan jalan pada tahun 2013 yang kemudian dilakukan revisi pada tahun 2017 menjadi Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017.

Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 meliputi perubahan struktur penyajian untuk mempermudah pemahaman pengguna dan penambahan serta perbaikan kandungan manual. Revisi ini disusun untuk mengakomodasi tantangan dan hambatan dalam kinerja aset jalan di Indonesia. Manual ini berisi ketentuan teknis untuk pelaksanaan pekerjaan desain perkerasan jalan yang berlaku di lingkungan Direktorat Jenderal Bina Marga, terdiri dari 2 bagian, yaitu struktur perkerasan baru dan rehabilitasi perkerasan. Adapun beberapa parameter yang dijadikan sebagai pertimbangan perhitungannya ada seperti umur rencana, lalu lintas, faktor lajur, beban lalu lintas dan tingkat pertumbuhan lalu lintas.

3.5.1 Umur Rencana

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum, umur rencana suatu jalan raya adalah jumlah waktu dalam tahun yang dihitung sejak jalan tersebut dibuka sampai saat diperlukan perbaikan berat atau dianggap perlu untuk diberi lapis permukaan yang baru. Umur perkerasan jalan ditetapkan pada umumnya berdasarkan jumlah kumulatif lintas kendaraan standard (*CESA, Cumulative Equivalent Standard Axle*). Dalam Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 umur rencana digunakan untuk menentukan jenis perkerasan dengan mempertimbangkan elemen perkerasan berdasarkan analisis *discounted whole of life cost* terendah. Tabel 3.5 berikut ini merupakan tabel ketentuan umur rencana dengan mempertimbangkan elemen perkerasan yang disajikan didalam Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017.

Tabel 3.5 Umur Rencana Perkerasan Jalan Baru (UR)

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (Tahun)
Perkerasan Lentur	Lapisan perkerasan aspal dan lapisan berbutir <i>CTB</i>	20
	Pondasi jalan	40
	Semua lapisan perkerasan untuk area yang tidak diijinkan untuk ditinggikan akibat pelapisan ulang, misal : jalan perkotaan, underpass, jembatan, terowongan	
	Cement Treated Base	
Perkerasan Kaku	Lapis Pondasi Atas, Lapis Pondasi Bawah, Lapis Beton Semen dan Pondasi Jalan	
Jalan Tanpa Penutup	Semua Elemen	Min 10

Sumber : Bina Marga (2017)

Dapat dilihat pada Tabel 3.5 hubungan antara umur rencana, jenis perkerasan dan elemen perkerasan. Untuk perkerasan yang direncanakan dengan umur 10 tahun, perkerasan tanpa penutup dapat di aplikasikan sedangkan untuk perkerasan umur 20 tahun, perkerasan lentur menjadi pilihan yang utama. Untuk perkerasan 28 dengan umur rencana 40 tahun lebih dianjurkan untuk menggunakan perkerasan kaku. Ketentuan dalam tabel diatas tidaklah mutlak. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi desain perkerasan seperti ketersediannya material lokal, beban lalu lintas serta, serta kondisi lingkungan sangat penting untuk dipertimbangkan.

3.5.2 Lalu Lintas

Lalu lintas sangat diperlukan dalam perencanaan teknik jalan, karena kapasitas dan konstruksi struktur perkerasan yang akan direncanakan tergantung dari komposisi lalu lintas yang akan menggunakan jalan pada suatu segmen jalan yang ditinjau. Dalam pendahuluan Manual Pd T-19-2004-B survei lalu lintas dapat

dilakukan dengan cara manual, semi manual (dengan bantuan kamera video), ataupun (otomatis menggunakan tube maupun loop). Analisis lalulintas pada ruas jalan yang didesain harus juga memperhatikan faktor pengalihan arus lalulintas yang didasarkan pada analisis secara jaringan dengan memperhitungkan proyeksi peningkatan kapasitas ruas jalan yang ada atau pembangunan ruas jalan yang baru dalam jaringan tersebut, dan pengaruhnya terhadap volume lalulintas dan beban terhadap ruas jalan yang didisain.

1. Volume Lalulintas

Volume lalulintas diperlukan untuk menentukan jumlah dan lebar jalur pada suatu jalan dalam penentuan karakteristik geometrik, sedangkan jenis kendaraan akan menentukan kelas beban atau MST (Muatan Sumbu Terberat) yang berpengaruh pada perencanaan konstruksi struktur perkerasan. Volume lalulintas didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang melewati satu titik pengamatan selama satu satuan waktu (hari, jam, atau menit). Volume lalulintas dapat berupa Volume Lalulintas 30 Harian Rata-Rata (LHR) yaitu volume lalulintas yang didapat dari nilai rata-rata kendaraan selama beberapa hari pengamatan dan Lalulintas Harian Rata-Rata Tahunan (LHRT). Lalulintas Harian Rata-Rata Tahunan (LHRT) yaitu volume lalulintas harian yang diperoleh dari nilai rata-rata jumlah kendaraan selama setahun penuh. Pada Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 analisis volume lalulintas harus didasarkan pada survey faktual yakni dengan melakukan survey lalulintas aktual, dengan durasi minimal 7 x 24 jam, dengan berpedoman pada Manual Pd T-19-2004-B dan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI).

2. Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas

Kebijakan dalam penentuan faktor pertumbuhan lalu lintas harus didasarkan pada data-data pertumbuhan historis atau formulasi korelasi dengan faktor pertumbuhan lain yang valid. Bila data histori pertumbuhan lalulintas tidak lengkap atau tidak tersedia Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 menyediakan tabel faktor pertumbuhan lalulintas minimum (untuk tahun 2015 hingga 2035) pada Tabel 3.6 berikut ini.

Tabel 3.6 Faktor Pertumbuhan Lalulintas (i) (%)

	Jawa	Sumatera	Kalimantan	Rata-Rata Indonesia
Arteri dan Perkotaan	4,80	4,83	5,14	4,75
Kolektor Rural	3,50	3,50	3,50	3,50
Jalan Desa	1,00	1,00	1,00	1,00

Sumber : Bina Marga (2017)

Penentuan faktor lalu lintas tidak diterangkan dengan jelas pada Manual Desain Perkerasan Lentur Pd T-01-2002-B, oleh karena itu tabel diatas merupakan hal baru yang harus diperhatikan penyedia jasa konstruksi dalam proses pendesainan. Untuk menghitung pertumbuhan laulintas selama umur rencana Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 menyajikan rumus sebagai berikut.

$$R = \frac{(1+0,01i)^{UR}-1}{0,01i} \quad (3.12)$$

dengan:

- R = Faktor pengali pertumbuhan lalulintas,
- i = Tingkat pertumbuhan lalulintas tahunn, dan
- UR = Umur Rencana (tahun).

3.5.3 Faktor Lajur

Lajur rencana adalah salah satu lajur lalu lintas dari suatu ruas jalan yang menampung lalu lintas kendaraan niaga (truk dan bus) paling besar. Beban lalu lintas pada lajur rencana dinyatakan dalam kumulatif beban gandar standar (ESA) dengan memperhitungkan faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL). Untuk jalan dua arah, faktor distribusi arah (DD) umumnya diambil 0,50 kecuali pada lokasi-lokasi yang jumlah kendaraan niaga cenderung lebih tinggi pada satu arah tertentu.

Faktor distribusi lajur digunakan untuk menyesuaikan beban kumulatif (ESA) pada jalan dengan dua lajur atau lebih dalam satu arah. Pada jalan yang demikian, walaupun sebagian besar kendaraan niaga akan menggunakan lajur luar, sebagian lainnya akan menggunakan lajur-lajur dalam. Faktor distribusi jalan yang ditunjukkan pada Tabel 3.3. Beban desain pada setiap lajur tidak boleh melampaui kapasitas lajur selama umur rencana. Kapasitas lajur mengacu Permen PU No.19/PRT/M/2011 tentang Persyaratan Teknis Jalan dan Kriteria Perencanaan Teknis Jalan berkaitan rasio antara volume dan kapasitas jalan yang harus dipenuhi.

Tabel 3.7 Faktor Distribusi Lajur

Jumlah Lajur per Arah	Faktor Distribusi Lalulintas (%)
1	100
2	80
3	60
4	50

Sumber : Bina Marga (2017)

3.5.4 Perkiraan Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*)

Perusakan jalan oleh kendaraan dihitung dalam bentuk satuan faktor yang disebut dalam faktor perusak jalan (*Vehicle Damage Factor*). Untuk menghitung faktor kerusakan jalan perlu diperoleh gambaran tentang beban sumbu kendaraan dan konfigurasi sumbu kendaraan yang ada. Perhitungan beban lalulintas yang akurat sangatlah penting dalam tahap perhitungan dalam perencanaan kebutuhan konstruksi jalan. Dalam Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 perhitungan beban lalulintas dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu :

1. studi jembatan timbang/timbangan statis lainnya khusus untuk ruas jalan yang di desain, dan
2. studi jembatan timbang dan standard yang telah pernah dikeluarkan dan dilakukan sebelumnya juga telah di publikasikan serta dianggap cukup representatif untuk ruas jalan yang didesain.

Jika survei beban gandar tidak mungkin dilakukan oleh perencana dan data survei beban gandar sebelumnya tidak tersedia, maka nilai *VDF* pada Tabel 3.8 dan Tabel 3.9 dapat digunakan untuk menghitung ESA. Tabel 3.8 menunjukkan nilai *VDF* regional masing-masing jenis kendaraan niaga yang diolah dari data studi *WIM* yang dilakukan Ditjen Bina Marga pada tahun 2012 – 2013. Data tersebut perlu diperbarui secara berkala sekurang-kurangnya setiap 5 tahun. Apabila survei lalu lintas dapat mengidentifikasi jenis dan muatan kendaraan niaga, dapat digunakan data *VDF* masing-masing jenis kendaraan menurut tabel 3.9. Untuk periode beban faktual (sampai tahun 2020), digunakan nilai *VDF* beban nyata. Untuk periode beban normal (terkendali) digunakan *VDF* dengan muatan sumbu terberat 12 ton.

Tabel 3.8 Nilai VDF Standar

Jenis Kendaraan		Uraian	Konfigurasi Sumbu	Muatan yang Diangkut	Kelompok Sumbu	Distribusi Tipikal		Faktor Ekuivalen Beban (VDF) (ESA/Kendaraan)	
Klasifikasi Lama	Alternatif					Semua Kendaraan Bermotor	Semua Kendaraan Bermotor Kecual Sepeda Motor	VDF Pangkat ⁴	VDF Pangkat ⁵
1	1	Sepeda Motor	1.1		2	30,4			
2,3,4	2,3,4	Sedan / Angkot / pickup / station wagon	1.1		2	51,7	74,3		
5a	5a	Bus kecil	1.2		2	3,5	5,00	0,3	0,2
5b	5b	Bus besar	1.2		2	0,1	0,20	1,0	1,0
6a.1	6.1	Truk 2 sumbu–cargo ringan	1.1		Muatan umum	2	4,6	6,60	0,3
6a.2	6.2	Truk 2 sumbu- ringan	1.2	Tanah, pasir, besi, semen	2	0,8			0,8
6b1.1	7.1	Truk 2 sumbu–cargo sedang	1.2	Muatan umum	2	-	-	0,7	0,7
6b1.2	7.2	Truk 2 sumbu- sedang	1.2	Tanah, pasir, besi, semen	2	3,8	5,50	1,6	1,7
6b2.1	8.1	Truk 2 sumbu- berat	1.2	Muatan umum	2			0,9	0,8
6b2.2	8.2	Truk 2 sumbu- berat	1.2	Tanah, pasir, besi, semen	2			7,3	11,2
7a1	9.1	Truk 3 sumbu - ringan	1.22	Muatan umum	3	3,9	5,60	7,6	11,2
7a2	9.2	Truk 3 sumbu - sedang	1.22	Tanah, pasir, besi, semen	3			28,1	64,4
7a3	9.3	Truk 3 sumbu - berat	1.1.2		3	0,1	0,10	28,9	62,2
7b	10	Truk 2 sumbudan trailer penarik 2 sumbu	1.2-2-2		4	0,5	0,7	36,9	90,4
7c1	11	Truk 4 sumbu - trailer	1.2-22		4	0,3	0,50	13,6	24,0
7c2.1	12	Truk 5 sumbu- trailer	1.22-22		5	0,7	1,00	19,0	33,2
7c2.2	13	Truk 5 sumbu- trailer	1.2-222		5			30,3	69,7
7c3	14	Truk 6 sumbu- trailer	1.22-222	6	0,3	0,50	41,6	93,7	

Sumber : Bina Marga (2017)

Tabel 3.9 Nilai VDF Masing – Masing Jenis Kendaraan Niaga

Jenis Ken daraan	Sumatera				Jawa				Kalimantan				Sulawesi				Bali, Nusa Tenggara, Maluku dan Papua			
	Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal	
	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5
5B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
6A	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5	0,55	0,5
6B	4,5	7,4	3,4	4,6	5,3	9,2	4,0	5,1	4,8	8,5	3,4	4,7	4,9	9,0	2,9	4,0	3,0	4,0	2,5	3,0
7A1	10,1	18,4	5,4	7,4	8,2	14,4	4,7	6,4	9,9	18,3	4,1	5,3	7,2	11,4	4,9	6,7	-	-	-	-
7A2	10,5	20,0	4,3	5,6	10,2	19,0	4,3	5,6	9,6	17,7	4,2	5,4	9,4	19,1	3,8	4,8	4,9	9,7	3,9	6,0
7B1	-	-	-	-	11,8	18,2	9,4	13,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7B2	-	-	-	-	13,7	21,8	12,6	17,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7C1	15,9	29,5	7,0	9,6	11,0	19,8	7,4	9,7	11,7	20,4	7,0	10,2	13,2	25,5	6,5	8,8	14,0	11,9	10,2	8,0
7C2A	19,8	39,0	6,1	8,1	17,7	33,0	7,6	10,2	8,2	14,7	4,0	5,2	20,2	42,0	6,6	8,5	-	-	-	-
7C2B	20,7	42,8	6,1	8,0	13,4	24,2	6,5	8,5	-	-	-	-	17,0	38,8	9,3	13,5	-	-	-	-
7C3	24,5	51,7	6,4	8,0	18,1	34,4	6,1	7,7	13,5	22,9	9,8	15,0	28,7	59,6	6,9	8,8	-	-	-	-

Sumber : Bina Marga (2017)

3.5.5 Modulus Bahan

Karakteristik modulus bahan untuk iklim dan kondisi pembebanan di Indonesia diberikan pada Tabel 3.10 untuk bahan berpengikat dan Tabel 3.11 untuk bahan berbutir lepas. Modulus lapisan aspal telah ditetapkan berdasarkan kisaran temperatur udara 25° sampai 34° dan Temperatur Perkerasan Tahunan Rata-rata (*weighted mean asphalt pavement temperature*, WAMPT) berkisar di antara 38° C (daerah pegunungan) hingga 42° C (untuk daerah pesisir).

Tabel 3.10 Karakteristik Modulus Bahan Berpengikat

Jenis Bahan	Modulus Tipikal	<i>Poisson's Ratio</i>
<i>HRS WC</i>	800 MPa	0,4
<i>HRS BC</i>	900 MPa	
<i>AC WC</i>	1100 MPa	
<i>AC BC</i>	1200 MPa	
<i>AC Base</i>	1600 MPa	
Bahan bersemen (<i>CTB</i>)	500 MPa retak (<i>post cracking</i>)	0,2 (mulus) 0,3 (retak)
Tanah dasar (d disesuaikan musim)	10 x <i>CBR</i> (Mpa)	0,45 (tanah kohesif)
		0,35 (tanah non kohesif)

Sumber : Bina Marga (2017)

Tabel 3.11 Karakteristik Modulus Bahan Berbutir Lepas

Tebal lapisan aspal di atas lapisan berbutir	Modulus bahan berbutir (MPa)	
	(Langsung di bawah lapis HRS)	(Langsung di bawah lapis AC : WC/BC/Base)
40 mm	350	350
75 mm	350	350
100 mm	350	350

Lanjutan Tabel 3.11 Karakteristik Modulus Bahan Berbutir Lepas

Tebal lapisan aspal di atas lapisan berbutir	Modulus bahan berbutir (MPa)	
	(Langsung di bawah lapis HRS)	(Langsung di bawah lapis AC : WC/BC/Base)
125 mm	320	300
150 mm	280	250
175 mm	250	250
200 mm	220	210
225 mm	180	150
≥ 250 mm	150	150

Sumber : Bina Marga (2017)

3.5.6 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas merupakan beban kendaraan yang dilimpahkan ke perkerasan jalan melalui kontak antara ban dan lapis permukaan atas jalan secara dinamis dan berulang-ulang selama masa pelayanan jalan. Beban kendaraan dilimpahkan melalui roda kendaraan yang terjadi berulang kali selama masa pelayanan jalan sebagai akibat repetisi kendaraan yang melintasi jalan tersebut. Pemahaman tentang beban kendaraan yang merupakan beban dinamis pada perkerasan jalan sangat mempengaruhi hasil dari perencanaan konstruksi struktur perkerasan jalan dan kekokohan struktur pelayanan jalan selama masa pelayanan.

1. Beban Sumbu Standar

Beban sumbu 100 kN diijinkan di beberapa ruas yaitu untuk ruas jalan kelas I. Namun nilai *CESA* selalu ditentukan berdasarkan beban sumbu standard 80 kN.

2. Pengendalian Beban Sumbu

Untuk keperluan desain, tingkat pembebanan saat ini (aktual) diasumsikan berlangsung sampai tahun 2020. Setelah tahun 2020, diasumsikan beban berlebih terkendali dengan beban sumbu nominal 120 kN.

3. Beban Sumbu Standar Kumulatif

Beban sumbu standar kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESA)* merupakan jumlah kumulatif beban sumbu lalu lintas desain pada lajur desain selama umur rencana, yang ditentukan sebagai :

$$ESA = (\sum_{\text{jenis kendaraan}} \text{LHR} \times \text{VDF}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \text{R} \quad (3.13)$$

Dengan:

ESA : lintasan sumbu standar ekivalen (*equivalent standard axle*) untuk 1 hari,

LHR : lintas harian rata – rata tiap jenis kendaraan niaga (satuan kendaraan per hari),

CESA : kumulatif beban sumbu standar ekivalen selama umur rencana

R : faktor pengali pertumbuhan lalu lintas (Pers 3.11),

VDF : Faktor Ekivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*) tiap jenis kendaraan niaga Tabel 3.8. dan Tabel 3.9,

DD : Faktor distribusi arah, dan

DL : Faktor distribusi lajur (Tabel 3.7).

3.5.7 Desain Perkerasan

Pemilihan jenis perkerasan akan bervariasi berdasarkan volume lalu lintas, umur rencana, dan kondisi fondasi jalan. Batasan pada Tabel 3.12 tidak mutlak, perencana harus mempertimbangkan biaya terendah selama umur rencana, keterbatasan dan kepraktisan pelaksanaan. Pemilihan alternatif desain berdasarkan manual ini harus didasarkan pada *discounted lifecycle cost* terendah dan tentunya dengan melihat nilai *CESA₄* yang dihasilkan.

Tabel 3.12 Ketentuan Pertimbangan Jenis Desain Perkerasan

Struktur Perkerasan	Desain	ESA 20 Tahun (juta)				
		0-0.5	0.1-4	4-10	10-30	>30
Perkerasan kaku dengan lalu lintas berat (di atas tanah dengan $CBR \geq 2,5\%$)	4	-	-	2	2	2
Perkerasan kaku dengan lalu lintas rendah (desa dan daerah perkotaan)	4A	-	1,2	-	-	-
<i>AC WC</i> modifikasi atau modifikasi dengan <i>CTB</i> (ESA pangkat 5)	3	-	-	-	2	2
<i>AC</i> dengan <i>CTB</i> (ESA pangkat 5)	3	-	-	-	2	2
<i>AC</i> tebal ≥ 100 mm dengan lapis pondasi berbutir (pangkat 5)	3B	-	-	1,2	2	2
<i>AC</i> atau <i>HRS</i> tipis diatas lapis pondasi berbutir	3A	-	1,2	-	-	-
Burda atau Burtu dengan LPA kelas A atau batuan asli	5	3	3	-	-	-
Lapis Pondasi <i>Soil Cement</i>	6	1	1	-	-	-
Perkerasan tanpa penutup (Japat, jalan kerikil)	7	1	-	-	-	-

Sumber : Bina Marga (2017)

Catatan :

Tingkat Kesulitan :

- 1 kontraktor kecil – medium
- 2 kontraktor besar dengan sumber daya yang memadai
- 3 membutuhkan keahlian dan tenaga ahli khusus – dibutuhkan kontraktor spesialis Burda

Aspal modifikasi direkomendasikan digunakan untuk lapis aus (wearing course) pada jalan dengan repetisi lalu lintas selama 20 tahun >10 juta *ESA*. Tujuan penggunaan aspal modifikasi adalah untuk memperpanjang umur pelayanan, umur fatigue dan ketahanan deformasi lapis permukaan akibat beban lalu lintas berat.

Setelah menentukan jenis perkerasan maka dapat ditentukan tebal perkerasan yang diinginkan sesuai nilai *CESA₅*. Untuk dapat mengetahui desain tebal perkerasan dapat dilihat pada Tabel 3.13 dan Tabel 3.14. Tabel 3.14 menjelaskan bahwa Lapis Fondasi Agregat A dapat disesuaikan sesuai dengan nilai *CBR*.

Tabel 3.13 Desain Perkerasan Lentur – Aspal dengan Lapis Pondasi Berbutir

STRUKTUR PERKERASAN									
	FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	FF6	FF7	FF8	FF9
Solusi yang Dipilih					Lihat Catatan 3				
Pengulangan beban sumbu desain 20 tahun di lajur rencana (pangkat 5) ($10^6 CESA_5$)	< 2	≥ 2-4	> 4-7	>7-10	>10-20	>20-30	>30-50	>50-100	>100-200
	Ketebalan Lapis Perkerasan (mm)								
<i>AC-WC</i>	40	40	40	40	40	40	40	40	40
<i>AC binder</i>	60	60	60	60	60	60	60	60	60
<i>AC base</i>	0	70	80	105	145	160	180	210	245
LPA	400	300	300	300	300	300	300	300	300

Sumber : Bina Marga (2017)

Tabel 3.14 Penyesuaian Tebal Lapis Fondasi Agregat A Untuk Tanah Dasar $CBR \geq 7 \%$

	Struktur Perkerasan								
	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8	FFF9
Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (10^6 CESA5)	> 2	> 2-4	> 4-7	> 7-10	>10-20	> 20-30	>30-50	>50-100	>100-200
TEBAL LPA A (mm) PENYESUAIAN TERHADAP BAGAN DESAIN 3B									
Subgrade $CBR \geq 5,5-7$	400	300	300	300	300	300	300	300	300
Subgrade $CBR > 7-10$	330	220	215	210	205	200	200	200	200
Subgrade $CBR \geq 10$	250	150	150	150	150	150	150	150	150
Subgrade $CBR \geq 15$	200	150	150	150	150	150	150	150	150

Sumber : Bina Marga (2017)

3.6 Metode *Kenpave*

Program *Kenpave* merupakan *software* desain perencanaan perkerasan yang dikembangkan oleh Dr. Yang H Huang, P.E. *Professor Emeritus of Civil Engineering University of Kentucky*. Program *Kenpave* dapat menganalisis perkerasan lentur dan perkerasan kaku dengan fleksibel dan lebih mudah daripada program yang lain. Semua yang harus dilakukan untuk menjalankan program *Kenpave* adalah memasukkan data-data yang diperlukan yaitu sifat karakteristik perkerasan dan material seperti modulus, poisson ratio setiap lapisan, beban roda, tekanan ban, dan koordinat dimana tegangan dan regangan yang diperlukan untuk kita dapatkan. Software ini terbagi dalam empat program yang terpisah dan ditambah dengan beberapa program untuk menunjukkan grafis, keempat program tersebut antara lain yaitu *Layerinp*, *Kenlayer*, *Slabinp*, dan *Kenslab*. Untuk program analisis perkerasan lentur menggunakan program *Layerinp* dan *Kenlayer*.

3.6.1 Menu Program *Kenpave*

Program *Kenpave* memiliki menu-menu yang digunakan dalam menganalisis dan mendesain perkerasan. Menu-menu pada Program *Kenpave* dapat dilihat pada Gambar 3.8 sebagai berikut.



Gambar 3.8 Tampilan Awal *Kenpave*

1. *Data Path*

Data Path yang merupakan direktori tempat penyimpanan data. Nama umum yang digunakan pada direktori adalah default C:\KENPAVE\ sebagai mana terdaftar pada proses instalasi. Jika ingin membuat direktori baru untuk menyimpan data *file* yang dibuat, dapat mengetikkan nama direktori (mis C:\ABC\) di kotak jalur data. Setelah *Layerinp* atau *Slabsinp* diklik, direktori baru akan dibuat dan muncul sebagai item pertama dalam kotak data path. Jika ingin membuat *file* data yang ada selain direktori C:\KENPAVE\, dapat mengetikkan nama direktori. Semua *file* data dalam direktori tersebut dengan extension. DAT akan ditampilkan dalam menu *Filename* yang berada di sebelah kanan.

2. *Filename*

Pada menu *filename* akan ditampilkan sebuah *file* baru yang diciptakan oleh *Layerinp* atau *Slabsinp*, kita tidak perlu mengetik nama di kotak *Filename* karena *file* yang akan dibuat otomatis muncul pada menu *filename*. Semua *file* data harus memiliki ekstensi DAT. Nama *file* ditampilkan dalam kotak juga akan digunakan dalam *file* lain yang dihasilkan selama pelaksanaan *Kenlayer* atau *Kenslabs*.

3. *Help*

Pada setiap layar menu terdapat menu *help* yaitu bantuan yang menjelaskan parameter input dan penggunaan yang tepat dari program. Beberapa menu memiliki bantuan menu atau tombol yang harus diklik jika ingin membacanya.

4. *Editor*

Editor dapat digunakan untuk memeriksa, mengedit, dan cetak data *file*. Untuk pengguna pemula dengan pengaturan *file* data, penggunaan *Layerinp* atau *Slabsinp* sebagai editor sangat dianjurkan. setelah semua analisis yang diinginkan telah selesai, klik *exit* untuk menutup *Kenpave*.

5. *Layerinp* dan *Slabsinp*

Layerinp atau *Slabsinp* digunakan untuk membuat data *file* sebelum *Kenlayer* atau *Kenslabs* dapat dijalankan.

6. *Kenlayer* dan *Kenslabs*

Kenlayer atau *Kenslabs* merupakan program utama untuk analisis perkerasan dan dapat dijalankan hanya setelah *file* data telah diisi. Program ini akan membaca dari *file* data yang telah diisi.

7. *LGRAPH* dan *SGRAPH*

LGRAPH atau *SGRAPH* dapat digunakan untuk menampilkan grafik rencana dan penampang perkerasan dengan beberapa informasi tentang *input* dan *output*.

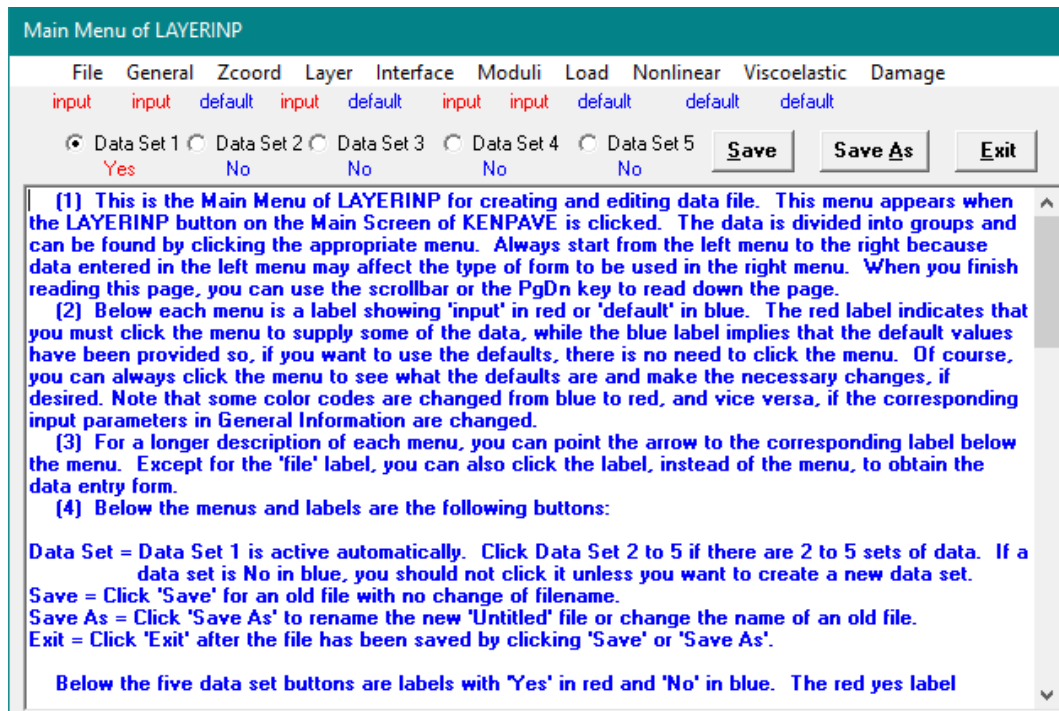
8. *Contour*

Menu ini berguna untuk plot kontur tekanan atau momen dalam arah x atau y. Namun plot *contour* untuk perkerasan kaku.

3.6.2 Program *Kenlayer*

Program *Kenlayer* ini hanya dapat digunakan pada jenis perkerasan lentur. Program *Kenlayer* digunakan untuk menentukan rasio kerusakan menggunakan model tekanan (*distress models*). *Distress models* dalam *Kenlayer* adalah retak dan deformasi. *Distress model* dapat digunakan untuk memprediksi umur perkerasan baru dengan mengasumsi konfigurasi perkerasan. Jika reliabilitas atau kemampuan untuk *distress* tertentu lebih kecil dari tingkat minimum yang dibutuhkan, konfigurasi perkerasan yang diasumsikan harus diubah.

Program *Kenlayer* dimulai dengan input data melalui menu *Layerinp* pada program *Kenpave* seperti pada Gambar 3.9. *Layerinp* memiliki 11 menu. Setiap menu harus diisi dengan data yang ada. Berikut ini adalah penjelasan dari menu-menu yang ada di dalam *Layerinp*.



Gambar 3.9 Tampilan Layar *Layerinp*

1. *File*

Menu ini digunakan untuk memulai *file* yang baru (*New*) dan membuka *file* yang sudah ada (*Old*).

2. *General*

Adapun gambaran menu *general* dapat dilihat pada Gambar 3.10. Menu *general* memiliki beberapa menu yang harus di input, seperti :

- a) *Title* : Memasukkan judul dari analisa
- b) *MATL* : Memilih tipe dari material. (1) jika lapisan merupakan Linear elastis, (2) jika lapisan merupakan non linear elastis, (3) jika lapisan merupakan viskoelastis, (4) jika lapisan merupakan campuran dari ketiga lapisan di atas.
- c) *NDAMA* : Memilih analisa kerusakan (0) jika tidak ada kerusakan analisis, (1) terdapat kerusakan analisis dan ada hasil printout, (2) terdapat kerusakan analisis dan ada hasil printout yang lebih detail
- d) *DEL* : Nilai akurasi hasil analisa. Standar akurasi 0,001

- e) NL : Jumlah layer/lapis, maksimal 19 lapis
- f) NZ : Letak koordinat arah z yang akan dianalisa jika NDAMA=1 atau 2, maka NZ=0 karena program akan menganalisa di koordinat yang mengalami analisa kerusakan
- g) NSTD : (1) Untuk vertikal *displacement*, untuk vertikal *displacement* dan nilai tegangan, (5) untuk vertikal *displacement*, nilai tegangan dan regangan.
- h) NBOND : (1) Jika antar semua lapis saling terikat, (2) jika tiap antar lapisan tidak terikat atau gaya geser diabaikan.
- i) NUNIT : Satuan yang digunakan (0) Satuan *English* (1) Satuan SI

General Information of LAYERINP for Set No. 1

TITLE			
Type of material (1=linear, 2=nonlinear, 3=viscoelastic, 4=combined) (MATL)		1	
Damage analysis (0=no, 1=yes with summary only, 2=yes with detatiled printout) (NDAMA)		0	
Number of periods per year (NPY)		10	
Number of load groups (NLG)		1	
Tolerance for numerical integration (DEL)		0,001	
Number of layers (NL)		4	OK
Number of Z coordinates for analysis (NZ)		5	
Maximum cycles of numerical integration (ICL)		80	
Type of responses (1=displacements only, 5=plus stresses, 9=plus strains) (NSTD)		9	
All layer interfaces bonded (1=yes, 0=if some are frictionless) (NBOND)		1	
Number of layers for bottom tension (NLBT)		0	
Number of layers for top compression (NLTC)		0	
System of units (0=English, 1=SI) (NUNIT)		1	

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

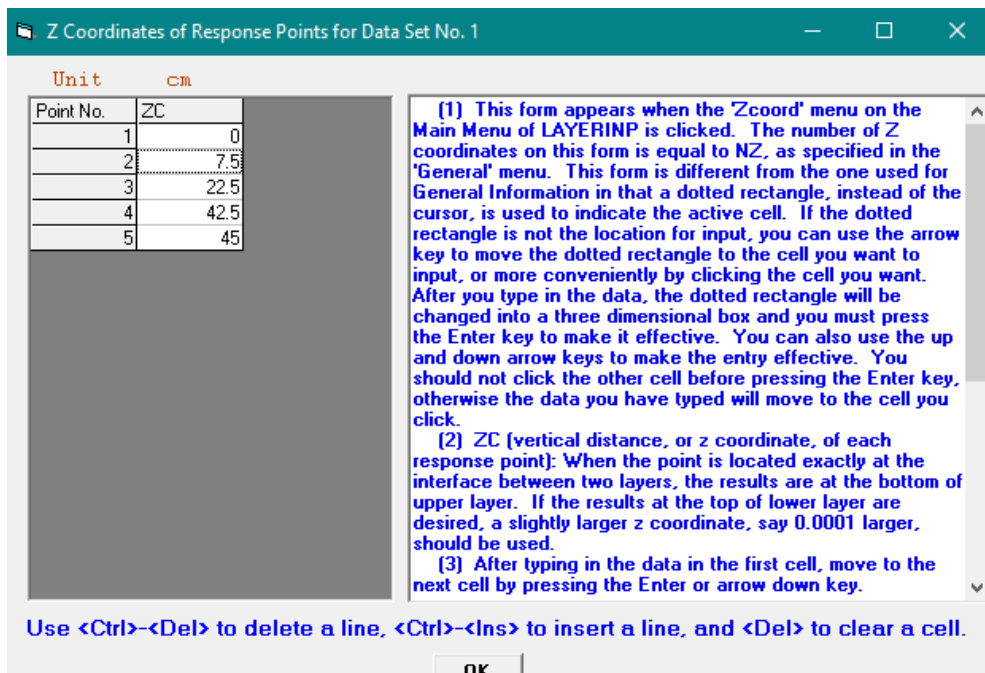
(2) TITLE (title of run): Any title or comment can be typed on one line. The title should not be longer than 68 characters including spaces. If you make a mistake in typing, use the Del key to erase any typographical errors. When the total length reaches 68, no additional characters can be added. No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

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

Gambar 3.10 Tampilan Layar General

3. *Zcoord*

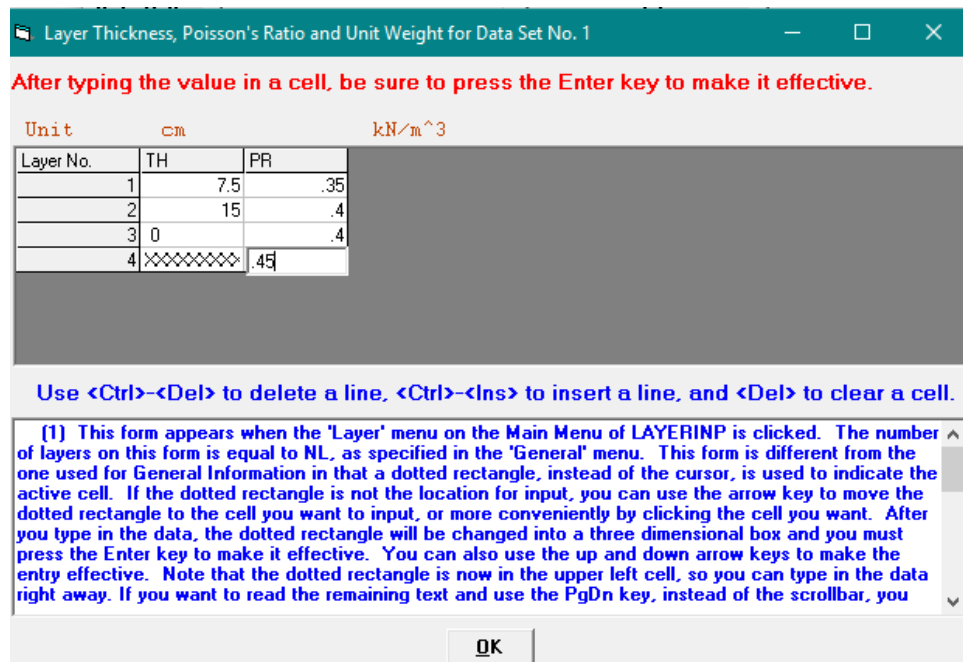
Zcoord adalah menu yang digunakan untuk menganalisis lapis perkerasan pada koordinat Z. Jumlah poin yang ada dalam menu ini sama dengan jumlah NZ pada menu *general*. ZC adalah jarak vertikal atau jarak dalam arah Z yang akan dianalisa program. Menu *Zcoord* dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Tampilan Layar *Zcoord*

4. *Layer*

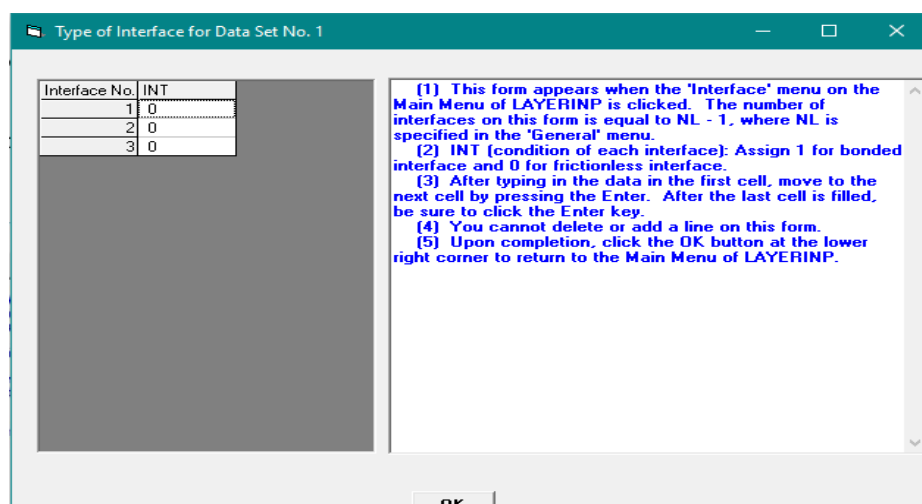
Layer adalah menu yang digunakan untuk memasukkan data berupa jumlah lapisan perkerasan. TH adalah tebal tiap *layer* atau lapis. PR adalah Poisson's Ratio tiap *layer*. Menu *layer* dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Tampilan Layar *Layer*

5. *Interface*

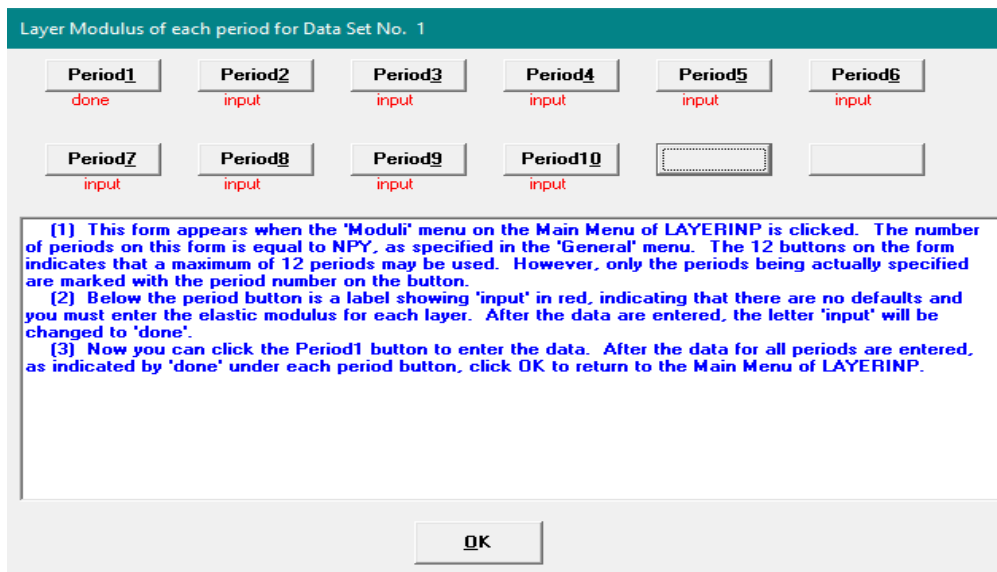
Menu *interface* ini berkaitan dengan NBIND yang ada dalam menu *general*. Jika NBOND=1 maka menu *interface* akan *default* dan tidak dapat dibuka. Jika NBOND=2 maka menu *interface* akan keluar seperti pada gambar 3.13



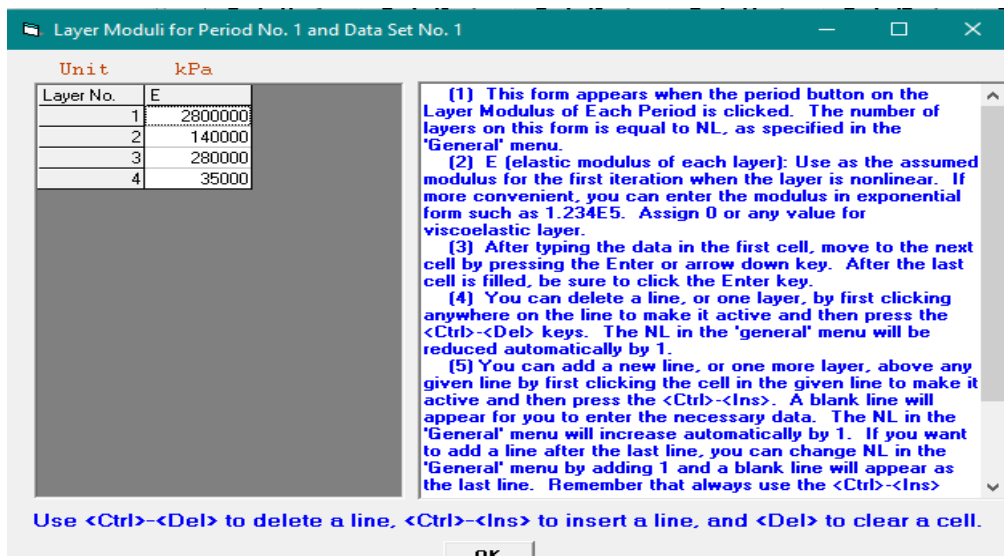
Gambar 3.13 Tampilan Layar *Interface*

6. *Moduli*

Jumlah periode dalam menu ini sama dengan jumlah NPY dalam menu *general*. Maksimal periode dalam menu ini adalah 12. E adalah modulus elastisitas tiap *layer*. Untuk tampilan layar *moduli* dapat dilihat pada Gambar 3.14 dan tampilan layar *moduli for period* pada Gambar 3.15.



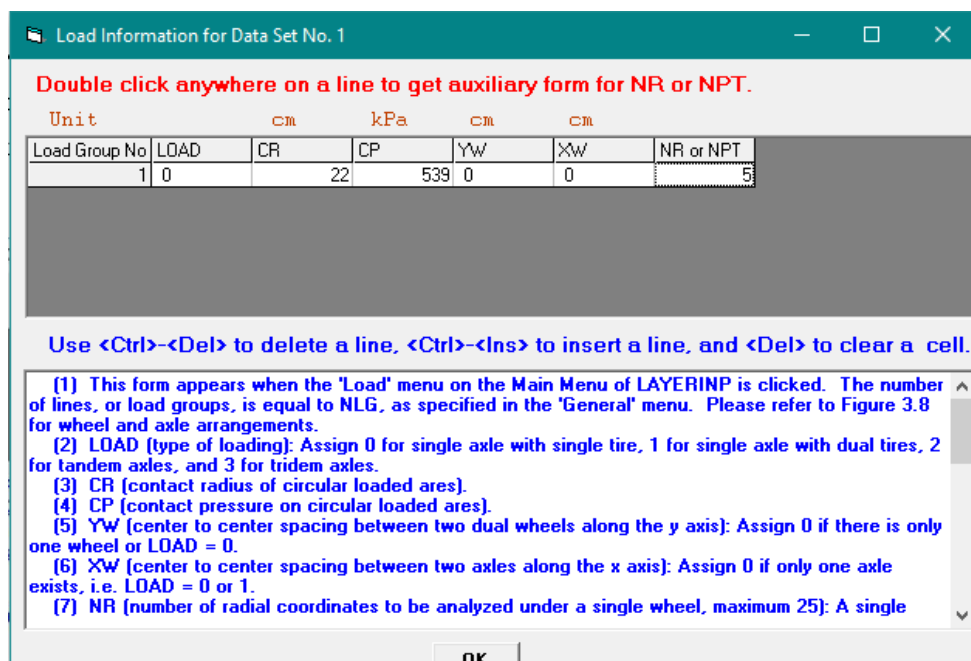
Gambar 3.14 Tampilan Layar *Moduli*



Gambar 3.15 Tampilan Layar *Moduli for Period*

7. *Load*

Jumlah unit yang ada dalam menu ini sama dengan jumlah NPY dalam menu *general*. Untuk kolom *Load* (0) untuk sumbu tunggal roda tunggal, (1) untuk sumbu tunggal roda ganda, (2) untuk sumbu tandem, (3) untuk sumbu triple. Kolom CR adalah radius kontak pembebanan. Kolom CP adalah nilai beban. Kolom YW dan XW merupakan jarak antar roda arah y dan arah x. Jika kolom *load* = 0, maka kolom YW dan XW = 0. NR adalah jumlah koordinat radial yang dianalisis berdasarkan pada satu roda. NPT adalah jumlah titik koordinat x dan y yang dianalisis berdasarkan pada beberapa roda. Untuk tampilan layar menu *load* dapat dilihat pada Gambar 3.16.



Gambar 3.16 Tampilan Layar *Load*

8. Parameter lain seperti *Nonlinier*, *Viscoelastic*, *Damage*, dan *Mohr-Coulomb* akan mengikuti nilai dengan sendirinya sesuai dengan input nilai yang dimasukkan sebelum data ini.

3.7 Analisis Kerusakan Perkerasan

Analisa kerusakan perkerasan jalan yang akan dibahas adalah *fatigue cracking, rutting, depression*. Kerusakan perkerasan disebabkan oleh beban kendaraan. Pada analisis perhitungan dengan metode mekanistik-empiris hasil yang akan dikeluarkan adalah nilai tegangan dan regangan pada perkerasan lentur. Nilai tegangan dan regangan tersebut digunakan untuk memprediksi kerusakan pada perkerasan jalan lentur.

Ada beberapa persamaan untuk memprediksi jumlah repetisi beban, salah satunya yaitu persamaan model *The Asphalt Institute* (Simanjutak, 2014).

3.7.1 Fatigue Cracking

Kerusakan retak lelah meliputi bentuk perkembangan dari retak dibawah beban berulang dan kegagalan ini ditemukan pada saat permukaan perkerasan tertutup oleh retakan dengan presentase yang tinggi. Pembebanan ulang yang terjadi terus menerus dapat menyebabkan material menjadi lelah dan dapat menimbulkan *cracking* walaupun tegangan yang terjadi masih dibawah batas ultimate-nya. Untuk material perkerasan, beban berulang berasal dari lintasan beban (as) kendaraan yang terjadi secara terus menerus, dengan intensitas yang berbeda-beda dan bergantung kepada jenis kendaraan dan terjadi secara acak.

Persamaan retak lelah perkerasan lentur untuk mengetahui jumlah repetisi beban berdasarkan regangan tarik di bawah lapis permukaan adalah sebagai berikut.

$$N_f = 0,0796 (\epsilon_t)^{-3,921} | E |^{-0,854} \quad (3.14)$$

dengan:

N_f = Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *fatigue cracking*,

ϵ_t = Tensile strain di lokasi tinjauan kritis yang dihitung berdasarkan respon model struktur atau regangan tarik pada bagian bawah lapis permukaan

(in/in), dan

$|E^*|$ = Modulus Elastis pada lapis permukaan atau lapisan *HMA*.

3.7.2 *Rutting*

Rutting atau retak alur pada permukaan perkerasan merupakan akumulasi dari semua deformasi plastis yang terjadi, baik dari lapis beraspal, lapis pondasi, dan lapis tanah dasar. Kriteria retak alur merupakan kriteria kedua yang digunakan dalam Metode Analitis–Mekanistik, untuk menyatakan keruntuhan struktur perkerasan akibat beban berulang. Nilai *rutting* maksimum harus dibatasi agar tidak membahayakan pengendara saat melalui lokasi *rutting* tersebut, terutama pada kecepatan tinggi. Deformasi permanen dapat diketahui setiap lapisan dari struktur, membuat retak alur lebih sulit untuk diprediksi dibandingkan retak lelah. Ukuran–ukuran kegagalan yang ada dimaksudkan untuk alur bahwa dapat ditunjukkan kebanyakan pada suatu struktur perkerasan yang lemah. Pada umumnya dinyatakan dengan istilah regangan vertikal (ϵ_v) yang berada di atas dari lapisan tanah dasar.

Persamaan untuk mengetahui jumlah repetisi beban berdasarkan regangan tekan di bawah lapis pondasi bawah adalah sebagai berikut.

$$N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (3.15)$$

dengan:

N_d = jumlah nilai repetisi beban yang diijinkan untuk mengontrol *rutting*,

ϵ_c = regangan tekan vertikal diatas lapisan dasar,

f_5 = koefisien kriteria deformasi permanen, dan

f_4 = koefisien kriteria deformasi permanen.

3.7.3 *Permanent Deformation*

Persamaan *permanent deformation* perkerasan lentur untuk mengetahui jumlah repetisi beban adalah sebagai berikut.

$$Nd = f_4 (\varepsilon_c)^{-f_5} \quad (3.16)$$

dengan :

Nd = jumlah nilai repetisi beban yang diijinkan untuk mengontrol *permanent deformation*,

ε_c = regangan tekan vertikal diatas lapisan dasar,

f_5 = koefesien kriteria deformasi permanen, dan

f_4 = koefesien kriteria deformasi permanen.

Untuk nilai f_4 dan f_5 mengikuti rekomendasi dari Asphalt Institute 1970 dengan nilai $f_4 = 1,365 \times 10^{-9}$ dan $f_5 = 4,477$.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Metode Penelitian

Penyusunan tugas akhir ini menggunakan metode studi kasus dimana pada penelitian ini peneliti ingin mengeksplorasi secara mendalam dari objek studi terkait. Studi kasus merupakan pengujian secara rinci terhadap satu latar atau satu subjek secara intensif dan rinci sehingga nantinya peneliti akan mencapai pemahaman yang mendalam dan tidak sekadar untuk menjelaskan seperti apa objek yang diteliti, tetapi untuk menjelaskan bagaimana keberadaan dan mengapa kasus tersebut dapat terjadi. Dengan kata lain, penelitian studi kasus bukan sekadar menjawab pertanyaan penelitian tentang apa objek yang diteliti, tetapi lebih menyeluruh dan komprehensif lagi adalah tentang bagaimana dan mengapa objek tersebut terjadi dan terbentuk sebagai dan dapat dipandang sebagai suatu kasus.

4.2 Pengumpulan Data

Adapun tahapan dalam proses penelitian yang penting adalah koleksi data, karena hanya dengan mendapatkan data yang tepat maka proses penelitian akan berlangsung sampai peneliti mendapatkan jawaban dari perumusan masalah yang sudah ditetapkan. Data yang kita cari harus sesuai dengan tujuan penelitian. Jenis data yang dapat dipergunakan yakni data primer dan data sekunder. Data primer adalah data yang hanya dapat kita peroleh dari sumber asli atau pertama, sedangkan data sekunder adalah data yang sudah tersedia sehingga kita tinggal mencari dan mengumpulkan. Jika data sekunder dapat kita peroleh dengan lebih mudah dan cepat karena sudah tersedia, misalnya di perpustakaan, perusahaan-perusahaan, organisasi-organisasi perdagangan, biro pusat statistik, dan kantor-kantor pemerintah, maka data primer harus secara langsung kita ambil dari sumber aslinya,

melalui survei langsung di lapangan atau melalui nara sumber yang tepat dan yang kita jadikan responden dalam penelitian kita. Dalam penelitian ini, jenis data yang digunakan adalah data sekunder.

Tahap pengerjaan penelitian meliputi tahap penentuan masalah, penentuan tujuan dan lingkungan studi, pengumpulan data sekunder, kompilasi data, analisis, penentuan hasil dan kesimpulan. Dalam analisis penelitian ini data yang digunakan adalah data sekunder, yang diperoleh dari P2JN Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Adapun data yang digunakan dalam analisis penelitian jalan Legundi-Kanigoro-Planjan yang didapat dari P2JN Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta adalah:

1. peta lokasi,
2. data tanah dasar, yakni *CBR*,
3. data *properties* material, dan
4. data struktur perkerasan jalan, seperti geometri jalan (panjang jalan, lebar jalur, lebar median, bahu jalan, jumlah arah dan jalur jalan).

4.3 Lokasi Studi Kasus

Lokasi yang ditinjau sebagai objek studi kasus dalam penelitian ini adalah Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan Kabupaten Gunung Kidul, Daerah Istimewa Yogyakarta yang dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1 Peta Lokasi Objek Penelitian

(Sumber : Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I. Yogyakarta, 2014)

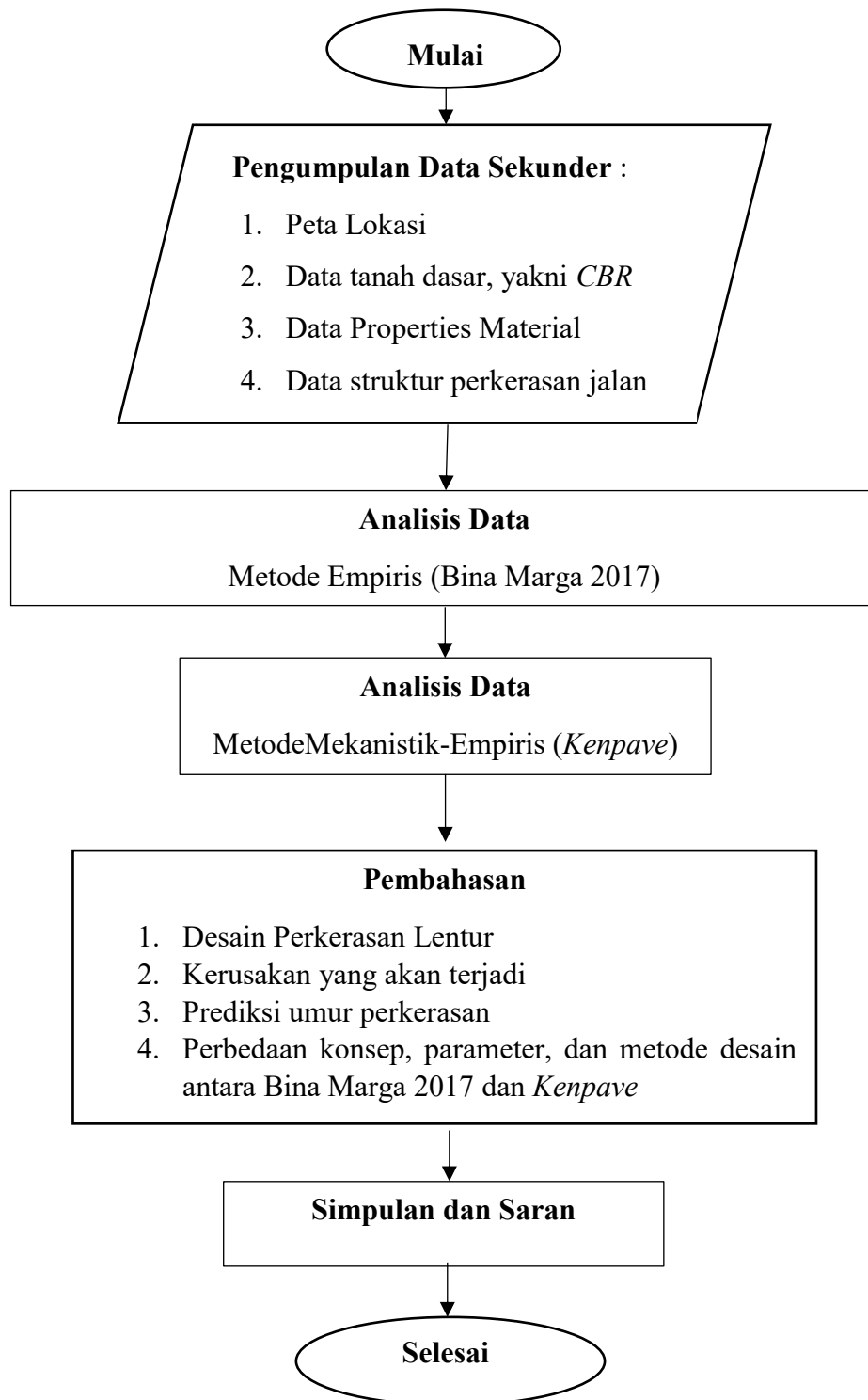
4.4 Prosedur Perancangan

Untuk memudahkan penulis dalam melakukan perhitungan, dibuat bagan alir prosedur perancangan. Beberapa bagan alir dalam penelitian adalah sebagai berikut.

1. Tahapan Penelitian,
2. Prosedur Desain Perkerasan Jalan Lentur Manual Desain Perkerasan Jalan Bina Marga dan,
3. Prosedur Metode *Kenpave*.

4.4.1 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian secara umum dapat dilihat dengan urutan pada bagan alir seperti pada Gambar 4.2 dibawah ini.



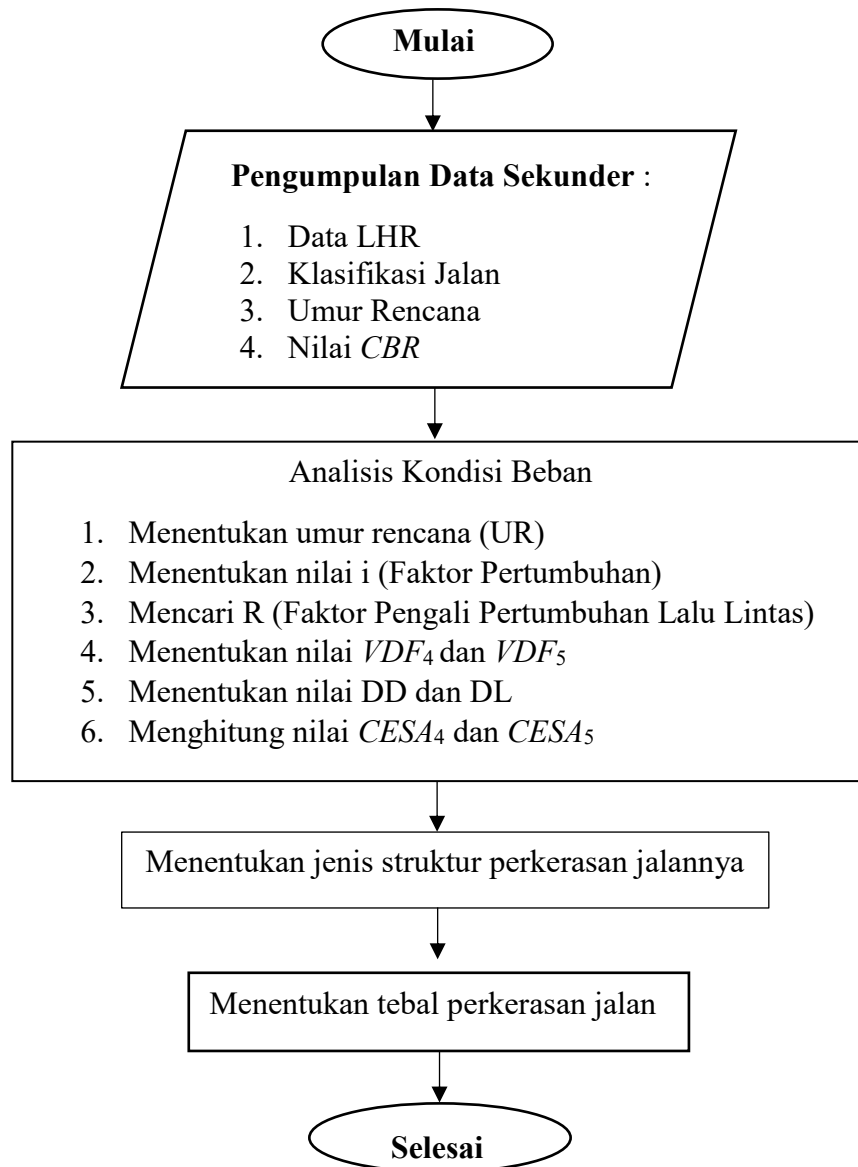
Gambar 4.2 Bagan Alir Tahapan Penelitian

4.4.2 Prosedur Desain Perkerasan Jalan Lentur Bina Marga

Adapun prosedur dalam menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 untuk desain perkerasan lentur adalah sebagai berikut :

1. menentukan umur rencana dengan mempertimbangkan elemen perkerasan berdasarkan analisis *discounted whole of life cost* terendah dari Tabel 3.1,
2. menentukan faktor pengali pertumbuhan lalu lintas (R) ,
3. menentukan nilai VDF ,
4. menentukan nilai faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL),
5. menentukan nilai $CESA$ sesuai dengan umur dan lalu lintas rencana,
6. menentukan jenis perkerasan berdasarkan kemampuan pihak penyedia jasa dan solusi yang lebih diutamakan serta kondisi lingkungan, dan
7. menentukan tebal perkerasan dengan menggunakan $CESA_5$ dengan meninjau dari pertimbangan LPA berdasar nilai CBR .

Adapun agar lebih memudahkan memahami prosedur dalam menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 untuk desain perkerasan lentur maka dibuatkan bagan alir seperti pada Gambar 4.3 berikut.



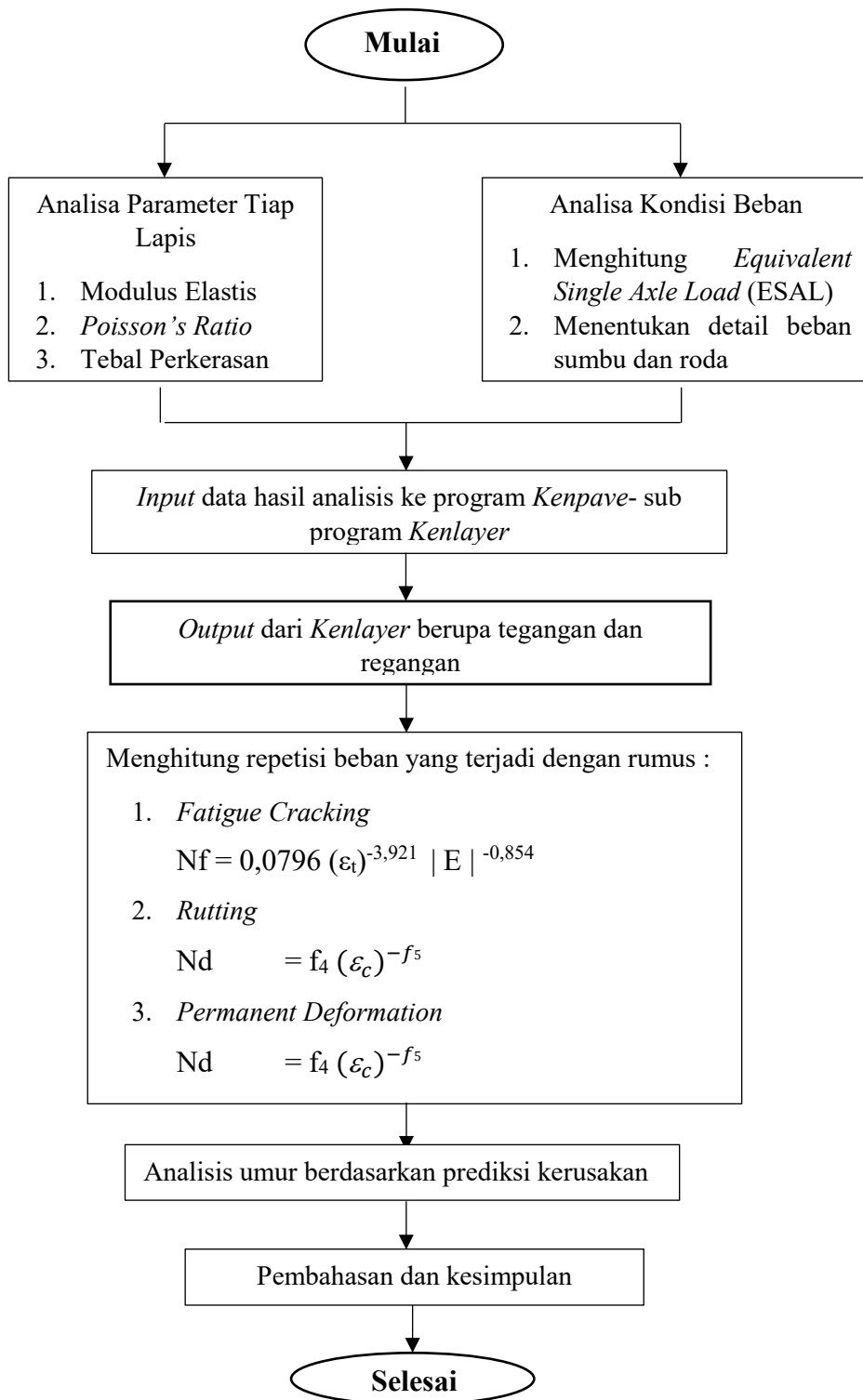
Gambar 4.3 Bagan Alir Desain Perkerasan Jalan Lentur Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017

4.4.3 Prosedur Metode *Kenpave*

Adapun dalam melakukan pemodelan struktur perkerasan dengan program *Kenpave* dan perkerasan lentur dengan *Kenlayer* untuk beban gandar standar, berikut adalah langkah-langkahnya.

1. Menentukan data properties material untuk pemodelan struktur antara lain :
 - a. tebal lapisan tiap perkerasan,
 - b. nilai modulus elastisitas (E) tiap lapis perkerasan,
 - c. nilai *poisson's ratio* tiap lapis perkerasan,
2. Menganalisis data lalu lintas antara lain :
 - a. menentukan periode waktu tinjauan analisis perkerasan,
 - b. menghitung *Equivalent Single Axle Load* (ESAL),
 - c. menentukan detail beban sumbu dan roda,
3. Melakukan pemodelan struktur perkerasan dengan program *Kenpave* dan untuk perkerasan layer menggunakan sub program *Kenlayer*,
4. Menentukan hasil *output* dari program *Kenlayer* digunakan untuk mengetahui respon tegangan-regangan yang terjadi akibat beban lalu lintas, dan
5. Menganalisa repetisi beban lalu lintas yang dihasilkan program *Kenpave* dan menganalisa umur perkerasan.

Adapun agar lebih memudahkan memahami prosedur dalam menggunakan Program *Kenpave* untuk mengetahui perkiraan kerusakan pada perkerasan maka dibuatkan bagan alir seperti pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.4 Bagan Alir Program *Kenpave*

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Penelitian

5.1.1 Data Lalu Lintas

Data lalu lintas ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan adalah data sekunder yang didapat dari laporan satuan kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta tahun anggaran 2016. Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan merupakan rute yang akan dilewati ruas Jalan Yogyakarta-Piyungan jika ingin melewati rute pantura saat arus mudik berlangsung. Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan merupakan jalan nasional dengan lebar jalan 7 meter, memiliki 2 lajur dengan 2 arah. Hasil perhitungan lalu lintas berdasarkan golongan kendaraan dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Perhitungan Lalu Lintas Ruas Jalan Yogyakarta-Piyungan

No	Jenis Kendaraan	LHR 2016
1	Mobil Penumpang, Angkutan Umum, Pick-Up, dll	12737
2	Bus Besar Dan Kecil Golongan 5a	451
3	Bus Besar Dan Kecil Golongan 5b	358
4	Truk 2as Golongan 6a	586
5	Truk 2as Golongan 6b	2181
6	Truk 3as Golongan 7a	187
7	Truk 3as Golongan 7b	23
8	Truk 3as Golongan 7c	56

Sumber : Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I. Yogyakarta (2016)

5.1.2 Data Nilai *CBR*

Data nilai *CBR* adalah data sekunder yang didapat dari Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I. Yogyakarta. Tabel pengujian *CBR* menggunakan *Dinamic Cone Penetrometer* (DCP) dapat dilihat pada Lampiran 2. Nilai *CBR* tanah dasar (*CBR* rendaman) untuk Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan adalah 10,08 %.

5.1.3 Data Tebal Perkerasan Eksisting

Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan merupakan jalan yang mulai dibangun pada tanggal 28 Maret 2014 dan memiliki waktu pelaksanaan selama 240 hari kerja. Sehingga Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan mulai beroperasi terhitung tanggal 28 November 2014 dengan jenis penanganan yaitu pembangunan jalan baru. Berdasarkan data yang didapat dari Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta, tebal perkerasan Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan ini adalah sebagai berikut.

<i>AC-WC</i>	= 4 cm
<i>AC-Base</i>	= 7,5 cm
Lapis Pondasi Agregat kelas A	= 20 cm
Lapis Pondasi Agregat kelas B	= 30 cm

5.2 Desain Perkerasan Lentur

5.2.1 Desain Perkerasan Eksisting

Dengan data tebal perkerasan yang diperoleh dari Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta, maka dapat langsung diolah ke program *Kenpave* untuk mengetahui kerusakan yang akan terjadi.

1. Analisis Data Masukan

a. Menentukan detail beban sumbu dan roda

Dalam perhitungan metode mekanistik empirik dibutuhkan dimensi sumbu kendaraan, tekanan ban, dan jarak ban pada roda ganda. Pada analisis ini nilai detail beban sumbu dan roda diambil berdasarkan Gambar 3.4 yang merupakan data kondisi beban berdasarkan data yang digunakan di Indonesia menurut Sukirman (1993), sebagai berikut.

- 1) Beban kendaraan sumbu standar adalah 18.000 pon atau 8,16 ton,
- 2) Tekanan roda satu ban adalah 0,55 MPa = 5,5 kg/cm²,
- 3) Jari-jari bidang kontak adalah 110 mm atau 11 cm, dan
- 4) Jarak antar masing-masing sumbu roda ganda adalah 33 cm.

b. Menentukan parameter tiap lapis perkerasan

Pada analisis material ini, untuk lapis permukaan dengan bahan material beton aspal merupakan bahan viskoelastik. Sehingga, perhitungan pada mekanistik empirik berdasarkan *creeps compliances*. Pada lapis permukaan digunakan bahan viskoelastik, sedangkan untuk lapis pondasi dan tanah dasar diasumsikan berbahan linier elastik sehingga parameter yang mempengaruhi hanya modulus elastis dan Poisson's Ratio dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Parameter Tiap Lapis Perkerasan

AC-WC	E	1.100.000 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,4
AC-Base	E	1.600.000 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,4
Agregat Kelas A	E	250.000 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,45
Agregat Kelas B	E	150.000 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,45
Subgrade	E	100.800 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,45

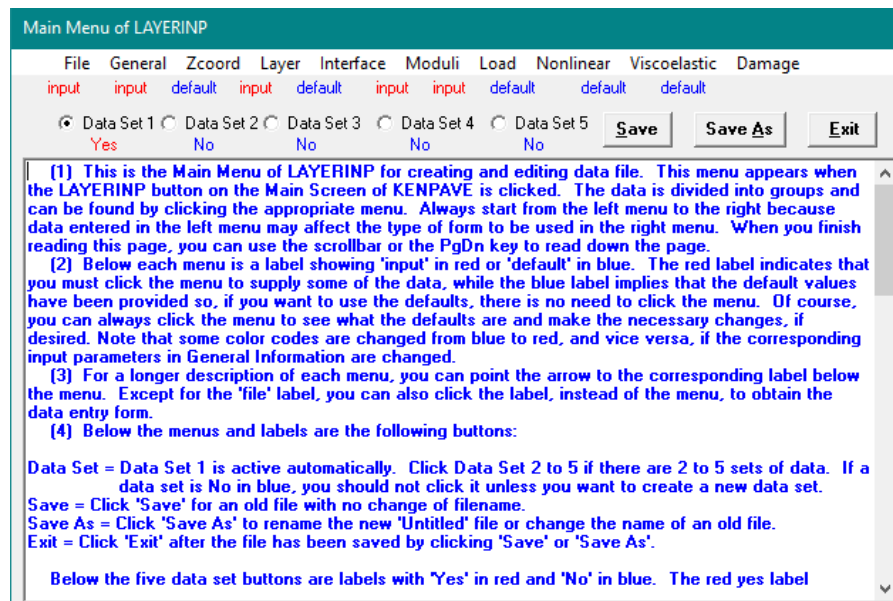
Sumber : Bina Marga (2017)

a. *Input Kenpave*

Berikut ini cara *input* ke program *Kenpave* khususnya *Kenlayer* untuk perhitungan tegangan dan regangan perkerasan lentur.

1) *Layerinp*

Untuk memulai melakukan input data, klik pada bagian menu *Layerinp*.



Gambar 5.1 Tampilan Awal Layerinp

Kemudian klik pada menu *File* lalu pilih *New* untuk memulai *input* data baru.

2) *General*

Data *input General* dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut ini.

Tabel 5.3 Input General

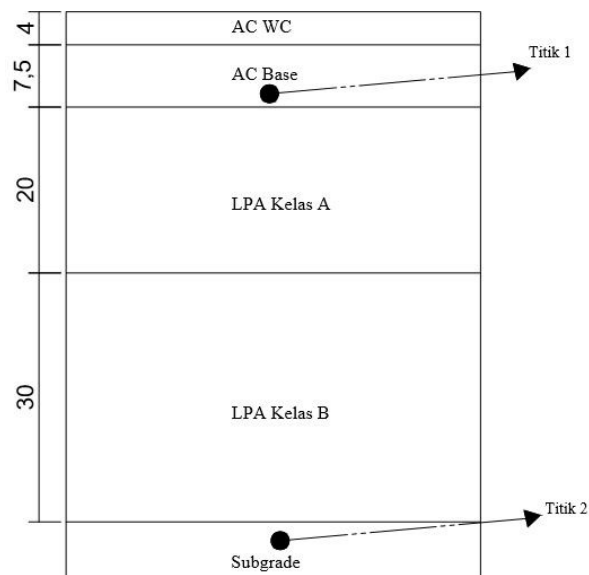
<i>Title</i>	<i>Trial</i>	Diisi nama judul yang diinginkan
MATL	3	Pada lapisan perkerasan adalah <i>viscoelastic</i>
NDAMA	0	Tidak ada analisis kerusakan pada awalnya
NPY	1	Mengikuti <i>Kenpave</i>
NLG	1	Mengikuti <i>Kenpave</i>
DEL	0,001	Standar akurasi
NL	5	Jumlah lapisan perkerasan pada analisis adalah 5 (<i>AC WC, AC Base, LPA A, LPA B, Subgrade</i>)

Lanjutan Tabel 5.3 *Input General*

NZ	5	Jumlah titik kerusakan yang di analisis
ICL	80	Mengikuti <i>Kenpave</i>
NSDT	9	Untuk perpindahan vertikal, nilai tegangan dan nilai regangan
NBOND	1	Semua lapisan saling terikat
NLBT	0	
NLTC	0	
NUNIT	1	Satuan SI (Standar Internasional)

3) *Zcoord*

Pada *Zcoord* data yang dimasukkan adalah kedalaman titik yang akan ditinjau kerusakannya, untuk lebih detailnya dapat dilihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Letak Titik Tinjauan

Dapat dilihat pada Gambar 5.2 diatas, titik nomor satu merupakan titik pada dasar lapisan aspal, titik tersebut adalah letak analisis kerusakan

fatigue cracking (retak lelah) dan *rutting* (alur). Titik nomor dua merupakan titik yang terletak di permukaan lapis *subgrade*, titik tersebut adalah letak analisis kerusakan *permanent deformation* (deformasi permanen). Kedalaman yang ditinjau kerusakannya dapat dilihat pada Tabel 5.4 berikut ini.

Tabel 5.4 Input Zcoord

No	Kedalaman	Keterangan
1	0	Permukaan AC-WC
2	11,497	AC-WC
3	11,5	Permukaan LPA A
4	61,5	Permukaan Subgrade
5	61,503	Subgrade

1) *Layer*

Parameter yang harus dimasukkan ke dalam *Kenlayer* adalah tebal perkerasan dan *Poisson's Ratio*. Untuk nilai kedua parameter tersebut didapatkan dari Bina Marga 2017 dan dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut ini.

Tabel 5.5 Input Parameter Layer

No Layer	Thickness (cm)	Poisson's Ratio	Keterangan
1	4	0,4	AC-WC
2	7,5	0,4	AC-Base
3	20	0,45	LPA A
4	30	0,45	LPA B
5	∞	0,45	<i>Subgrade</i>

2) *Moduli*

Parameter yang harus dimasukkan dalam *Kenlayer* adalah *modulus resilient* atau modulus elastis, untuk nilai modulus elastis yang dipakai adalah nilai dari Metode Bina Marga 2017 dan dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut ini.

Tabel 5.6 Input Moduli

No	E (Kpa)
1	1.100.000
2	1.600.000
3	250.000
4	150.000
5	100.800

3) *Load*

Berikut merupakan cara menentukan masukan *Load* pada *Kenlayer*.

1) *Load* = 1 (*single axle load*, roda gandar ganda)

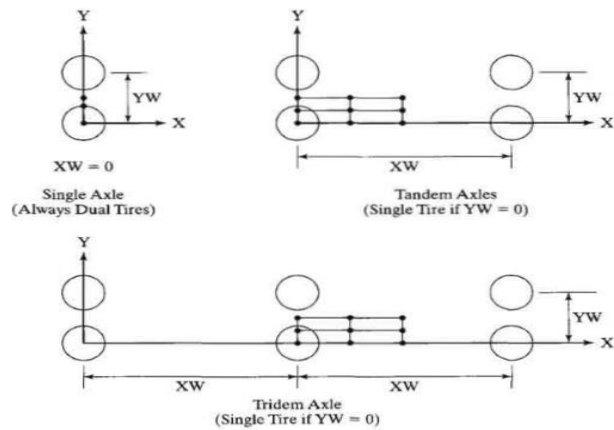
2) CR

Berdasarkan nilai jarak antar ban = 11 cm

3) CP

Berdasarkan nilai tekanan ban = 0,55 Mpa = 550 Kpa

4) YW dan XW



Gambar 5.3 Plan View Multiple Wheels

(Sumber : Huang, 2004)

Pada analisis ini karena merupakan roda single axle with dual tires, maka nilai YW sebesar 33 dan XW sebesar 0.

5) NPT

Nilai NPT adalah 3, karena koordinat yang ditinjau adalah 3. Sehingga, nilai koordinat X dan Y dapat dilihat pada Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Input NPT

No	Koordinat
1	0
2	10
3	16,5

4) *Viscoelastic*

1. *General*

Load Duration (DUR) = 0,1

Number of viscoelastic layers = 2

Number of time durations for creep compliances = 11

2. *Time*

Creep Compliances diukur dengan 11 variasi waktu antara lain dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut ini.

Tabel 5.8 Time Durations for Creep Compliances

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

Sumber : Huang (2004)

3. *Layer*

Nilai beta (β) = 0,113 (Huang, 2004)

Temperature = 25°C

4. *Creep Compliances*

Pada menu *creep*, nilai-nilai angka *creep compliances* akan secara otomatis terisi pada menu ini. Nilai *creep compliances* adalah sama dengan NTYME pada *Viscoelastic General Information*. Satuan waktu pada NTYME akan dikonversikan secara otomatis ke kPa di menu ini. Untuk nilai *creep compliances* dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut ini.

Tabel 5.9 Nilai Creep Compliances

<i>Time</i>	<i>Creep</i>
0,001	3×10^{-10}
0,003	9×10^{-10}
0,01	3×10^{-9}
0,03	9×10^{-9}
0,1	$2,9 \times 10^{-8}$
0,3	$8,02 \times 10^{-8}$
1	$2,05 \times 10^{-7}$
3	$3,33 \times 10^{-7}$
10	$3,63 \times 10^{-7}$
30	$3,63 \times 10^{-7}$
100	$3,63 \times 10^{-7}$

Sumber : Huang (2004)

5. *Temperature*

Pada menu temperatur sama dengan temperatur pada menu *layer* yakni 25°C.

Data yang telah diisi pada semua tampilan menu, selanjutnya disimpan kemudian kembali ke menu utama. Data akan dieksekusi dengan klik menu *Kenlayer*. Setelah itu kembali ke menu utama dan untuk melihat hasil nilai tegangan dan regangan pilih menu *Editor*, buka nama file untuk melihat hasilnya.

3. Hasil Analisis *Kenlayer*

Output analisis menggunakan *Kenlayer* adalah nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada perkerasan lentur jalan. Hasil analisis *Kenlayer* ini untuk *single axle load* (roda gandar tunggal), respon yang dapat diidentifikasi dan dapat di analisis hanya *vertical compressive strain* yang terdapat pada permukaan tanah dasar dan radial (*tangential*) *tensile strain* yang terletak di

bawah aspal. Tegangan dan regangan yang ada pada Tabel 5.10 didapat ketika struktur perkerasan jalan sudah dibebani. Nilai tegangan dan regangan pada Tabel 5.11 merupakan nilai rekapitulasi tegangan dan regangan terbesar tiap *layer* dari sub program *Kenlayer*.

Tabel 5.10 Hasil dari Perhitungan *Kenlayer*

No	Koordinat Vertikal	Displacement Vertikal, (Regangan Horizontal)	Tegangan Vertikal (Regangan)	
1	0	0,0340	550.000	
		$3,077 \times 10^{-5}$	$-4,207 \times 10^{-5}$	
	11,497	0,02974	69,873	
		$-1,348 \times 10^{-4}$	$1,688 \times 10^{-4}$	
	11,5	0,02974	69,865	
		$-1,348 \times 10^{-4}$	$1,688 \times 10^{-4}$	
	61,5	0,01976	18,430	
		$-8,247 \times 10^{-5}$	$1,574 \times 10^{-4}$	
	61,503	0,01976	18,429	
		$-8,247 \times 10^{-5}$	$1,732 \times 10^{-4}$	
	2	0	0,03138	550.000
			$2,787 \times 10^{-5}$	$-4,142 \times 10^{-5}$
11,497		0,03075	70,985	
		$-1,414 \times 10^{-4}$	$1,657 \times 10^{-4}$	
11,5		0,03075	70,978	
		$-1,414 \times 10^{-4}$	$1,657 \times 10^{-4}$	
61,5		0,02014	19,304	
		$-8,509 \times 10^{-5}$	$1,664 \times 10^{-4}$	
61,503		0,02014	19,303	
		$-8,509 \times 10^{-5}$	$1,829 \times 10^{-4}$	
3		0	0,03169	0,000
			$2,603 \times 10^{-5}$	$-4,220 \times 10^{-5}$
	11,497	0,03089	69,670	
		$-1,414 \times 10^{-4}$	$1,593 \times 10^{-4}$	
	11,5	0,03089	69,670	
		$-1,414 \times 10^{-4}$	$1,593 \times 10^{-4}$	
	61,5	0,02022	19,469	
		$-8,558 \times 10^{-5}$	$1,680 \times 10^{-4}$	
	61,503	0,02022	19,468	
		$-8,577 \times 10^{-5}$	$1,847 \times 10^{-4}$	

Tabel 5.11 Rekapitulasi Hasil dari Perhitungan *Kenlayer*

Beban	<i>Vertical Stress</i> (kPa) 11,497 cm	<i>Vertical Stress</i> (kPa) 61,503 cm	<i>Tangential Stress</i> (kPa) 11,497 cm
	0,0001688	0,0001732	0,0001348
	0,0001657	0,0001829	0,0001414
	0,0001593	0,0001847	0,0001414
Max	0,0001688	0,0001847	0,0001414

4. Parameter untuk Kontrol Prediksi Umur Pelayanan Jalan

Setelah nilai tegangan dan regangan diperoleh, yang dilakukan selanjutnya adalah analisis kerusakan *fatigue cracking*, *permanent deformation* dan *rutting* sebagai parameter untuk kontrol prediksi umur pelayanan jalan. Kontrol dilakukan dengan cara menghitung nilai Nf (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *fatigue cracking*) dan Nd (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *permanent deformation* dan *rutting*) harus lebih besar dari *CESA* yang telah diprediksi. Untuk nilai f_4 dan f_5 mengikuti rekomendasi dari Asphalt Institute.

a. Perhitungan nilai Nf dan Nd

Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *fatigue cracking*.

$$\begin{aligned}
 N_f &= 0,0796 (\epsilon_t)^{-3,921} | E^* |^{-0,854} \\
 &= 0,0796 (1,414 \times 10^{-4})^{-3,921} | 1.600.000 |^{-0,854} \\
 &= 497.373.300 \text{ Esal}
 \end{aligned}$$

Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *rutting*.

$$\begin{aligned}
 N_d &= f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \\
 &= 1,365 \times 10^{-9} \times (1,688 \times 10^{-4})^{-4,477} \\
 &= 105.970.803 \text{ Esal}
 \end{aligned}$$

Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *permanent deformation*.

$$\begin{aligned} Nd &= f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \\ &= 1,365 \times 10^{-9} \times (1,847 \times 10^{-4})^{-4,477} \\ &= 70.820.724 \text{ Esal} \end{aligned}$$

5. Kontrol prediksi umur pelayanan jalan dengan Metode *Kenpave*

Dari hasil analisis program *Kenlayer* didapatkan bahwa perkerasan Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan akan mengalami kerusakan *fatigue cracking* setelah dilewati beban repetisi sebanyak 497.373.300 Esal, kerusakan *rutting* setelah dilewati beban repetisi sebanyak 105.970.803 Esal, dan *permanent deformation* sebanyak 70.820.724 Esal. Sebagai kontrol prediksi umur pelayanan maka digunakan kerusakan yang memiliki daya tahan paling sedikit setelah dilewati beban repetisi yaitu kerusakan *permanent deformation* (Nd). Setelah itu, dengan nilai *CESA* pada kerusakan *permanent deformation* dapat diperoleh umur perkerasan dengan data-data yang ada di Bina Marga 2017, seperti LHR, *VDF*, faktor distribusi arah, faktor distribusi lajur dan juga nilai faktor pertumbuhan lalu lintas. Berikut uraiannya.

$$\begin{aligned} CESA &= \sum (\text{LHRT}_{\text{jenis kendaraan}} \times VDF) \times 365 \times DD \times DL \times \frac{(1+0,01i)^{UR-1}}{0,01i} \\ 70.820.724 &= [12737 \times 0,365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [451 \times 0,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [358 \times 1 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [586 \times 0,55 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [2181 \times 5,1 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [187 \times 6,4 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \end{aligned}$$

$$\left[23 \times 13 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}\right] +$$

$$\left[56 \times 9,7 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}\right] +$$

UR = 18 tahun

5.2.2 Desain Perkerasan Alternatif

1. Metode Bina Marga 2017

Perancangan kebutuhan lapis perkerasan lentur menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 memerlukan beberapa tahap penyelesaian.

Adapun tahapan dari metode ini adalah :

a. umur rencana jalan

Berdasarkan Tabel 3.1, untuk jenis perkerasan lentur dengan elemen perkerasan aspal menggunakan umur rencana 20 tahun dari tahun 2014 sehingga akan habis masa pelayanan pada tahun 2033.

b. nilai faktor laju pertumbuhan lalu lintas (i)

Berdasarkan Tabel 3.2, dapat dilihat bahwa Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan termasuk pada kelas arteri perkotaan daerah Jawa sehingga faktor pertumbuhan lalu lintas (i) adalah 4,80%.

c. nilai faktor pengali pertumbuhan lalu lintas

Untuk menghitung pertumbuhan lalu lintas selama umur rencana dapat dihitung sebagai berikut.

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

$$= \frac{(1+0,01 \cdot 5)^{20}-1}{0,01 \cdot 5}$$

$$= 32,37558$$

d. nilai faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur (DL)

Beban lalu lintas pada lajur rencana dinyatakan dalam kumulatif beban gandar standar (ESA) dengan memperhitungkan faktor distribusi arah (DD)

dan faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL). Untuk Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan yang menggunakan sistem dua arah, faktor distribusi arah (DD) umumnya diambil 0,50. Sedangkan untuk faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL), Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan bernilai 1 didasarkan pada Tabel 3.3 adalah 100% karena jumlah lajur per arah adalah 1.

e. perkiraan faktor ekivalen beban (*Vehicle Damage Factor*)

Untuk menghitung faktor kerusakan jalan atau yang biasa disebut dengan *Vehicle Damage Factor (VDF)* perlu diperoleh gambaran tentang beban sumbu kendaraan dan konfigurasi sumbu kendaraan yang ada. Pada Manual Desain Perkerasan Jalan Lentur No 02/M/BM/2017, *VDF* dibedakan menjadi VDF^4 dan VDF^5 sehingga nantinya akan membedakan hasil Beban sumbu standar kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESA)* menjadi $CESA_4$ dan $CESA_5$. $CESA_4$ digunakan untuk menentukan pemilihan jenis perkerasan sedangkan $CESA_5$ digunakan untuk menentukan tebal perkerasan lentur berdasarkan bagan desain yang disediakan Manual Desain Perkerasan Jalan Lentur No 02/M/BM/2017. Untuk menentukan nilai *VDF* dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis kendaraan yang dapat kita lihat pada Tabel 3.5. Berdasarkan Tabel 3.5 dapat disimpulkan bahwa masing-masing klasifikasi tiap kelas jalan memiliki VDF_4 dan VDF_5 yang berbeda-beda dan dapat dilihat pada Tabel 5.12 berikut ini.

Tabel 5.12 Rekapitulasi Nilai VDF_4 dan VDF_5

Kode	Jenis Kendaraan	VDF_4	VDF_5
2,3,4	Sepeda Motor, Mobil Penumpang, Angkutan Umum, Pick-Up, dll	0	0
5a	Bus Besar Dan Kecil Golongan 5a	0,3	0,2
5b	Bus Besar Dan Kecil Golongan 5b	1	1

Lanjutan Tabel 5.12 Rekapitulasi Nilai VDF_4 dan VDF_5

Kode	Jenis Kendaraan	VDF_4	VDF_5
6a	Truk 2as Golongan 6a	0,55	0,55
6b	Truk 2as Golongan 6b	4	5,1
7a	Truk 3as Golongan 7a	4,7	6,4
7b	Truk 3as Golongan 7b	9,4	13
7c	Truk 3as Golongan 7c	7,4	9,7

Sumber : Bina Marga (2017)

Dari data-data diatas maka dapat dicari rencana jumlah kendaraan dalam periode 20 tahun. Berikut ini adalah contoh perhitungan kendaraan pada golongan 5a.

$$\begin{aligned}
 ESA_4 &= (\sum_{\text{jenis kendaraan}} LHRT \times VDF_4) \times 365 \times DD \times DL \times R \\
 &= (451 \times 0,3) \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 32,37558 \\
 &= 799425,9939
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ESA_5 &= (\sum_{\text{jenis kendaraan}} LHRT \times VDF_5) \times 365 \times DD \times DL \times R \\
 &= (451 \times 0,2) \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 32,37558 \\
 &= 532950,6626
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan beban selanjutnya dan tahun berikutnya dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut ini.

Tabel 5.13 Prediksi Jumlah Kendaraan Selama Umur Perkerasan

Jenis Kendaraan		LHR	R	Jml Hari	DD	DL	VDF_4	VDF_5	Esal ₄	Esal ₅
Gol 1,2 ,3,4	12737	12737	32,37558	365	0,5	0	0	0	0	0
Gol 5a	451	451	32,37558	365	0,5	0,3	0,3	0,2	799425,9939	532950,6626
Gol 5b	358	358	32,37558	365	0,5	1	1	1	2115258,727	2115258,727
Gol 6a	586	586	32,37558	365	0,5	0,55	0,55	0,55	1904323,709	1904323,709
Gol 6b	2181	2181	32,37558	365	0,5	4	4	5,1	51546137,26	65721325
Gol 7a	187	187	32,37558	365	0,5	4,7	4,7	6,4	5193019,261	7071345,377
Gol 7b	23	23	32,37558	365	0,5	9,4	9,4	13	1277427,198	1766654,636
Gol 7c	56	56	32,37558	365	0,5	7,4	7,4	9,7	2448500,605	3209521,064
<i>CESA</i>									65284092,75	82321379,18

Maka dari perhitungan seperti yang tampak pada Tabel 5.6 di atas didapat nilai :

1. $CESA_4 = 65284092,75$ Esal
2. $CESA_5 = 82321379,18$ Esal

f. menentukan tipe perkerasan

Pemilihan jenis perkerasan akan bervariasi sesuai dengan estimasi lalu lintas dan umur rencana. Berdasarkan hasil beban sumbu standar kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESA)* yang diperoleh sebelumnya, maka dapat dilakukan penentuan jenis perkerasan. Dengan nilai $CESA_4$ sebesar 65284092,75 Esal jika dimasukkan ke dalam Tabel 3.6, jenis perkerasan yang didapat adalah AC WC modifikasi dengan CTB (ESA pangkat 5) dengan syarat menggunakan kontraktor besar dengan sumber daya yang memadai. Aspal modifikasi direkomendasikan digunakan untuk lapis aus (*wearing course*) untuk jalan dengan repetisi lalu lintas selama 20 tahun melebihi 10 juta ESA. Tujuan dari penggunaan bahan pengikat aspal modifikasi adalah untuk memperpanjang umur pelayanan dan umur *fatigue* dan ketahanan deformasi lapis permukaan akibat lalu lintas berat.

g. mendesain tebal perkerasan jalan

Berdasarkan Tabel 3.7 maka dengan nilai $CESA_5$ sebesar 82321379,18 Esal, dapat diperoleh tebal perkerasan sebagai berikut

AC WC = 4 cm

AC BC = 6 cm

AC Base = 21 cm

LPA Kelas A = 30 cm

Nilai tebal perkerasan diatas dapat disesuaikan dengan tebal lapis pondasi agregat kelas A pada Tabel 3.14 untuk tanah dasar yang memiliki nilai $CBR \geq 7\%$. Dengan nilai CBR sebesar 10,08 maka dapat dilakukan penyesuaian tebal lapis pondasi agregat A untuk tanah dasar $CBR > 10\%$ sehingga tebal LPA yang semula 300 mm menjadi 150 mm. Berikut tebal perkerasan setelah mengalami penyesuaian lapis pondasi agregat.

AC WC = 4 cm

AC BC = 6 cm

AC Base = 21 cm

LPA Kelas A = 15 cm

1. Metode *Kenpave*

a. Analisis Data Masukan

1) Menentukan detail beban sumbu dan roda

Pada analisis ini nilai detail beban sumbu dan roda diambil berdasarkan Gambar 3.4 yang merupakan data kondisi beban berdasarkan data yang digunakan di Indonesia menurut Sukirman (1993), sebagai berikut :

- a) Beban kendaraan sumbu standar adalah 18.000 pon atau 8,16 ton
- b) Tekanan roda satu ban adalah 0,55 MPa = 5,5 kg/cm²
- c) Jari-jari bidang kontak adalah 110 mm atau 11 cm
- d) Jarak antar masing-masing sumbu roda ganda adalah 33 cm

2) Menentukan parameter tiap lapis perkerasan

Pada lapis permukaan digunakan bahan viskoelastik, sedangkan untuk lapis pondasi dan tanah dasar diasumsikan berbahan linier elastik sehingga parameter yang mempengaruhi hanya modulus elastis dan Poisson's Ratio dapat dilihat pada Tabel 5.14 berikut.

Tabel 5.14 Rekapitulasi Parameter Tiap Lapis Perkerasan

AC-BC	MR	1.200.000 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,4
AC-Base	MR	1.600.000 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,4
Agregat Kelas A	MR	250.000 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,45
Subgrade	MR	100.800 kpa
	<i>Poisson Ratio</i>	0,45

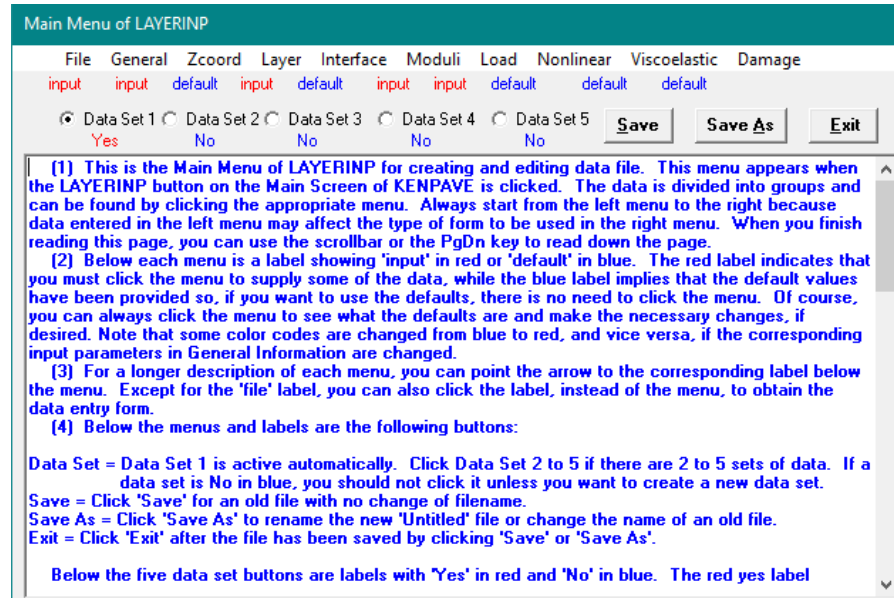
Sumber : Bina Marga (2017)

b. *Input Kenpave*

Berikut ini cara *input* ke program *Kenpave* khususnya *Kenlayer* untuk perhitungan tegangan dan regangan perkerasan lentur.

1) *Layerinp*

Untuk memulai melakukan input data, klik pada bagian menu *Layerinp*.



Gambar 5.4 Tampilan Awal *Layerinp*

Kemudian klik pada menu *File* lalu pilih *New* untuk memulai *input* data baru.

2) *General*

Data *input General* dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut ini.

Tabel 5.15 *Input General*

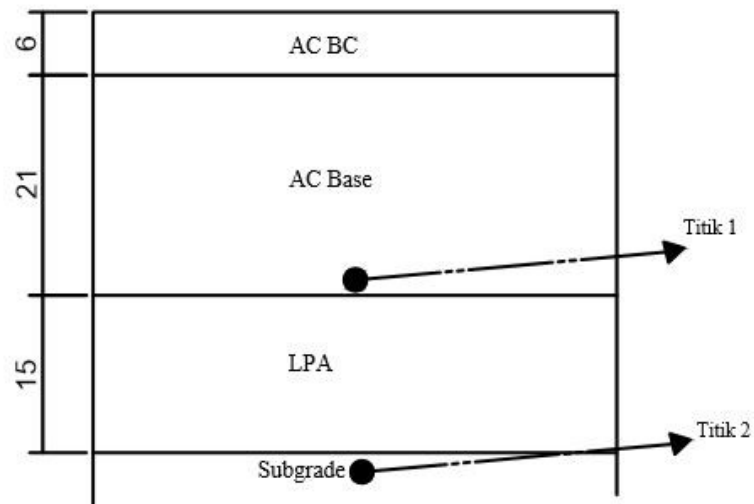
<i>Title</i>	<i>Trial</i>	Diisi nama judul yang diinginkan
MATL	3	Pada lapis perkerasan adalah <i>viscoelastic</i>
NDAMA	0	Tidak ada analisis kerusakan pada awalnya
NPY	1	Mengikuti <i>Kenpave</i>
NLG	1	Mengikuti <i>Kenpave</i>
DEL	0,001	Standar akurasi
NL	4	Jumlah lapisan perkerasan pada analisis adalah 4 (<i>AC BC, AC Base, LPA, Subgrade</i>)

Lanjutan Tabel 5.15 *Input General*

NZ	7	Jumlah titik kerusakan yang di analisis
ICL	80	Mengikuti <i>Kenpave</i>
NSDT	9	Untuk perpindahan vertikal, nilai tegangan dan nilai regangan
NBOND	1	Semua lapisan saling terikat
NLBT	0	
NLTC	0	
NUNIT	1	Satuan SI (Standar Internasional)

3) *Zcoord*

Pada *Zcoord* data yang dimasukkan adalah kedalaman titik yang akan ditinjau kerusakannya, untuk lebih detailnya dapat dilihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5 Letak Titik Tinjauan Kerusakan

Dapat dilihat pada Gambar 5.5 diatas, titik nomor satu merupakan titik pada dasar lapisan aspal, titik tersebut adalah letak analisis kerusakan *fatigue cracking* (retak lelah) dan *rutting* (alur). Titik nomor dua

merupakan titik yang terletak di permukaan lapis *subgrade*, titik tersebut adalah letak analisis kerusakan *permanent deformation* (deformasi permanen). Kedalaman yang ditinjau kerusakannya dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut ini.

Tabel 5.16 Input Zcoord

No	Kedalaman	Keterangan
1	0	Permukaan AC-BC
2	5,997	AC-BC
3	6	Permukaan AC-Base
4	26,997	AC-Base
5	27	Lapis Pondasi Agregat Kelas A
6	42	Permukaan Subgrade
7	42,003	Subgrade

4) *Layer*

Parameter yang harus dimasukkan ke dalam *Kenlayer* adalah tebal perkerasan dan *Poisson's Ratio*. Untuk nilai kedua parameter tersebut didapatkan dari Bina Marga 2017 dan dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut ini.

Tabel 5.17 Input Parameter Layer

No Layer	Thickness (cm)	Poisson's Ratio	Keterangan
1	6	0,4	AC-BC
2	21	0,4	AC-Base
3	15	0,45	LPA
4	∞	0,45	<i>Subgrade</i>

AC-WC tidak termasuk dalam permodelan, karena lapis AC-WC tidak berpengaruh pada nilai struktural.

5) *Moduli*

Parameter yang harus dimasukkan dalam *Kenlayer* adalah *modulus resilient* atau modulus elastis, untuk nilai modulus elastis yang dipakai adalah nilai dari Metode Bina Marga 2017 dan dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut ini.

Tabel 5.18 *Input Moduli*

No	E (Kpa)
1	1.200.000
2	1.600.000
3	250.000
4	100.800

6) *Load*

Berikut merupakan cara menentukan masukan *Load* pada *Kenlayer*.

a) *Load* = 1 (*single axle load*, roda gandar ganda)

b) CR

Berdasarkan nilai jarak antar ban = 11 cm

c) CP

Berdasarkan nilai tekanan ban = 0,55 Mpa = 550 Kpa

d) YW dan XW

Pada analisis ini karena merupakan roda *single axle with dual tires*, maka nilai YW sebesar 33 dan XW sebesar 0.

e) NPT

Nilai NPT adalah 3, karena koordinat yang ditinjau adalah 3. Sehingga, nilai koordinat X dan Y dapat dilihat pada Tabel 5.19.

Tabel 5.19 Input NPT

No	Koordinat
1	0
2	10
3	16,5

7) *Viscoelastic*

a) *General*

Load Duration (DUR) = 0,1

Number of viscoelastic layers = 2

Number of time durations for creep compliances = 11

b) *Time*

Creep Compliances diukur dengan 11 variasi waktu antara lain dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut ini.

Tabel 5.20 Time Durations for Creep Compliances

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

Sumber : Huang (2004)

c) *Layer*

Nilai beta (β) = 0,113 (Huang, 2004)

Temperature = 25°C

d) *Creep Compliances*

Pada menu *creep*, nilai-nilai angka *creep compliances* akan secara otomatis terisi pada menu ini. Nilai *creep compliances* adalah sama dengan NTYME pada *Viscoelastic General Information*. Satuan waktu pada NTYME akan dikonversikan secara otomatis ke kPa di menu ini. Untuk nilai *creep compliances* dapat dilihat pada Tabel 5.21 berikut ini.

Tabel 5.21 Nilai *Creep Compliances*

<i>Time</i>	<i>Creep</i>
0,001	3×10^{-10}
0,003	9×10^{-10}
0,01	3×10^{-9}
0,03	9×10^{-9}
0,1	$2,9 \times 10^{-8}$
0,3	$8,02 \times 10^{-8}$
1	$2,05 \times 10^{-7}$
3	$3,33 \times 10^{-7}$
10	$3,63 \times 10^{-7}$
30	$3,63 \times 10^{-7}$
100	$3,63 \times 10^{-7}$

Sumber : Huang (2004)

e) *Temperature*

Pada menu temperatur sama dengan temperatur pada menu *layer* yakni 25°C.

Data yang telah diisi pada semua tampilan menu, selanjutnya disimpan kemudian kembali ke menu utama. Data akan dieksekusi dengan klik menu *Kenlayer*. Setelah itu kembali ke menu utama dan untuk melihat hasil nilai tegangan dan regangan pilih menu *Editor*, buka nama file untuk melihat hasilnya.

3. Hasil Analisis *Kenlayer*

Output analisis menggunakan *Kenlayer* adalah nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada perkerasan lentur jalan. Hasil analisis *Kenlayer* ini untuk *single axle load* (roda gandar tunggal), respon yang dapat diidentifikasi dan dapat di analisis hanya *vertical compressive strain* yang terdapat pada permukaan tanah dasar dan radial (*tangential*) *tensile strain* yang terletak di bawah aspal. Tegangan dan regangan yang ada pada Tabel 5.22 didapat ketika struktur perkerasan jalan sudah dibebani. Nilai tegangan dan regangan pada Tabel 5.23 merupakan nilai rekapitulasi tegangan dan regangan terbesar tiap *layer* dari sub program *Kenlayer*.

Tabel 5.22 Hasil dari Perhitungan *Kenlayer*

No	Koordinat Vertikal	Displacement Vertikal, (Regangan Horizontal)	Tegangan Vertikal (Regangan)
1	0	0,01584	550,000
		$1,01 \times 10^{-5}$	$-1,327 \times 10^{-5}$
	5,997	0,01597	79,965
		$-1,677 \times 10^{-5}$	$1,861 \times 10^{-5}$
	6	0,01597	79,950
		$-1,679 \times 10^{-5}$	$1,863 \times 10^{-5}$
	26,997	0,01515	14,603
		$-3,738 \times 10^{-5}$	$4,764 \times 10^{-5}$
	27	0,01515	14,601
		$-3,739 \times 10^{-5}$	$4,764 \times 10^{-5}$
	42	0,01422	9,161
		$-3,493 \times 10^{-5}$	$6,222 \times 10^{-5}$
	42,003	0,01422	9,160
		$-3,493 \times 10^{-5}$	$7,652 \times 10^{-5}$

Lanjutan Tabel 5.22 Hasil dari Perhitungan *Kenlayer*

No	Koordinat Vertikal	Displacement Vertikal, (Regangan Horizontal)	Tegangan Vertikal (Regangan)
2	0	0,021	550,000
		$1,543 \times 10^{-5}$	$-2,128 \times 10^{-5}$
	5,997	0,02123	107,068
		$-2,367 \times 10^{-5}$	$2,551 \times 10^{-5}$
	6	0,02123	107,049
		$-2,369 \times 10^{-5}$	$2,553 \times 10^{-5}$
	26,997	0,01976	26,288
		$-7,195 \times 10^{-5}$	$9,741 \times 10^{-5}$
	27	0,01976	26,285
		$-7,196 \times 10^{-5}$	$9,741 \times 10^{-5}$
	42	0,01780	16,508
		$-7,336 \times 10^{-5}$	$1,330 \times 10^{-4}$
	42,003	0,0178	16,508
		$-7,335 \times 10^{-5}$	$1,587 \times 10^{-4}$
3	0	0,01910	0,000
		$1,271 \times 10^{-5}$	$-1,765 \times 10^{-5}$
	5,997	0,01943	88,984
		$-2,082 \times 10^{-5}$	$1,989 \times 10^{-5}$
	6	0,01943	88,973
		$-2,085 \times 10^{-5}$	$1,992 \times 10^{-5}$
	26,997	0,0182	22,529
		$-6,149 \times 10^{-5}$	$8,133 \times 10^{-5}$
	27	0,0182	22,527
		$-6,150 \times 10^{-5}$	$8,135 \times 10^{-5}$
	42	0,01658	14,060
		$-6,139 \times 10^{-5}$	$1,097 \times 10^{-4}$
	42,003	0,01658	14,060
		$-6,139 \times 10^{-5}$	$1,316 \times 10^{-4}$

Tabel 5.23 Rekapitulasi Hasil dari Perhitungan *Kenlayer*

Beban	Vertical Stress (kPa) 26,997 cm	Vertical Stress (kPa) 42,003 cm	Tangential Stress (kPa) 26,997 cm
	0,00004764	0,00007625	0,00003738
	0,0000974	0,0001587	0,00007195
	0,00008133	0,0001316	0,00006149
Max	0,0000974	0,0001587	0,00007195

4. Parameter untuk Kontrol Prediksi Umur Pelayanan Jalan

Setelah nilai tegangan dan regangan diperoleh, yang dilakukan selanjutnya adalah analisis kerusakan *fatigue cracking*, *permanent deformation* dan *rutting* sebagai parameter untuk kontrol prediksi umur pelayanan jalan. Kontrol dilakukan dengan cara menghitung nilai Nf (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *fatigue cracking*) dan Nd (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *permanent deformation* dan *rutting*) harus lebih besar dari *CESA* yang telah diprediksi. Untuk nilai f_4 dan f_5 mengikuti rekomendasi dari Asphalt Institute.

a. Perhitungan nilai Nf dan Nd

Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *fatigue cracking*.

$$\begin{aligned}
 N_f &= 0,0796 (\epsilon_t)^{-3,921} | E^* |^{-0,854} \\
 &= 0,0796 (7,195 \times 10^{-5})^{-3,921} | 1.600.000 |^{-0,854} \\
 &= 7.033.586.657 \text{ Esal}
 \end{aligned}$$

b. Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *rutting*.

$$\begin{aligned}
 N_d &= f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \\
 &= 1,365 \times 10^{-9} \times (9,740 \times 10^{-5})^{-4,477} \\
 &= 1.242.665.386 \text{ Esal}
 \end{aligned}$$

- c. Jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan untuk mengontrol *permanent deformation*.

$$\begin{aligned} Nd &= f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \\ &= 1,365 \times 10^{-9} \times (1,587 \times 10^{-4})^{-4,477} \\ &= 139.684.993 \text{ Esal} \end{aligned}$$

5. Kontrol prediksi umur pelayanan jalan dengan Metode *Kenpave*

Dari hasil analisis program *Kenlayer* didapatkan bahwa perkerasan Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan akan mengalami kerusakan *fatigue cracking* setelah dilewati beban repetisi sebanyak 7.033.586.657 Esal, kerusakan *rutting* setelah dilewati beban repetisi sebanyak 1.242.665.386 Esal, dan *permanent deformation* sebanyak 139.684.993 Esal. Sebagai kontrol prediksi umur pelayanan maka digunakan kerusakan yang memiliki daya tahan paling sedikit setelah dilewati beban repetisi yaitu kerusakan *permanent deformation* (Nd). Setelah itu, dengan nilai *CESA* pada kerusakan *permanent deformation* dapat diperoleh umur perkerasan dengan data-data yang ada di Bina Marga 2017, seperti LHR, *VDF*, faktor distribusi arah, faktor distribusi lajur dan juga nilai faktor pertumbuhan lalu lintas. Berikut uraiannya.

$$\begin{aligned} CESA &= \sum (\text{LHRT}_{\text{jenis kendaraan}} \times VDF) \times 365 \times DD \times DL \times \frac{(1+0,01i)^{UR-1}}{0,01i} \\ 139684993 &= [12737 \times 0,365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [451 \times 0,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [358 \times 1 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [586 \times 0,55 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [2181 \times 5,1 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \\ & [187 \times 6,4 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8}] + \end{aligned}$$

$$\left[23 \times 13 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8} \right] +$$

$$\left[56 \times 9,7 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1+0,01(4,8))^{UR-1}}{0,01 \times 4,8} \right] +$$

$$UR = 27,539 \text{ tahun}$$

$$= 28 \text{ tahun}$$

5.3 Pembahasan

Dari hasil analisis desain struktur perkerasan pada ruas Legundi-Kanigoro-Planjan untuk pembangunan jalan baru dengan pendekatan metode empiris dan mekanistik-empiris, didapat beberapa hasil sebagai berikut.

1. Desain struktur perkerasan eksisting dan alternatif Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan dilakukan dengan menggunakan metode empiris yakni Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M.BM/2017
2. Nilai tegangan dan regangan dengan menggunakan metode mekanistik empiris dibantu dengan program *Kenpave-Kenlayer*.
3. Perbandingan perkiraan umur masa layanan struktur perkerasan eksisting dan struktur perkerasan alternatif menggunakan Bina Marga 2017.
4. Perbandingan perbedaan konsep, parameter desain, dan prosedur desain antara metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik-empirik dengan program *Kenpave*

5.3.1 Desain Struktur Perkerasan Eksisting Dan Alternatif Struktur Berdasarkan Data Sekunder dengan Menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M.BM/2017

Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan merupakan jalan dengan jenis perkerasan lentur dan mulai beroperasi terhitung tanggal 28 November 2014 dengan jenis penanganan yaitu pembangunan jalan baru. Berdasarkan data yang didapat dari Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta, tebal perkerasan eksisting Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan ini adalah sebagai berikut.

<i>AC-WC</i>	= 4 cm
<i>AC-Base</i>	= 7,5 cm
Lapis Pondasi Agregat kelas A	= 20 cm
Lapis Pondasi Agregat kelas B	= 30 cm

Disamping itu, dengan menggunakan data LHRT bisa didapatkan pula perkerasan alternatif berdasarkan desain Bina Marga 2017. Dari metode Bina Marga 2017 diperoleh angka $CESA_4$ sebesar 65284092,75 Esal dan $CESA_5$ sebesar 82321379,18 Esal. Jenis perkerasan yang digunakan adalah perkerasan AC-WC modifikasi atau modifikasi dengan CTB dengan syarat menggunakan kontraktor besar dengan sumber daya yang memadai. Berdasarkan Tabel 3.7 maka dengan nilai $CESA_5$ sebesar 82321379,18 Esal, dapat diperoleh tebal perkerasan sebagai berikut

<i>AC WC</i>	= 4 cm
<i>AC BC</i>	= 6 cm
<i>AC Base</i>	= 21 cm
LPA Kelas A	= 30 cm

Nilai tebal perkerasan diatas dapat disesuaikan dengan tebal lapis pondasi agregat kelas A pada Tabel 3.14 untuk tanah dasar yang memiliki nilai $CBR \geq 7$ %. Dengan nilai CBR sebesar 10,08% maka dapat dilakukan penyesuaian tebal lapis pondasi agregat A untuk tanah dasar $CBR > 10\%$ sehingga tebal LPA yang semula 300 mm menjadi 150 mm. Berikut tebal perkerasan setelah mengalami penyesuaian lapis pondasi agregat.

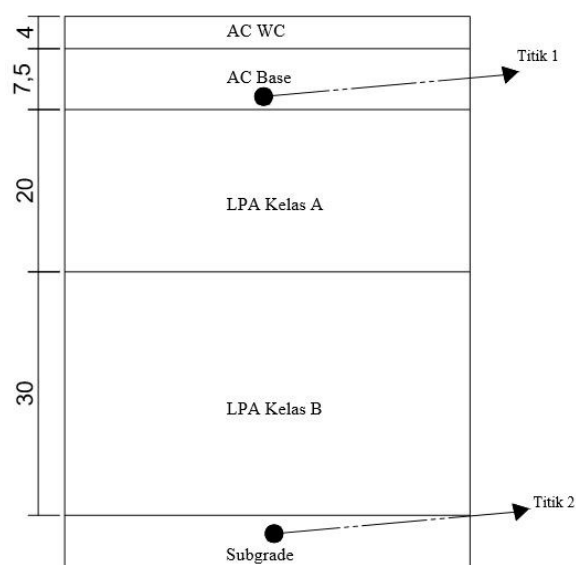
<i>AC WC</i>	= 4 cm
<i>AC BC</i>	= 6 cm
<i>AC Base</i>	= 21 cm
LPA Kelas A	= 15 cm

5.3.2 Nilai Tegangan dan Regangan dengan Menggunakan Metode Mekanistik Empiris Dibantu dengan Program *Kenpave-Kenlayer*

Metode mekanistik empiris adalah metode yang memperkirakan tingkat kerusakan perkerasan dengan mengacu pada sifat-sifat fisik perkerasan seperti modulus elastisitas, *poisson ratio*, faktor lingkungan, dan tebal perkerasan. Sifat-sifat fisik tersebut digunakan untuk menghitung respon perkerasan yang berupa tegangan, regangan, dan lendutan tiap layer. Nilai tegangan-regangan merupakan parameter penting untuk mengetahui sejauh mana perkerasan mampu menahan beban yang akan melintas di atasnya.

Pembacaan nilai tegangan dan regangan berbeda tiap jenis kerusakan. Untuk perkerasan eksisting, nilai kerusakan *rutting* dibaca pada *vertical stress* kedalaman 11,497 cm yaitu berada di lapis permukaan atau diatas lapis pondasi atas, nilai kerusakan *fatigue cracking* dibaca pada kedalaman 11,497 cm pada *tangential stress*. Sedangkan untuk *permanent deformation* diteliti pada kedalaman 61,503 cm yaitu dibawah pondasi bawah atau berada di bagian atas *subgrade* (Huang, 2004).

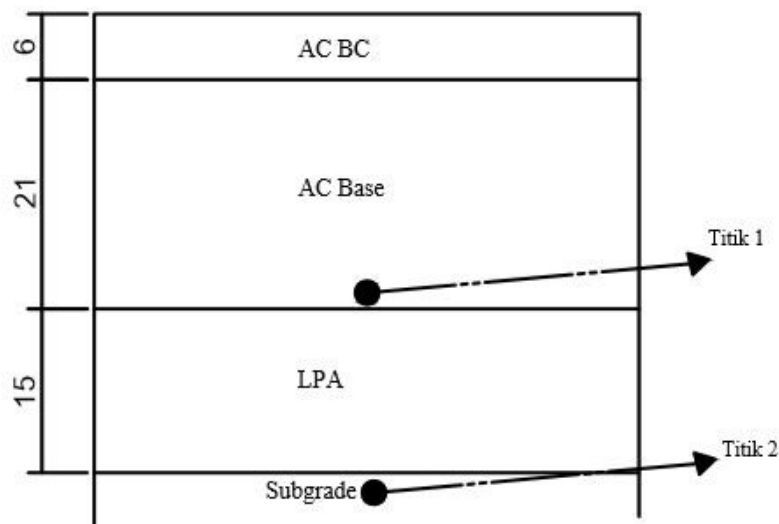
Pada Gambar 5.6, titik 1 merupakan titik letak tinjauan regangan tegangan untuk kerusakan *rutting* dan *fatigue cracking*, sedangkan titik 2 adalah titik letak tinjauan regangan dan tegangan untuk kerusakan *permanent deformation*.



Gambar 5.6 Letak Titik Tinjauan Kerusakan

Pada hasil perhitungan menggunakan metode mekanistik empiris terlihat bahwa perkerasan jalan eksisting mampu mengakomodasi beban repetisi sebesar 70.820.724 Esal sampai terjadi kerusakan *permanent deformation*, 105.970.803 Esal sampai terjadi kerusakan *rutting*, dan 497.373.300 Esal sampai terjadi kerusakan *fatigue cracking*.

Sedangkan untuk perkerasan alternatif, kerusakan *rutting* dibaca pada *vertical stress* kedalaman 26,997 cm yaitu berada di lapis permukaan atau diatas lapis pondasi atas, nilai kerusakan *fatigue cracking* dibaca pada kedalaman 16,997 cm pada *tangential stress*. Sedangkan untuk *permanent deformation* diteliti pada kedalaman 42,003 cm yaitu dibawah pondasi bawah atau berada di bagian atas *subgrade* (Huang, 2004). Pada Gambar 5.7, titik 1 merupakan titik letak tinjauan regangan tegangan untuk kerusakan *rutting* dan *fatigue cracking*, sedangkan titik 2 adalah titik letak tinjauan regangan dan tegangan untuk kerusakan *permanent deformation*.



Gambar 5.7 Letak Titik Tinjauan Kerusakan

Pada hasil perhitungan menggunakan metode mekanistik empiris terlihat bahwa perkerasan jalan berdasarkan analisis diatas dengan menggunakan program *Kenpave* yang dibantu dengan sub program *Kenlayer* mampu mengakomodasi

beban repetisi sebesar 139.684.993 Esal sampai terjadi kerusakan *permanent deformation*, 1.242.665.386 Esal sampai terjadi kerusakan *rutting*, 7.033.586.657 Esal sampai terjadi kerusakan *fatigue cracking*.

5.3.3 Perbandingan Perkiraan Umur Masa Layanan Struktur Perkerasan Eksisting Dan Struktur Perkerasan Alternatif Menggunakan Bina Marga 2017

Banyaknya faktor penyebab kerusakan jalan membuat sisa umur layan eksisting perkerasan sulit diprediksi dan setiap perkerasan tentunya memiliki umur layannya masing-masing. Pada penelitian ini dapat diperoleh prediksi umur masa layanan struktur perkerasan dengan menggunakan angka beban repetisi paling rendah yang terjadi pada program *Kenpave* lalu kemudian diolah dengan data-data yang ada di Bina Marga 2017, seperti LHR, *VDF*, faktor distribusi arah, faktor distribusi lajur dan juga nilai faktor pertumbuhan lalu lintas.

Untuk perkerasan eksisting dengan tebal *AC-WC* sebesar 4 cm, *AC-Base* sebesar 7,5 cm, lapis pondasi agregat kelas A sebesar 20 cm, dan lapis pondasi agregat kelas B sebesar 30 cm didapatkan jumlah nilai beban pengulangan *permanent deformation* sebesar 70.820.724 Esal. Dengan nilai beban pengulangan *permanent deformation* sebesar 70.820.724 Esal didapatkan umur layan sebesar 18 tahun dimana angka tersebut tidak memenuhi angka umur rencana yang sudah ditetapkan, yaitu sebesar 20 tahun.

Dikarenakan perkerasan eksisting tidak dapat memenuhi angka umur rencana, maka pada penelitian ini dibuatlah struktur perkerasan alternatif dengan menggunakan metode Bina Marga 2017 dengan *output* yaitu angka *CESA₄* dan *CESA₅* untuk menentukan jenis dan tebal perkerasannya. Setelah mendapatkan angka tebal perkerasan dilanjutkan dengan menggunakan metode *Kenpave* dan didapatkan jumlah nilai beban pengulangan *permanent deformation* 139.684.993 Esal. Dengan jumlah nilai beban pengulangan *permanent deformation* 139.684.993 Esal dapat dianalisis dan diperoleh umur perkerasan sebesar 28 tahun, dimana angka tersebut melampaui angka umur rencana yang direncanakan pada Bina Marga 2017 yaitu 20 tahun. Nilai beban repetisi pada kerusakan *permanent*

deformation yang sebesar 139.684.993 Esal pun melebihi nilai beban repetisi analisis menggunakan Bina Marga 2017 sebesar 82.321.379,18 Esal. Hal ini menunjukkan bahwa struktur perkerasan alternatif mampu mengakomodasi beban lalu lintas. Sehingga simulasi tersebut menunjukkan bahwa perkerasan lentur yang dirancang dapat dengan baik mengakomodasi beban lalu lintas yang melewatinya dan sesuai dengan umur rencana, ditandai dengan jumlah repetisi yang melewati perkerasan kurang dari kontrol kerusakan yang telah diperkirakan oleh program *Kenlayer*.

5.3.4 Perbandingan Metode Bina Marga 2017 dan Metode Mekanistik-Empiris (Program *Kenpave*)

Dari analisis perhitungan perencanaan tebal perkerasan lentur jalan dengan metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik-empirik (Program *Kenpave*), didapat beberapa perbandingan dari kedua metode sebagai berikut.

1. Perbandingan konsep desain

Penelitian ini menunjukkan perbedaan konsep metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik-empiris. Setiap negara memiliki metode empirik untuk menentukan tebal perkerasan lentur sesuai dengan kondisi negaranya. Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 ini merupakan revisi dari Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2013. Parameter yang dibutuhkan dalam perancangan metode Bina Marga 2017 adalah :

- a. lalu lintas
- b. daya dukung tanah dasar (DDT)
- c. faktor iklim dan lingkungan.

Pada metode Bina Marga 2017 ini, perkiraan volume lalu lintas harus dilaksanakan secara realistis. Data lalu lintas ini nantinya diperlukan untuk menghitung beban lalu lintas rencana yang dipikul oleh perkerasan selama umur rencana. Beban dihitung dari volume lalu lintas pada tahun survei yang selanjutnya diproyeksikan ke depan sepanjang umur rencana. Volume tahun pertama adalah volume lalu lintas sepanjang tahun pertama setelah perkerasan diperkirakan selesai dibangun atau direhabilitasi. Sedangkan itu,

faktor lingkungan yang mempengaruhi desain adalah intensitas curah hujan/pengaruh air, iklim, dan temperatur. Perencana harus mempertimbangkan pengaruh musim hujan terhadap aktivitas pelaksanaan terutama di daerah aluvial yang cenderung menjadi jenuh selama musim hujan. Daya dukung tanah dasar (DDT) dipergunakan dengan pemeriksaan terhadap nilai CBR tanah dasar. Contohnya yakni pada kasus perkerasan yang harus dibangun di kawasan dengan tanah bermasalah seperti gambut dan tanah lunak, karakteristik tanah bersangkutan merupakan faktor yang sangat penting karena analisis tanah dasar biasa tidak dapat menghasilkan perkerasan dengan kinerja yang diharapkan. Pada perkerasan dengan lapisan beraspal tipis, kesalahan kecil dalam evaluasi tanah dasar dapat menyebabkan pengurangan masa pelayanan menjadi hanya satu per sepuluh masa pelayanan yang direncanakan. Untuk perkerasan beraspal tebal, walaupun jumlah pengurangan masa pelayanan tidak sebesar itu tetapi pengurangan yang terjadi masih cukup berarti. Oleh sebab itu, penentuan daya dukung tanah dasar secara akurat dan desain fondasi perkerasan merupakan syarat penting untuk menghasilkan perkerasan berkinerja baik.

Secara umum penyajian manual yang ada pada Bina Marga 2017 sudah lebih banyak menyinggung mengenai desain mekanistik-empiris, terlihat pada penempatan bab mekanistik-empiris secara khusus membahas desain struktur perkerasan. Perubahan tersebut dilakukan dengan tujuan agar pengguna manual, yang sebelumnya hanya dapat melihat ketebalan desain yang “sudah jadi” dalam bentuk katalog, dapat lebih mengapresiasi metode yang digunakan dan selanjutnya berupaya untuk lebih mendalami metode tersebut.

Metode mekanistik-empiris menganut sistem multilapis elastis yang berkenaan dengan tegangan, regangan, dan lendutan. Dalam sistem multilapis elastis menggunakan beberapa asumsi dalam menghitung respon struktur seperti sifat bahan dari tiap lapis dianggap homogen dan isotropik. Selain itu, metode mekanistik-empiris didasarkan pada mekanika bahan,

input pada metode ini berupa tekanan ban roda, jarak antar ban, luas kontak area ban, nilai modulus elastisitas, dan nilai *poisson's ratio*, sedangkan *output* yang didapat dari metode ini berupa tegangan dan regangan. Parameter-parameter yang digunakan adalah :

- a. parameter setiap lapisan
 - 1) modulus elastisitas
 - 2) *poisson's ratio*,
- b. ketebalan setiap lapisan, dan
- c. kondisi beban.

Dalam mendesain metode mekanistik-empiris, desain struktur perkerasan awal diasumsikan terlebih dahulu, bersama dengan parameter lainnya. Perhitungan metode mekanistik ini umumnya berdasarkan metode sistem lapis banyak. Konsep ini berasumsi bahwa setiap lapisan perkerasan memiliki sifat-sifat seperti homogen, isotropis, dan linier elastik yang berarti akan kembali ke bentuk aslinya ketika beban dipindahkan.

Perbedaan yang menonjol dari metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik empirik ini pada analisis lalu lintasnya. Pada metode Bina Marga 2017 hanya memperhitungkan nilai *CESA* sebagai jumlah kumulatif beban sumbu lalu lintas desain pada setiap lajur dengan pertimbangan nilai VDF. Adapun pada metode mekanistik empirik selain jumlah beban sumbu lalu lintasnya, juga memperhitungkan tekanan ban, luas kontak area ban, dan jarak antar ban. Perbedaan jenis kendaraan yang melewati ruas jalan menyebabkan kerusakan yang ditimbulkan tidak sama. Oleh karena itu perlu adanya beban standar yang merupakan beban sumbu tunggal beroda ganda seberat 18.000 pon (8,16 ton), sehingga semua beban diekivalensikan ke beban standar dengan menggunakan angka ekuivalen kendaraan (E), yaitu angka yang menunjukkan jumlah lintasan dari sumbu tunggal seberat 8,16 ton yang akan menyebabkan kerusakan yang sama atau penurunan indeks permukaan yang sama apabila kendaraan itu lewat satu kali (Sukirman, 1999).

2. Perbandingan parameter desain

Penelitian ini menunjukkan beberapa perbedaan parameter yang dipakai antara metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik-empiris dengan program *Kenpave*. Metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik empirik menggunakan metode *fixed vehicle* menghitung ketebalan perkerasan berdasarkan pada jumlah pengulangan beban kendaraan/sumbu standar, biasanya 18-kip (80 KN) *single axle load*. Beban kendaraan/sumbu yang tidak 18 kip (80 KN) atau terdiri dari tandem/tridem harus diubah menjadi 18-kip *single axle load* dengan menggunakan faktor ekivalen beban (*Vehicle Damage Factor/ VDF*). Namun, pada metode mekanistik empirik ini tekanan ban, luas kontak area ban, jarak antar ban, jarak antar sumbu diperhitungkan.

Parameter yang juga berpengaruh dalam perhitungan yaitu parameter setiap lapis perkerasan. Pada metode mekanistik empirik untuk menghitung nilai tegangan dan regangannya tiap lapisan memperhitungkan nilai modulus elastisitas dan nilai *Poisson's Ratio*. Khusus untuk lapis permukaan juga memakai nilai *creep compliances*, karena lapis permukaan dimisalkan sebagai lapisan viskoelastis. Adapun metode Bina Marga untuk *subgrade* hanya berdasarkan *CBR* rendaman atau laboratorium dan untuk lapis permukaan serta pondasi atas berdasarkan jumlah kumulatif beban sumbu lalu lintas desain pada setiap lajur (*CESA*) serta jenis tanah.

Selain kondisi beban lalu lintas, parameter setiap lapis juga berpengaruh faktor regional atau pengaruh keadaan lingkungan terhadap hasil desain ini. Modulus mengasumsikan untuk iklim Indonesia, *WMAPT* (*weighted mean asphalt pavement temperature*) berkisar di antara 38⁰C (daerah pegunungan) hingga 42⁰C (untuk daerah pesisir). Nilai modulus campuran beraspal yang digunakan pada bagan desain ditetapkan berdasarkan asumsi *WMAPT* 41⁰C sebagai acuan.

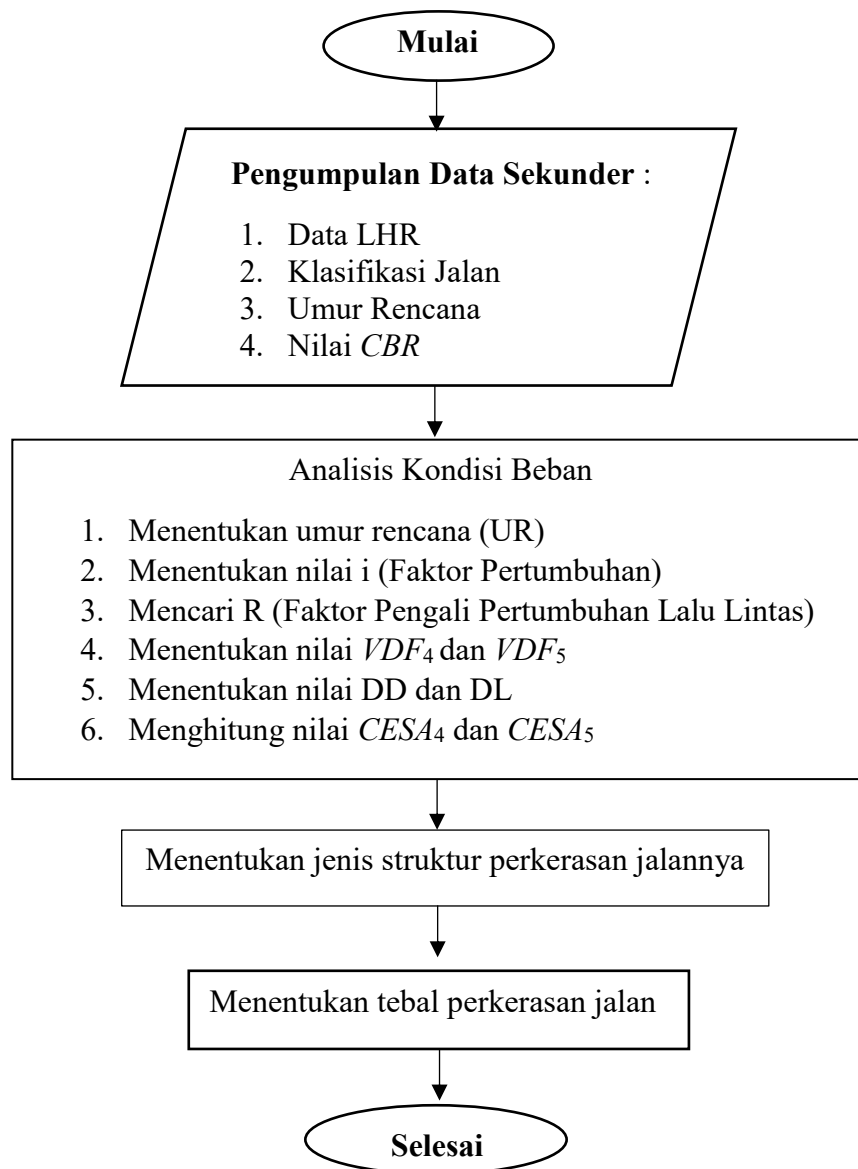
Sedangkan, pada metode mekanistik-empirik ini iklim atau temperatur material dan lingkungan sekitar diperhitungkan karena sifat viskoelastis diterapkan untuk menganalisa layer aspal. Temperatur yang disarankan untuk

creep compliances digunakan untuk input pada *Layerinp* yang diasumsikan sama dengan desain sebesar 25° C. Temperatur standar pada perkerasan lentur juga sebesar 25° C. Model yang biasa digunakan untuk creep compliances pada suhu 25° C dikembangkan oleh Huang (1993).

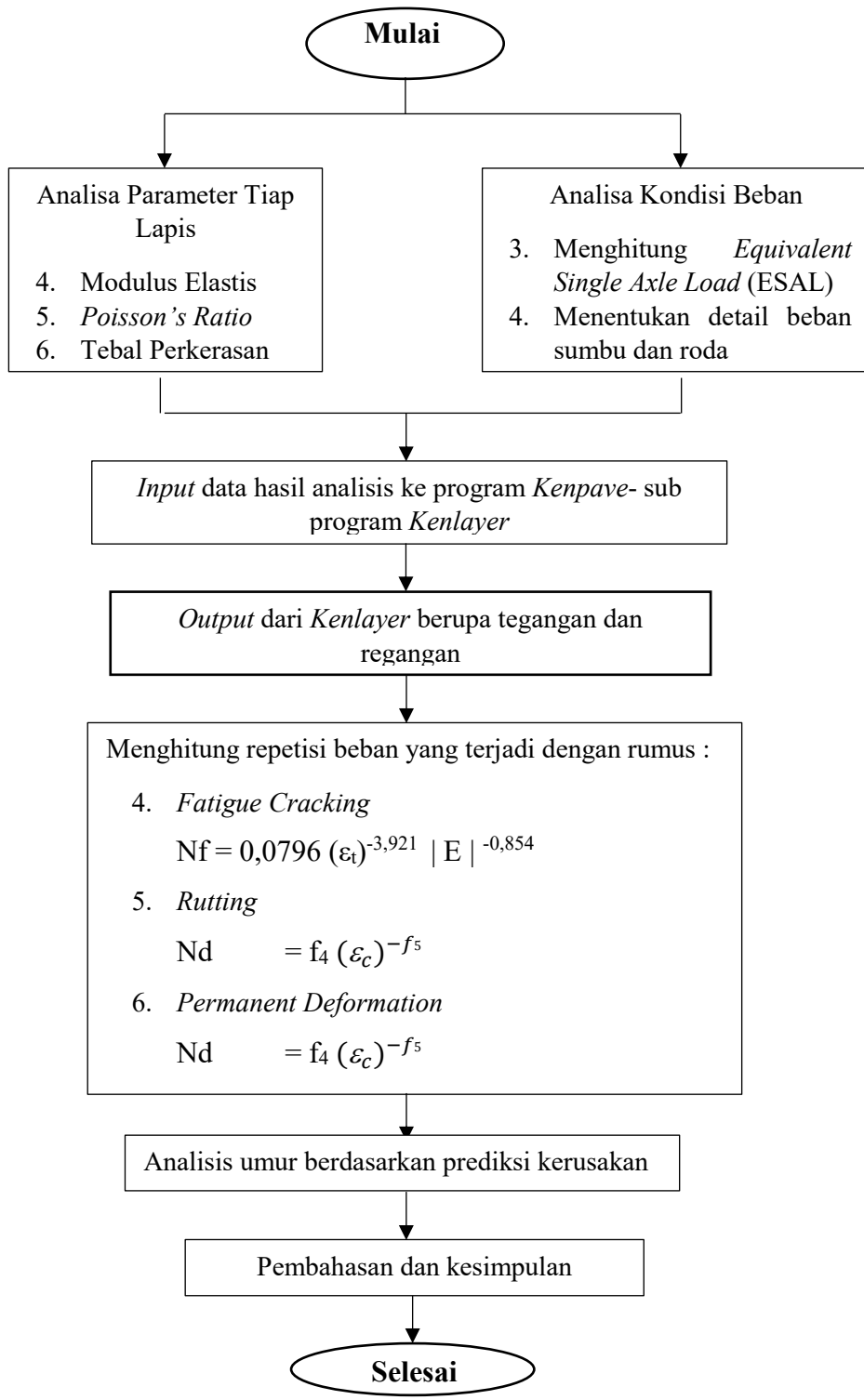
Parameter selanjutnya yaitu tebal perkerasan, untuk metode Bina Marga 2017 hasil tebal perkerasan yang didapat berdasarkan jumlah CESA₅ selama umur pelayanan yang kemudian disinkronkan ke dalam Tabel 3.13 dan Tabel 3.14. Sedangkan, metode mekanistik empirik perhitungan menggunakan program *Kenpave* dengan tebal perkerasan diasumsikan terlebih dahulu, kemudian pada program *Kenpave* akan menghasilkan nilai tegangan dan regangan. Dengan persamaan 3.14, persamaan 3.15 dan persamaan 3.16 akan didapat nilai N_f dan N_d (Jumlah repetisi beban yang terjadi sebelum *fatigue cracking*, *rutting* dan *permanent deformation* terjadi) untuk membuktikan asumsi tebal perkerasan yang dipakai aman.

3. Perbandingan prosedur desain.

Dalam perencanaan menggunakan metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik empirik terdapat perbedaan prosedur. Perbandingan prosedur perencanaan tersebut dapat dilihat dalam Gambar 5.8 dan Gambar 5.9.



Gambar 5.8 Prosedur Desain Perkerasan Jalan Lentur Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017



Gambar 5.9 Prosedur Desain Menggunakan Program *Kenpave*

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 KESIMPULAN

Dari hasil analisis redesain struktur perkerasan pada Ruas Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan untuk pembangunan jalan baru dengan pendekatan metode empiris dan mekanistik-empiris dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan data yang didapat dari Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta, tebal perkerasan eksisting Jalan Legundi-Kanigoro-Planjan ini adalah sebagai berikut.
 - a. AC-WC = 4 cm
 - b. AC-Base = 7,5 cm
 - c. Lapis Pondasi Agregat kelas A = 20 cm
 - d. Lapis Pondasi Agregat kelas B = 30 cm

Sedangkan untuk perkerasan alternatif berdasarkan desain Bina Marga 2017, diperoleh nilai $CESA_4$ yang dihasilkan sebesar 65284092,75 Esal, sedangkan $CESA_5$ yang dihasilkan sebesar 82321379,18 Esal. Lalu berdasarkan hasil dari $CESA$ tersebut didapatkan jenis pekerasan yang digunakan adalah jenis perkerasan AC-WC modifikasi atau modifikasi dengan CTB dengan syarat menggunakan kontraktor besar dengan sumber daya yang memadai. Sedangkan untuk tebal perkerasan beserta penyesuaian terhadap tebal lapis fondasi yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 6.1 berikut.

AC-WC (40 mm)
AC binder (60 mm)
AC base (210 mm)
LPA (150 mm)
Subgrade

Gambar 6.1 Tebal Perkerasan yang Diperoleh

2. Untuk perkerasan eksisting, respon tegangan dan regangan maksimum penyebab terjadinya *permanent deformation* terjadi di titik kritis pada permukaan tanah (*subgrade*) yaitu pada kedalaman 61,503 cm sebesar 0,0001847 kPa. Tegangan yang terjadi penyebab kerusakan *rutting* pada kedalaman 11,497 cm sebesar 0,0001688 kPa (titik kritis pada titik bawah lapis permukaan). Sedangkan untuk *fatigue cracking*, regangan total yang terjadi pada kedalaman 11,497 cm sebesar 0,0001414 kPa (titik kritis pada titik bawah lapis permukaan). Kerusakan yang terjadi pada perkerasan lentur setelah dibebani akan mengalami *fatigue cracking* sebesar 497.373.300 Esal, *rutting* setelah 105.970.803 Esal, dan mengalami *permanent deformation* sebesar 70.820.724 Esal. Sedangkan untuk perkerasan alternatif, respon tegangan dan regangan maksimum penyebab terjadinya *permanent deformation* terjadi di titik kritis pada permukaan tanah (*subgrade*) yaitu pada kedalaman 42,003 cm sebesar 0,0001587 kPa. Tegangan yang terjadi penyebab kerusakan *rutting* pada kedalaman 26,997 cm sebesar 0,0000974 kPa (titik kritis pada titik bawah lapis permukaan). Sedangkan untuk *fatigue cracking*, regangan total yang terjadi pada kedalaman 26,997 cm sebesar 0,00007195 kPa (titik kritis pada titik bawah lapis permukaan). Kerusakan yang terjadi pada perkerasan lentur setelah dibebani akan mengalami *fatigue cracking* sebesar 7.033.586.657 Esal, *rutting* setelah 1.242.665.386 Esal, dan mengalami *permanent deformation* sebesar 139.684.993 Esal.

3. Untuk perkerasan eksisting didapatkan jumlah nilai beban pengulangan *permanent deformation* sebesar 70.820.724 Esal. Dengan nilai beban

pengulangan *permanent deformation* sebesar 70.820.724 Esal didapatkan umur layan sebesar 18 tahun dimana angka tersebut tidak memenuhi angka umur rencana yang sudah ditetapkan, yaitu sebesar 20 tahun. Dikarenakan perkerasan eksisting tidak dapat memenuhi angka umur rencana, maka pada penelitian ini dibuatlah struktur perkerasan alternatif dengan menggunakan metode Bina Marga 2017 dengan jumlah nilai beban pengulangan *permanent deformation* 139.684.993 Esal dan dapat dianalisis dan diperoleh umur perkerasan sebesar 28 tahun, dimana angka tersebut melampaui angka umur rencana yang direncanakan pada Bina Marga 2017 yaitu 20 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa struktur perkerasan alternatif mampu mengakomodasi beban lalu lintas.

4. Dari analisis perhitungan perencanaan tebal perkerasan lentur jalan dengan metode Bina Marga 2017 dan metode mekanistik-empirik (Program Kenpave), didapat beberapa perbandingan dari kedua metode sebagai berikut.

Tabel 6.1 Perbandingan Metode Bina Marga 2017 dan Metode *Kenpave*

Perbedaan	Metode Bina Marga 2017	Metode Mekanistik-Empiris (<i>Kenpave</i>)
Konsep Desain	Desain perkerasan pada metode Bina Marga 2017 sudah lebih mengacu ke karakteristik material dan analisis struktur secara mekanistik karena dianggap dapat mengevaluasi respon perkerasan terkait dengan moda kerusakan perkerasan secara spesifik.	Menganut sistem multilapis elastis yang berkenaan dengan tegangan, regangan, dan lendutan, yakni menggunakan beberapa asumsi dalam menghitung respon struktur seperti sifat bahan dari tiap lapis dianggap homogen dan isotropik.

Tabel 6.1 Perbandingan Metode Bina Marga 2017 dan Metode *Kenpave*

Perbedaan	Metode Bina Marga 2017	Metode Mekanistik-Empiris (<i>Kenpave</i>)
Parameter Desain	<ol style="list-style-type: none"> 1. Untuk kondisi beban lalu lintas, memperhitungkan <i>CESA</i> sebagai jumlah kumulatif beban sumbu dengan pertimbangan nilai <i>VDF</i>. 2. Untuk parameter tiap lapisnya menggunakan <i>CBR</i> rendaman atau laboratorium untuk lapis tanah dasar, sedangkan untuk lapis permukaan serta pondasi atas berdasarkan jumlah kumulatif beban sumbu lalu lintas desain pada setiap lajur dan jenis tanah. 3. Untuk tebal perkerasan, menggunakan angka <i>CESA₅</i> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Untuk kondisi beban lalu lintas, memperhitungkan <i>ESA</i> sebagai jumlah kumulatif beban sumbu dengan pertimbangan tekanan ban, luas kontak area ban, jarak antar ban, dan jarak antar sumbu. 2. Untuk parameter tiap lapisnya menggunakan parameter modulus elastisitas, dan nilai <i>Poisson's Ratio</i> yang berbeda-beda tiap lapisnya. Namun ada parameter <i>creep compliances</i> pada lapis permukaan viskoelastis. 3. Untuk tebal perkerasan diasumsikan terlebih dahulu dengan <i>output</i> nilai tegangan dan regangan.
Prosedur Desain	(Dapat dilihat pada Gambar 5.8)	(Dapat dilihat pada Gambar 5.9)

6.2 SARAN

1. Kasus *overloading* sebaiknya diperhatikan. Karena di Indonesia sering terjadi kasus *overloading* yang menyebabkan umur perkerasan hampir tidak pernah sesuai dengan umur perkerasan yang direncanakan.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO, 1993, *Guide for Design of Pavement Structure*, Washington D.C.
- Aly, M.A., 2000, *Teknologi Perkerasan Jalan Beton Semen*, Yayasan Pengembangan Teknologi dan Manajemen, Jakarta.
- Aschuri, I. dkk., 2003, *Temperature and Time Loading Influence on Stiffness Modulus of Asphalt Concrete Mixture and Design Life by Using Analytical Method on Indonesian Tropical Condition*, *J of Transportation Engineering, ASCE*.
- Asphalt Institute*, 1970, *Thickness Design – Full Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets 8th Edition*, Lexington.
- Departemen Pekerjaan Umum. 1997. *Tata Cara Perencanaan Geometrik Jalan Antar Kota*, Direktorat Jenderal Bina Marga, Jakarta.
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga, Juni, 2017, *Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017*, Jakarta.
- Hapsari, I.W., 2016, *Prediksi Umur Pelayanan Jalan Akibat Penambahan Beban Menggunakan Metode Mekanistik-Empiris*, Tugas Akhir, (Tidak Diterbitkan), Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., 2015, *Pemeliharaan Jalan Raya*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Huang, Y.H, 2004, *Pavement Analysis and Design*, 2nd ed, Pearson Education, United States of America.
- Pavement Interactive*, (Online), *Flexible Pavement Mechanistic Models*, <http://www.pavementinteractive.org/>, diakses pada tanggal 25 April 2017.
- Putri, C.K., 2014, *Prediksi Nilai Kerusakan Perkerasan Lentur dengan Metode Mekanistik-Empirik Rekonstruksi Jalan Arteri Selatan*, Thesis, (Tidak Diterbitkan), Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Simanjuntak, I.L., 2014, *Evaluasi Tebal Lapis Perkerasan Lentur Manual Desain Perkerasan Jalan No.22.2/KPTS/Db/2012 dengan Menggunakan Program Kenpave*, Tugas Akhir, (Diterbitkan), Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Sukirman, S., 1999, *Perkerasan Lentur Jalan Raya*, Nova, Bandung.

Wulandari, W., 2017, *Prediksi Kebutuhan Biaya Investasi Tambahan Akibat Peningkatan Kelas Jalan Pada Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Mekanistik Empiris*, Tugas Akhir, (Tidak Diterbitkan), Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Yoder, E.J. and Witzcak, M.W., 1975, *Principles of Pavement Design, 2nd Edition*, John Willey & Son, Inc. New York.

LAMPIRAN