

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Penelitian ini menggunakan tinjauan Pustaka dari penelitian yang sebelumnya telah diterbitkan dan buku atau artikel yang telah ditulis pada peneliti sebagai berikut :

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

Refrensi Jurnal	
1. Judul	Analisis Tebal Perkerasan Lentur Dengan Metode Bina Marga 2017 Dan Program KENPAVE
Peneliti	Eza Marlina, John H.Frans, Judi K. Nasjono
Tahun	2023
Tujuan Penelitian	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya tebal perkerasan yang tepat dengan kondisi lalu lintas pada lokasi tinjauan. Fokus utama adalah untuk mengetahui besarnya tebal perkerasan dan menggunakan program KENPAVE untuk mengetahui besarnya regangan pada lapis perkerasan yakni nilai <i>vertical strain</i> dan <i>horizontal principal strain</i> yang terjadi, selanjutnya menghitung repetisi beban berdasarkan nilai regangan yang diperoleh.
Metode Penelitian	Penelitian dilakukan menggunakan metode bina marga 2017 dan metode analisa komponen serta menggunakan program kenpave untuk mengetahui besarnya regangan pada lapis perkerasan yakni nilai <i>vertical strain</i> dan <i>horizontal principal strain</i> yang terjadi. Selanjutnya menghitung repetisi beban yang berdasarkan nilai regangan yang diperoleh.
Hasil dan Pembahasan	Dapat disimpulkan bahwa: Hasil dari penelitian ini membuktikan bahwa dari tebal perkerasan yang diperoleh dengan metode bina marga 2017 dan metode analisa komponen dibandingkan dengan tebal perkerasan dari perencanaan awal Jalan Pulau Indah, jauh lebih memberikan kekuatan dalam

memikul beban lalu lintas ditunjukkan dengan nilai repetisi beban yang diperoleh membuktikan bahwa semakin tebalnya lapis perkerasan maka semakin kecil regangan yang terjadi pada lapis permukaan dan semakin kecil regangan yang diteruskan pada lapis tanah dasar.

2. Judul	Analisis Desain Perkerasan Lentur Berdasarkan MDPJ 2017 Menggunakan Metode Mekanistik Empiris Pada Program KENPAVE
Peneliti	Edi Yusuf Adiman dan Agus Yuda Pranata
Tahun	2024
Tujuan Penelitian	Penelitian ini bertujuan untuk menguji hasil luaran analisis desain perkerasan lentur menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2017 terhadap desain perkerasan lentur jalan menggunakan metode mekanistik empiris dengan program Kenpave. Studi kasus menggunakan data perencanaan pada Jalan Teluk Lembu Ujung STA. 1+900 – 2+900 Kecamatan Tenayan Raya Kota Pekanbaru.
Metode Penelitian	Metode yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan Metode analisis desain perkerasan menggunakan MDPJ 2017 kemudian hasilnya diuji berdasarkan analisis mekanistik empiris menggunakan program Kenpave.
Hasil dan Pembahasan	Hasil analisis menggunakan MDPJ 2017 diperoleh beban lalu lintas sebesar 21.777.935 CESAL5 sehingga desain perkerasan yang dipilih untuk digunakan adalah 4 cm AC-WC, 6 cm AC-BC, 15,5 cm AC-Base, dan 30 cm fondasi atas kelas A. Berdasarkan hasil pengujian mekanistik empiris dengan program Kenpave, desain perkerasan metode MDPJ 2017 tersebut dinyatakan aman dari pengujian kerusakan akibat fatigue cracking dan permanent deformation. Bahkan, pengujian secara mekanistik empiris program Kenpave juga memperoleh nilai yang aman meskipun ketebalan AC- Base dikurangi menjadi 15 cm.

3. Judul	Evaluasi Tebal Perkerasan Jalan Menggunakan Program Kenpave.
Peneliti	Zaki Andito Aji, Budi Hartanto Susilo
Tahun	2023
Tujuan Penelitian	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kerusakan perkerasan jalan menggunakan program software KENPAVE serta mengetahui solusi alternatif yang digunakan untuk kerusakan tersebut.
Metode Penelitian	Menggunakan metode MDPJ 2017 dan Program Kenpave
Hasil dan Pembahasan	Berdasarkan hasil yang diperoleh untuk perkerasan eksisting menggunakan pemodelan elastik mampu menahan beban <i>Fatigue Cracking</i> selama umur rencana tetapi tidak mampu menahan kerusakan <i>Rutting</i> dan <i>Permanent Deformation</i> selama umur rencana. Untuk design tebal perkerasan baru berdasarkan Binamarga tahun 2017 menggunakan pemodelan Viskoelastik dengan tebal perkerasan yang diperoleh yaitu 4 cm lapisan AC-WC, 6 cm lapisan AC-BC, 10 cm untuk lapisan AC-Base, 15 cm lapisan CTB, dan 15 cm lapisan agregat kelas A mampu menahan beban <i>Fatigue Cracking</i> dan <i>Rutting, Permanent Deformation</i> lebih lama. Untuk perbaikan <i>Overlay</i> dengan tebal perkerasan sebesar 5,5 cm yang diperoleh dari lendutan maksimum disesuaikan dengan beban hasil Cumulative Equivalent Single Axle Load dari design Binamarga 2017. Analisis Tebal <i>Overlay</i> menggunakan KENPAVE mampu menahan beban kerusakan <i>Fatigue Cracking</i> , selama umur rencana tetapi tidak mampu untuk kerusakan <i>Rutting dan Permanent Deformation</i> dengan umur yang lebih cepat dibandingkan design perencanaan baru.

B. Landasan Teori

1. Definisi Jalan

Berdasarkan Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2004, jalan diartikan sebagai sarana transportasi darat yang mencakup seluruh

bagian jalan beserta bangunan pelengkap dan perlengkapannya, yang digunakan untuk lalu lintas yang berada di atas, di bawah permukaan tanah, di bawah air, atau di atas permukaan air, kecuali untuk jalan kereta api, jalan lori, dan jalan kabel. Jalan sebagai elemen penting dalam prasarana transportasi berperan untuk menyediakan jalur pergerakan bagi masyarakat, memungkinkan mereka untuk berpindah dari satu lokasi ke lokasi lainnya. (Darwoto dkk, 2023)

Prasarana jalan memegang peranan yang sangat penting bagi masyarakat, karena dengan adanya jalan, masyarakat dapat lebih mudah mengakses berbagai daerah, yang pada gilirannya meningkatkan kelancaran mobilitas dan memberikan dampak positif terhadap perekonomian. Oleh karena itu, konstruksi jalan harus dirancang agar tahan terhadap beban kendaraan, sehingga dapat mendukung mobilitas masyarakat dalam jangka panjang. (Maryam & Putra, 2020)

2. Pengelompokan jalan

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 38 Tahun 2004, jalan dikelompokkan dalam beberapa kategori sebagai berikut :

a. Menurut statusnya

Berikut ini adalah pengelompokan jalan berdasarkan statusnya :

- 1) Jalan nasional, adalah bagian dari jaringan jalan primer yang terdiri dari jalan arteri dan jalan kolektor, yang menghubungkan antar ibu kota provinsi, serta mencakup jalan strategis nasional dan jalan tol.
- 2) Jalan provinsi, adalah jalan kolektor dalam jaringan jalan primer yang menghubungkan ibu kota provinsi dengan ibu kota kabupaten/kota, atau antar ibu kota kabupaten/kota, serta mencakup jalan strategis provinsi.
- 3) Jalan kabupaten merupakan jalan lokal dalam jaringan jalan primer yang menghubungkan ibu kota kabupaten dengan ibu kota kecamatan, antar ibu kota kecamatan, ibu kota kabupaten dengan pusat kegiatan

lokal, antar pusat kegiatan lokal, serta jalan umum dan sistem jaringan sekunder di wilayah kabupaten, termasuk jalan strategis kabupaten.

- 4) Jalan kota, adalah jalan umum dalam jaringan jalan sekunder yang menghubungkan berbagai pusat pelayanan di dalam kota, dan menghubungkan pusat-pusat pemukiman yang terdapat di dalam kota.
- 5) Jalan desa, merupakan jalan umum yang menghubungkan area atau antar pemukiman di dalam desa, serta mencakup jalan lingkungan.

b. Menurut fungsinya

Berikut ini adalah pengelompokkan jalan berdasarkan fungsinya :

- 1) Jalan arteri, adalah jalan umum yang dirancang untuk melayani perjalanan jarak jauh, dengan kecepatan rata-rata yang tinggi, serta jumlah akses jalan yang dibatasi demi efisiensi penggunaannya.
- 2) Jalan kolektor, adalah jalan umum yang berfungsi untuk menghubungkan angkutan pengumpul atau pembagi, dengan ciri perjalanan jarak menengah, kecepatan rata-rata sedang, dan jumlah akses jalan yang terbatas.
- 3) Jalan lokal adalah jalan umum yang berfungsi untuk melayani angkutan lokal, dengan karakteristik perjalanan jarak pendek dan kecepatan rata-rata yang rendah.
- 4) Jalan lingkungan adalah jalan umum yang dirancang untuk melayani angkutan di sekitar area tersebut, dengan ciri perjalanan jarak pendek dan kecepatan rata-rata yang rendah.

3. Perkerasan Jalan

Menurut (Kholiq et al., 2014) perkerasan jalan merupakan kombinasi antara agregat dan bahan pengikat yang berfungsi untuk mendukung beban lalu lintas. Struktur perkerasan ini terdiri dari lapisan material yang memenuhi standar kelayakan dan diletakkan di atas lapisan tanah dasar yang telah dipadatkan. Fungsi utama dari lapisan perkerasan adalah untuk mendistribusikan tekanan yang dihasilkan oleh beban roda ke area yang lebih luas pada lapisan tanah dasar di bawahnya. (Pradani et al., 2016)

Menurut (Sukirman, 2010) Tanah alami yang terdapat di alam jarang sekali berada dalam kondisi yang cukup kuat untuk menahan beban lalu lintas berulang tanpa mengalami deformasi yang signifikan akibat kendaraan yang melintas. Oleh karena itu, diperlukan suatu struktur yang dapat melindungi tanah dari tekanan beban roda kendaraan, yang dikenal dengan istilah perkerasan (*pavement*). Perkerasan berfungsi untuk melindungi lapisan tanah dasar (*subgrade*) serta lapisan pembentuk perkerasan agar tidak mengalami tegangan dan regangan berlebih akibat beban lalu lintas. Lapisan perkerasan harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut :

- a. Secara umum, perkerasan jalan harus memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban lalu lintas yang melintasinya.
- b. Permukaan jalan harus mampu menahan gaya gesekan dan keausan yang disebabkan oleh roda kendaraan serta tahan terhadap dampak air.
- c. Permukaan dengan tekstur yang memberikan kenyamanan saat dilalui.
- d. Memiliki daya tahan yang sangat baik.
- e. Mempunyai nilai yang ekonomis.

Berdasarkan jenis bahan pengikatnya, konstruksi perkerasan jalan dapat dikategorikan menjadi:

- a. Konstruksi Perkerasan Kaku (*Rigid Pavement*).

Perkerasan kaku adalah perkerasan yang menggunakan semen sebagai bahan pengikatnya, yang terdiri dari pelat beton, baik dengan tulangan

maupun tanpa tulangan, yang diletakkan langsung di atas tanah dasar atau tanpa lapisan pondasi bawah.

b. Konstruksi Perkerasan Lentur (*Flexible Pavement*).

Perkerasan lentur adalah perkerasan yang menggunakan aspal sebagai bahan pengikat. Lapisan perkerasan ini berfungsi untuk menanggung dan mendistribusikan beban lalu lintas ke lapisan tanah dasar.

c. Konstruksi Perkerasan komposit (*composite pavement*)

Konstruksi perkerasan komposit merupakan kombinasi antara perkerasan kaku dan perkerasan lentur. Perkerasan lentur dapat diletakkan di atas perkerasan kaku, atau sebaliknya.

4. Perkerasan Lentur

Konstruksi jalan dengan perkerasan tipe fleksibel merupakan jenis konstruksi yang paling populer dan banyak digunakan di Indonesia. Perkerasan ini disebut perkerasan lentur karena menggunakan aspal sebagai bahan pengikat, yang memberikan sifat lentur serta kemampuan untuk meredam getaran yang dihasilkan oleh pergerakan kendaraan. Jalan-jalan di kawasan perkotaan, yang umumnya memiliki lalu lintas dengan intensitas rendah hingga sedang, lebih cocok menggunakan perkerasan tipe fleksibel (Krisdiyanto et al., 2022). Perkerasan jenis ini terdiri dari beberapa lapisan. Berikut adalah penjelasan mengenai fungsi masing-masing lapisan pada perkerasan tipe fleksibel :

a. Lapis permukaan (*surface course*)

Lapisan ini adalah lapisan teratas dalam struktur perkerasan yang memiliki fungsi struktural untuk menerima dan mendistribusikan beban kendaraan ke lapisan bawah. Selain itu, lapisan permukaan juga berfungsi sebagai lapisan aus dan kedap air, yang merupakan fungsi non-struktural. Oleh karena itu, lapisan ini harus memiliki tingkat kekasaran tertentu agar dapat memberikan dampak positif bagi pengendara, seperti kenyamanan saat berkendara.

b. Lapis pondasi atas (*base course*)

Lapisan ini terletak tepat di bawah lapisan permukaan, dan memiliki fungsi sebagai penopang untuk mendukung lapisan di atasnya serta mendistribusikan beban kendaraan ke lapisan di bawahnya.

c. Lapis pondasi bawah (*sub-base course*)

Lapisan yang terletak di antara lapis pondasi atas dan tanah dasar ini berfungsi untuk menyalurkan beban kendaraan ke lapisan di bawahnya. Selain harus memiliki kekuatan yang cukup, lapisan ini juga harus dapat mencegah pergerakan partikel kecil dari tanah dasar dan menghindari penumpukan air.

d. Lapis tanah dasar (*subgrade*)

Lapisan terendah dalam perkerasan tipe fleksibel adalah tanah dasar, yang bisa berupa tanah asli, tanah yang digali, atau tanah timbunan yang telah dipadatkan sesuai dengan kebutuhan atau perencanaan yang ada.

5. Metode Perencanaan Perkerasan Lentur

Secara umum, terdapat tiga pendekatan yang digunakan dalam perencanaan perkerasan lentur, yaitu pendekatan empiris, mekanistik, dan gabungan antara mekanistik dan empiris.

a. Metode Empiris

Pendekatan empiris dikembangkan melalui pengalaman penelitian yang diperoleh dari jalan-jalan yang dibangun khusus untuk penelitian atau dari jalan yang sudah ada. Dalam pendekatan ini, desain didasarkan pada hasil percobaan atau pengalaman sebelumnya. Pengamatan dilakukan untuk membangun hubungan antara variabel input dan hasil dari suatu proses, seperti desain perkerasan dan kinerjanya. Pendekatan empiris sering digunakan sebagai alat bantu ketika sulit untuk mendefinisikan penyebab dan dampak fenomena secara teoritis.

Metode empiris dibagi menjadi dua kategori, yaitu metode empiris tanpa uji kekuatan tanah dan metode empiris dengan uji kekuatan tanah. Metode empiris tanpa uji kekuatan tanah berasal dari pengembangan sistem

klasifikasi tanah *Public Roads* (PR), di mana tanah dasar diklasifikasikan secara seragam mulai dari A-1 hingga A-8, serta B-1 hingga B-3. Sistem PR ini kemudian dimodifikasi oleh *Highway Research Board* (HRB), yang mengelompokkan tanah dari A-1 hingga A-7 dan menambahkan grup indeks untuk membedakan tiap kelompok tanah. Steele membahas penerapan klasifikasi HRB dan grup indeks sebagai dasar untuk memperkirakan ketebalan perkerasan tanpa melakukan uji kekuatan. Sementara itu, metode empiris dengan uji kekuatan pertama kali diterapkan oleh *California Highway Department* pada tahun 1929, di mana ketebalan perkerasan berkaitan dengan *California Bearing Ratio* (CBR). CBR didefinisikan sebagai ketahanan penetrasi tanah dasar relatif terhadap standar batu pecah. Desain metode CBR dipelajari secara mendalam oleh *U.S. Corps of Engineers* selama Perang Dunia II dan menjadi sangat populer setelah perang.

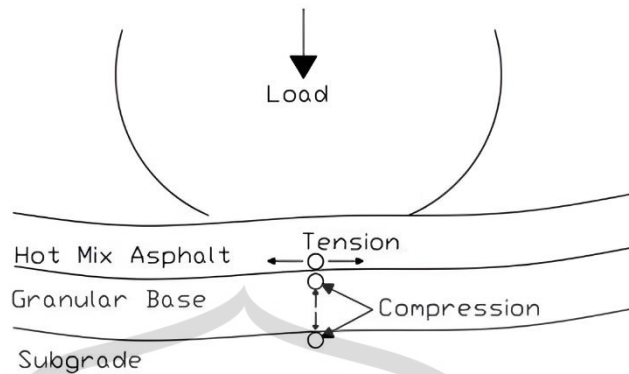
b. Metode Mekanistik

Metode mekanistik merupakan pendekatan yang mengembangkan prinsip-prinsip teoritis berdasarkan karakteristik material perkerasan, yang dilengkapi dengan perhitungan eksak untuk menganalisis respons struktur perkerasan terhadap beban kendaraan. Dalam metode ini, perkerasan jalan dianggap sebagai struktur "*multi-layer (elastic) structure*" untuk perkerasan lentur, dan sebagai struktur "*beam on elastic foundation*" untuk perkerasan kaku. Ketika beban kendaraan bekerja di atas perkerasan, yang dianggap sebagai beban statis merata, akan timbul tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada struktur tersebut. Lokasi di mana tegangan atau regangan maksimum terjadi akan menjadi dasar dalam menentukan ketebalan struktur perkerasan pada metode perancangan tebal perkerasan lentur secara mekanistik.

c. Metode Mekanistik-Empiris

Metode-mekanistik empiris adalah pendekatan *hybrid* atau campuran yang menggabungkan elemen-elemen dari kedua metode mekanistik dan empiris. Model empiris digunakan untuk mengisi kekosongan antara teori mekanik dan kinerja struktur perkerasan. Respon mekanistik yang sederhana, yang mudah dihitung dengan asumsi dan penyederhanaan tertentu (seperti material homogen, analisis regangan kecil, dan pembebanan statis yang umumnya diasumsikan dalam teori *elastis linier*), tidak cukup untuk memprediksi kinerja perkerasan secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan beberapa jenis model empiris untuk mendukung prediksi performa struktur perkerasan. Untuk menghasilkan korelasi yang lebih akurat, metode mekanistik-empiris dianggap sebagai pendekatan perantara antara metode empiris dan mekanistik. Pendekatan ini menggabungkan elemen dari kedua metode tersebut untuk mencapai hasil yang lebih tepat dalam perencanaan perkerasan.

Metode desain mekanistik-empiris didasarkan pada prinsip-prinsip mekanika bahan yang mengintegrasikan data yang diperlukan, seperti beban roda dan respons perkerasan, termasuk tegangan dan regangan. Nilai respons ini digunakan untuk memprediksi tekanan berdasarkan hasil tes laboratorium dan data kinerja lapangan. Pendekatan ini sangat penting dalam menilai kinerja perkerasan, karena teori saja belum cukup untuk menghasilkan desain perkerasan yang realistis. Kerkhoven dan Dormon pertama kali mengusulkan penggunaan regangan tekanan vertikal pada permukaan tanah dasar sebagai indikator kegagalan untuk mengurangi deformasi permanen. Sementara itu, Saal dan Pell merekomendasikan penggunaan regangan tarik *horizontal* di bawah lapisan aspal untuk mengurangi risiko kelelahan retak, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Konsep ini pertama kali dipresentasikan di Amerika Serikat oleh Dormon dan Metcalf untuk desain perkerasan.



Gambar 2.1 Regangan Pada Perkerasan Lentur

Sumber : (Huang, 2004)

Penggunaan regangan tekan vertikal untuk mengendalikan deformasi permanen didasarkan pada prinsip bahwa regangan plastis berkaitan langsung dengan regangan elastis pada material perkerasan. Dengan demikian, dengan membatasi regangan elastis pada tanah dasar, regangan elastis pada material di atasnya juga dapat dikontrol, sehingga deformasi permanen pada permukaan perkerasan dapat diminimalkan. Kedua kriteria tersebut telah diadopsi oleh Shell Petroleum International dan Asphalt Institute. Dalam metode mekanistik-empiris yang mereka kembangkan, keuntungan utama dari pendekatan mekanistik adalah peningkatan reliabilitas desain, kemampuan untuk memprediksi jenis kerusakan, serta potensi untuk memperkirakan data lapangan dan laboratorium yang terbatas. Namun, kelemahan dari desain mekanistik terletak pada kebutuhan untuk menentukan karakteristik struktural bahan perkerasan lentur, yang memerlukan alat uji mekanistik dengan biaya yang relatif tinggi. (Noor et al., 2017)

6. Manual Desain Perkerasan Jalan (Bina Marga 2017)

Desain jalan di Indonesia terus berkembang seiring waktu. Dimulai dengan penggunaan Metode Analisa Komponen pada tahun 1987, kemudian berlanjut dengan penerapan desain perkerasan lentur berdasarkan Pt T-01-2002-B, yang diadaptasi dari metode AASHTO hasil penelitian pada tahun 1958-1960 di Ottawa, Illinois. Penelitian tersebut menggunakan kendaraan

dengan sumbu tunggal roda ganda dengan muatan sumbu terberat 8,16 ton (18.000 pon). Untuk meningkatkan dan mengembangkan kinerja jalan dalam mendukung pekerjaan konstruksi jalan serta memastikan kualitas perkerasan Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga mengeluarkan draft manual desain perkerasan jalan pada tahun 2013. Draft tersebut kemudian disempurnakan pada tahun 2017 menjadi Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2017.

Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2017 mencakup perubahan dalam struktur penyajian untuk mempermudah pemahaman oleh pengguna, serta penambahan dan perbaikan materi yang ada dalam manual tersebut. Revisi ini disusun untuk mengatasi tantangan dan hambatan yang dihadapi dalam meningkatkan kinerja aset jalan di Indonesia. Manual ini memuat ketentuan teknis terkait pelaksanaan desain perkerasan jalan yang berlaku di lingkungan Direktorat Jenderal Bina Marga, yang terbagi menjadi dua bagian, yaitu struktur perkerasan baru dan rehabilitasi perkerasan. Beberapa parameter yang menjadi pertimbangan dalam perhitungannya antara lain umur rencana, lalu lintas, faktor lajur, beban lalu lintas, dan tingkat pertumbuhan lalu lintas.

a. Umur Rencana

Menurut Kementerian Pekerjaan Umum, umur rencana suatu jalan raya adalah periode waktu dalam tahun yang dihitung sejak jalan tersebut dibuka hingga diperlukan perbaikan besar atau dianggap perlu untuk mengganti lapis permukaan jalan. Umur perkerasan jalan umumnya ditentukan berdasarkan jumlah kumulatif lintas kendaraan standar (CESA, *Cumulative Equivalent Standard Axle*). Dalam Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2017, umur rencana digunakan untuk menentukan jenis perkerasan yang sesuai, dengan mempertimbangkan elemen-elemen perkerasan berdasarkan analisis biaya keseluruhan yang didiskontokan dengan nilai terendah. Tabel 2.2 berikut ini menyajikan ketentuan umur rencana berdasarkan elemen perkerasan yang tercantum dalam Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2017.

Tabel 2.2 Umur Rencana Jalan (UR)

Jenis Perkerasan	Elemen Perkerasan	Umur Rencana (tahun)
Perkerasan Lentur	Lapis aspal dan lapisan berbutir.	20
Perkerasan Lentur	Fondasi Jalan Semua perkerasan untuk daerah yang tidak dimungkinkan pelapisan ulang (<i>overlay</i>), seperti : jalan perkotaan, underpass, jembatan, terowongan. <i>Cement Treated Based (CBT)</i>	40
Perkerasan Kaku	Lapis fondasi atas, lapis fondasi bawah, lapis beton semen, dan fondasi jalan.	
Jalan tanpa penutup	Semua elemen (termasuk fondasi jalan)	Minimum 10

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

b. Lalu Lintas

Lalu lintas merupakan faktor penting dalam perencanaan teknik jalan, karena kapasitas dan konstruksi struktur perkerasan yang direncanakan sangat bergantung pada komposisi lalu lintas yang akan menggunakan jalan pada segmen tertentu. Dalam pendahuluan Manual Pd T-19-2004-B, survei lalu lintas dapat dilakukan melalui berbagai metode, seperti secara manual, semi-manual (dengan bantuan kamera video), atau otomatis (menggunakan tube atau loop). Analisis lalu lintas pada ruas jalan yang direncanakan juga harus mempertimbangkan faktor pengalihan arus lalu lintas, yang didasarkan pada analisis jaringan. Hal ini meliputi proyeksi peningkatan kapasitas ruas jalan yang ada atau pembangunan ruas jalan baru dalam jaringan, serta dampaknya terhadap volume lalu lintas dan beban pada ruas jalan yang sedang direncanakan.

1) Volume lalu lintas

Volume lalu lintas sangat penting untuk menentukan jumlah dan lebar jalur pada suatu jalan serta untuk menetapkan karakteristik geometrik jalan. Sementara itu, jenis kendaraan yang melintas akan menentukan kelas beban atau Muatan Sumbu Terberat (MST), yang berpengaruh pada perencanaan konstruksi struktur perkerasan. Volume lalu lintas didefinisikan sebagai jumlah kendaraan yang melewati suatu titik pengamatan dalam satu satuan waktu (misalnya hari, jam, atau menit). Volume lalu lintas dapat berupa Volume Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR), yang merupakan nilai rata-rata kendaraan selama beberapa hari pengamatan, atau Lalu Lintas Harian Rata-rata Tahunan (LHRT), yang dihitung berdasarkan rata-rata jumlah kendaraan yang melintas sepanjang tahun. Dalam Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2017, analisis volume lalu lintas harus didasarkan pada survei lalu lintas aktual dengan durasi minimal 7 x 24 jam, serta mengacu pada pedoman Manual Pd T-19-2004-B dan Manual Kapasitas Jalan Indonesia (MKJI).

2) Faktor pertumbuhan lalu lintas

Kebijakan dalam menetapkan faktor pertumbuhan lalu lintas sebaiknya mengacu pada data pertumbuhan historis atau melalui rumusan korelasi dengan faktor pertumbuhan lain yang terbukti sah. Apabila data historis pertumbuhan lalu lintas tidak tersedia atau tidak lengkap, Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 02/M/BM/2017 dapat dijadikan acuan, yang mencakup tabel faktor pertumbuhan lalu lintas minimum untuk periode 2015 hingga 2035. Pada Tabel 2.3 dibawah ini.

Tabel 2.3 Faktor Laju Pertumbuhan Lalu Lintas (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 : Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Perhitungan pertumbuhan lalu lintas selama periode rencana dilakukan dengan menggunakan faktor pertumbuhan kumulatif (*Cumulative Growth Factor*) yang dihitung berdasarkan persamaan 2.1 berikut.

$$R = \frac{(1+0,01i)^{UR}-1}{0,01i} \quad (2.1)$$

dengan :

R : Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif

i : Laju pertumbuhan lalu lintas tahunan (%)

UR : Umur rencana (tahun)

c. Faktor Lajur

Lajur rencana merujuk pada jalur lalu lintas di sebuah ruas jalan yang dirancang untuk menampung volume terbesar dari kendaraan niaga, seperti truk dan bus. Beban lalu lintas pada lajur rencana dihitung dalam bentuk kumulatif beban gandar standar (ESA), dengan mempertimbangkan faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL). Pada jalan dua arah, nilai faktor distribusi arah (DD) biasanya diambil sebesar 0,50, kecuali pada lokasi-lokasi di mana jumlah kendaraan niaga lebih dominan pada satu arah tertentu. Beban lalu lintas pada lajur rencana dihitung dalam bentuk kumulatif beban gandar

standar (ESA), dengan mempertimbangkan faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL). Pada jalan dua arah, nilai faktor distribusi arah (DD) biasanya diambil sebesar 0,50, kecuali pada lokasi-lokasi di mana jumlah kendaraan niaga lebih dominan pada satu arah tertentu. Tabel 2.4 berikut ini menunjukkan faktor distribusi jalan.

Tabel 2.4 Faktor disribusi lajur (DL)

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

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

d. Perkiraan Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*)

Dalam perancangan perkerasan, beban lalu lintas diubah menjadi beban standar (ESA) dengan mempergunakan Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*). Analisis struktur perkerasan dilakukan berdasarkan total kumulatif ESA pada lajur rencana selama masa rencana. Survei beban gandar diperlukan apabila perhitungan beban lalu lintas yang lebih presisi dibutuhkan. Namun, jika survei beban gandar tidak dapat dilaksanakan oleh perencana dan data sebelumnya tidak tersedia, maka nilai *VDF* yang tercantum dalam tabel 2.5 dan Tabel 2.6 yang terdapat dibawah ini dapat digunakan untuk menghitung *ESA*.

Tabel 2.5 Nilai VDF Standar

Jenis Kendaraan	Sumatera				Jawa				Kalimantan				Sulawesi				Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua			
	Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal	
	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5
5B	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
6A	0,55	0,5	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	28,8	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 : Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Tabel 2.6 Nilai VDF Masing-Masing Jenis Kendaraan Niaga

Jenis kendaraan		Uraian	Konfigurasi sumbu	Muatan-muatan yang diangkut	Kelompok sumbu	Distribusi Tipikal		Faktor ekivalen beban (VDF) (ESAL/kendaraan)	
Klasifikasi lama	Alternatif					Semua kendaraan bermotor	Semua kendaraan bermotor kecuali 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	0,2	1,0	1,0
6a.1	6.1	Truk 2 sumbu – cargo ringan	1.1	Muatan umum	2			0,3	0,2
6a.2	6.2	Truk 2 sumbu – ringan	1.2	Tanah, pasir, besi, semen	2	4,6	6,60	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	-	-	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	3,8	5,50	7,3	11,2
7a1	9.1	Truk 3 sumbu – ringan	1.22	Muatan umum	3			7,6	11,2
7a2	9.2	Truk 3 sumbu – sedang	1.22	Tanah, pasir, besi, semen	3	3,9	5,60	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 sumbu dan trailer penarik 2 sumbu	1.2-2.2		4	0,5	0,70	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	1.2-22		5			19,0	33,2
7c2.2	13	Truk 5 sumbu – trailer	1.2-222		5	0,7	1,00	30,3	69,7
7c3	14	Truk 6 sumbu – trailer	1.22-222		6	0,3	0,50	41,6	93,7

Sumber : Direktorat Jendral Bina Marga (2017)

Catatan: Data didasarkan pada survei beban lalu lintas Arteri Pulau Jawa.

e. Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas merujuk pada beban yang diberikan oleh kendaraan ke perkerasan jalan melalui interaksi antara ban dan permukaan atas jalan yang terjadi secara dinamis dan berulang sepanjang masa penggunaan jalan. Beban ini ditransfer melalui roda kendaraan yang berulang kali melewati jalan tersebut selama periode penggunaannya. Pemahaman mengenai beban dinamis yang diberikan kendaraan pada perkerasan sangat penting dalam menentukan perencanaan konstruksi struktur perkerasan jalan serta kekuatan struktur jalan selama masa pelayanan.

1) Beban Sumbu Standar

Beban sumbu sebesar 100 kN diperbolehkan di beberapa ruas jalan, khususnya pada ruas jalan kelas I. Namun, nilai *CESA* selalu dihitung berdasarkan beban sumbu standar sebesar 80 kN.

2) Pengendalian Beban Sumbu

Untuk tujuan desain, tingkat pembebanan saat ini (aktual) diasumsikan berlanjut hingga tahun 2030. Setelah tahun tersebut, diharapkan beban berlebih dapat dikendalikan dengan menggunakan beban sumbu nominal sebesar 120 kN.

3) Beban Sumbu Standar Kumulatif

Beban sumbu standar kumulatif, atau yang dikenal dengan *Cumulative Equivalent Single Axle Load (CESAL)*, adalah total kumulatif beban sumbu lalu lintas desain pada lajur desain sepanjang umur rencana, yang dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2.

$$ESA = (\sum LHR \times VDF) \times 365 \times DD \times DL \times R \quad (2.2)$$

dengan:

ESA = Kumulatif lintasan sumbu standar ekivalen (*equivalent standard axle*) pada tahun pertama,

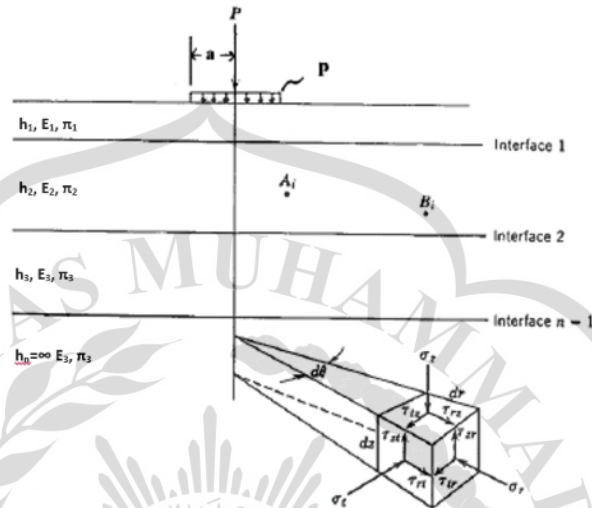
- LHR = Lintas harian rata-rata tiap jenis kendaraan niaga (satuan kendaraan perhari),
- VDF = Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*) tiap jenis kendaraan niaga,
- DD = Faktor distribusi arah,
- DL = Faktor distribusi lajur,
- CESAL = Kumulatif beban sumbu standar ekuivalen selama umur rencana, dan
- R = Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif.

7. Teori Sistem Lapis Banyak

Teori sistem lapis banyak merupakan pendekatan metode mekanistik yang digunakan dalam desain struktur perkerasan. Respon perkerasan, seperti tegangan, regangan, dan lendutan, sebagai sistem struktur multi-lapisan terhadap beban roda kendaraan dapat diamati pada Gambar 2.2. Beberapa asumsi yang umum diterapkan dalam perhitungan respon struktur perkerasan yang sederhana antara lain adalah sebagai berikut.

- a. Dalam struktur perkerasan, setiap lapisan memiliki ketebalan yang spesifik, kecuali untuk tanah dasar yang dianggap memiliki ketebalan tak terbatas. Sementara itu, lebar setiap lapisan perkerasan juga dianggap tidak terbatas.
- b. Setiap lapisan perkerasan memiliki sifat bahan yang isotropik, yaitu sifat material yang seragam di setiap titik dalam berbagai arah.
- c. Sifat bahan pada setiap lapisan perkerasan dianggap bersifat homogen.
- d. Lapisan dianggap bersifat linear elastis, di mana "linear" berarti hubungan antara tegangan dan regangan dianggap linier, dan "elastis" berarti bahwa ketika tegangan dihilangkan, regangan akan kembali ke kondisi semula.
- e. Sifat material pada perkerasan digambarkan dengan dua parameter struktural, yaitu modulus resilient (E atau MR) dan konstanta Poisson (μ)

- f. Friksi antara lapisan perkerasan dianggap baik atau tidak terjadi slip, dan
- g. Beban yang diberikan oleh roda kendaraan diasumsikan menghasilkan gaya vertikal yang merata pada perkerasan, dengan bentuk bidang yang melingkar.



Gambar 2.2 Sistem Lapis Banyak
 Sumber : (Yodder and Witczak 1975)

8. Karakteristik Material

Terdapat tiga karakteristik material perkerasan lentur yaitu *layer* viskoelastis, *layer* non linear elastis dan *layer* linear elastis. Penjelasan layer linear elastis dapat dilihat di bawah ini.

a. Layer Linear Elastis

Pemodelan lapisan dengan pendekatan elastis linier dapat digunakan untuk menghitung tegangan, regangan, dan defleksi pada struktur perkerasan yang telah menerima beban pada permukaannya. Pendekatan elastis linier ini berasumsi bahwa setiap lapisan dalam struktur perkerasan bersifat homogen, isotropik, dan elastis secara linier.

9. Permodelan Lapis Perkerasan

Huang (2004) mengemukakan bahwa sistem lapis banyak atau model lapisan elastis dapat digunakan untuk menghitung tekanan dan regangan pada titik tertentu dalam struktur perkerasan. Model ini mengasumsikan bahwa setiap lapisan perkerasan memiliki karakteristik seperti homogenitas, isotropisitas, dan sifat elastis linier, yang berarti lapisan tersebut akan kembali ke bentuk semula setelah beban dihapus. Dalam pemodelan lapisan perkerasan jalan menggunakan pendekatan elastis, diperlukan data input untuk menganalisis tegangan, regangan, serta respon struktur perkerasan terhadap beban yang diterima. Parameter-parameter yang digunakan dapat ditemukan di bawah ini.

a. Parameter tiap lapis

1) Modulus Elastisitas

Sebagian besar bahan elastis memiliki sifat untuk kembali ke bentuk semula setelah mendapatkan regangan atau tekanan. Modulus elastisitas mengacu pada rasio antara tegangan dan regangan yang terjadi pada suatu benda. Modulus elastisitas ini juga dikenal dengan istilah *Modulus Young* dan disimbolkan dengan huruf E. Nilai modulus elastisitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3.

$$E = \frac{\tau}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

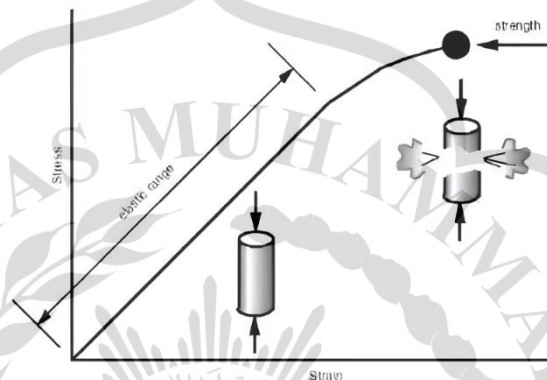
dengan:

E = Modulus elastisitas (kPa atau Psi),

τ = Tegangan (kPa), dan

ε = Regangan.

Modulus elastisitas suatu material memiliki batas tertentu untuk regangan dan tegangan elastisnya. Hubungan antara tegangan dan regangan dapat dilihat pada Gambar 2.3. Batas elastisitas sebuah bahan tidak menunjukkan kekuatan bahan dalam menahan tegangan atau regangan, tetapi lebih mengacu pada kemampuan bahan untuk kembali ke bentuk dan ukuran semula.



Gambar 2.3 Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan
Sumber : (*Pavement interactive*, (Stockholm, 2014)

Pada gambar di atas, batas elastisitas menggambarkan sejauh mana suatu bahan dapat kembali ke ukuran dan bentuk semula. Nilai modulus elastisitas untuk berbagai jenis bahan perkerasan pada tabel 2.7

Tabel 2. 7 Nilai Modulus Elastisitas Berdasarkan Jenis Bahan Perkerasan

Material	Modulus Elastisitas (Mpa)
Asphalt Concrete	1000 - 4000
Granular Base	100 - 300
Subgrade	80 - 150

Sumber : (*Pavement Analysis and Design*, Huang 2004)

2) Poisson's ratio

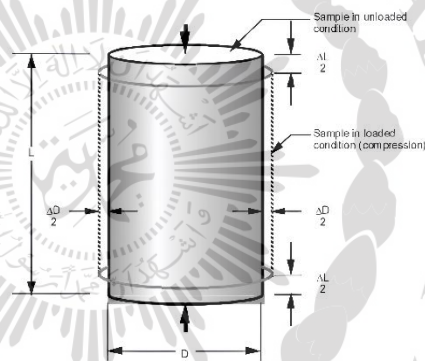
Poisson's ratio adalah salah satu parameter penting dalam analisis elastisitas sistem perkerasan jalan. *Poisson's ratio* menggambarkan perbandingan antara regangan pada arah melintang dan regangan pada arah panjang suatu spesimen yang diberikan

beban. Konsep ini dapat dilihat pada Gambar 2.4. Nilai *Poisson's ratio* dapat bervariasi antara 0 hingga sekitar 0,5, yang berarti tidak ada perubahan volume setelah pemberian beban. Nilai *Poisson's ratio* untuk berbagai jenis bahan perkerasan dapat dilihat pada Tabel 2.8 dibawah ini.

Tabel 2. 8 Nilai *Poisson's Ratio* Berdasarkan Jenis Bahan Perkerasan

Material	<i>Poisson's Ratio</i>
<i>Asphalt concrete</i>	0,35
<i>Granular base</i>	0,4
<i>Subgrade</i>	0,45

Sumber : (*Pavement Analysis and Design, Huang 2004*)



Gambar 2.4 Konsep *Poisson's Ratio*
 Sumber : (*Pavement interactive 2008*)

b. Kondisi Beban

Kondisi beban meliputi data beban roda, P (kN/Lbs), tekanan ban, q (Kpa/Psi), dan khusus untuk roda belakang, jarak antara roda ganda, d (mm/inch). Nilai q dan d dapat ditentukan berdasarkan spesifikasi teknis kendaraan yang digunakan. Nilai P dipengaruhi oleh beban yang dibawa oleh kendaraan, sehingga perbedaan terjadi antara sumbu roda belakang dan depan. Dengan menggunakan metode analitis, beban pada sumbu roda depan dan belakang dapat dianalisis secara bersamaan. Pada tahap selanjutnya, analisis struktural perkerasan membutuhkan data bidang kontak, a (mm/inch), antara roda bus dan permukaan perkerasan yang

dianggap berbentuk lingkaran dan dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.4 dibawah ini.

$$\alpha = \sqrt{\frac{p}{\pi \times q}} \quad (2.4)$$

dengan :

a = Jari-jari bidang kontak, mm

P = Beban kendaraan, kN/Lbs

q = Tekanan ban, kPa/Psi

Berikut adalah hasil yang diperoleh dari pemodelan lapisan perkerasan menggunakan sistem lapis banyak.

1) Tegangan

Ini merujuk pada intensitas gaya internal yang ada di dalam struktur perkerasan pada berbagai titik. Tegangan satuan adalah gaya per unit area (N/m^2 , Pa, atau Psi).

2) Regangan

Ini menunjukkan perbandingan antara perubahan bentuk terhadap bentuk aslinya (mm/mm atau *inch/inch*). Hal ini disebabkan oleh perubahan yang sangat kecil dalam perkerasan, yang biasanya dinyatakan dalam satuan *microstrain* (10^{-6})

3) Defleksia atau ledutan

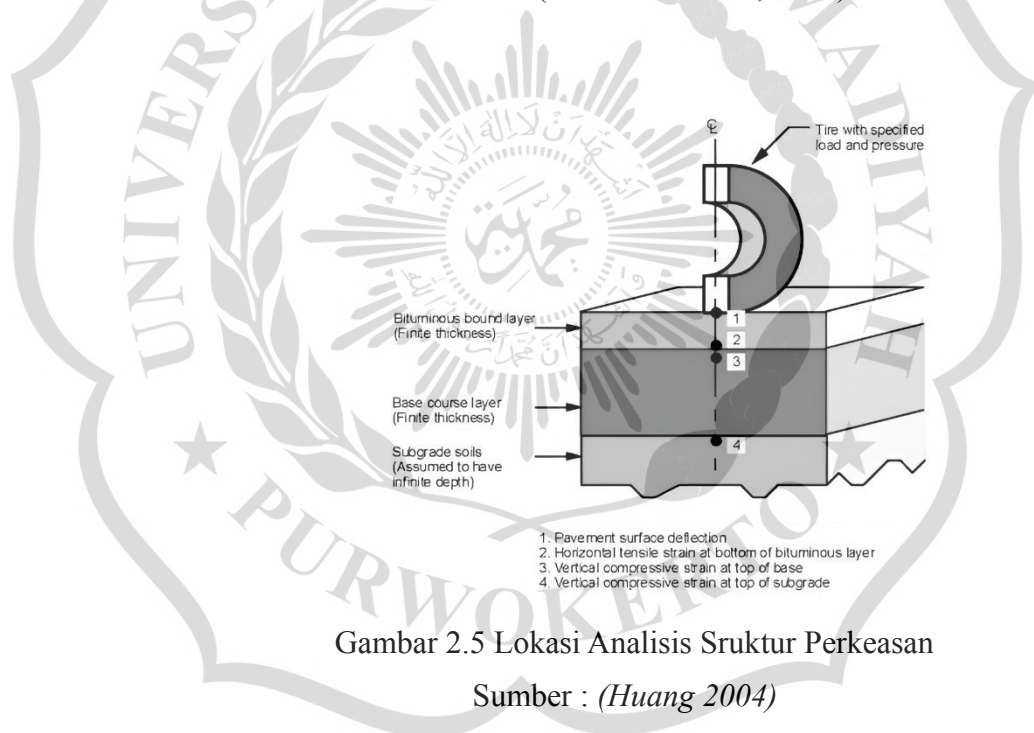
Ini merujuk pada perubahan bentuk secara linear yang diukur dalam satuan (inch atau mm).

Pemanfaatan program komputer dalam analisis lapisan elastis akan mempermudah perhitungan tegangan, regangan, dan defleksi di berbagai titik dalam struktur perkerasan.

Tabel 2.9 Analisis Struktur Lapisan Perkerasan

Lokasi	Respon	Analisis Struktur Perkerasan
Lapisan Permukaan Perkerasan	Defleksi	Digunakan dalam desain lapis tambah (<i>overlay</i>)
Bagian Bawah Lapisan Perkerasan	Regangan Tarik <i>Horizontal</i>	Digunakan untuk memprediksi retak <i>fatigue</i> pada lapis permukaan
Bagian Atas Tanah Dasar atau Bagian Bawah Lapis Pondasi Bawah	Regangan Tekan <i>Vertikal</i>	Digunakan untuk memprediksi kegagalan <i>rutting</i> yang terjadi

Sumber: (Fadhlan & Muis, 2013)



Gambar 2.5 Lokasi Analisis Struktur Perkerasan

Sumber : (Huang 2004)

10. Analisis Kerusakan Perkerasan

Jenis kerusakan perkerasan jalan yang akan dibahas mencakup *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanen deformation*. Kerusakan ini terjadi akibat beban kendaraan. Dalam analisis perhitungan menggunakan metode mekanistik-empiris, hasil yang diperoleh meliputi tegangan dan regangan pada

perkerasan lentur. Nilai tegangan dan regangan ini digunakan untuk memprediksi kerusakan yang terjadi pada perkerasan jalan lentur.

Terdapat berbagai persamaan yang digunakan untuk memprediksi jumlah beban repetisi, salah satunya adalah persamaan yang dikemukakan oleh *The Asphalt Institute*.

a. *Fatigue Cracking*

Kerusakan akibat retak lelah terjadi ketika retakan berkembang di bawah pengaruh beban berulang, dan kegagalan ini terdeteksi ketika permukaan perkerasan dipenuhi oleh retakan dengan persentase yang signifikan. Beban berulang yang terjadi secara terus-menerus dapat menyebabkan material mengalami kelelahan dan memicu terjadinya cracking, meskipun tegangan yang timbul masih berada di bawah batas ultimate material tersebut. Pada material perkerasan, beban berulang berasal dari lintasan beban kendaraan yang terjadi secara terus-menerus dengan intensitas yang bervariasi, bergantung pada jenis kendaraan, dan bersifat acak.

Persamaan untuk retak lelah pada perkerasan lentur, yang digunakan untuk menghitung jumlah repetisi beban berdasarkan regangan tarik di bawah lapisan permukaan, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.5 dibawah ini.

$$N_f = 0,0796 (\epsilon_t)^{-3,921} |E^*|^{-0,854} \quad (2.5)$$

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 dan,

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

b. *Rutting*

Alur yang terbentuk pada lapisan permukaan jalan merupakan hasil akumulasi dari semua deformasi plastis yang terjadi pada lapisan aspal, lapisan agregat (fondasi), dan lapisan tanah dasar. Kriteria alur adalah kriteria kedua yang digunakan dalam Metode Analitis-Mekanistik untuk menggambarkan kerusakan struktur perkerasan akibat beban berulang. Batasan nilai alur maksimum sangat penting untuk mencegah bahaya bagi pengendara, terutama saat melintasi area *rutting* pada kecepatan tinggi.

Deformasi plastis pada campuran beraspal akibat beban berulang dapat diukur di laboratorium menggunakan berbagai jenis alat. Sementara itu, '*total rutting*' perlu dihitung untuk seluruh lapisan perkerasan, mulai dari lapisan permukaan, pondasi, hingga lapisan tanah dasar. Penelitian menunjukkan bahwa 65% dari '*total rutting*' disebabkan oleh penurunan (*settlement*) yang terjadi pada tanah dasar, sehingga nilai kritis kedua dalam Metode Analitis-Mekanistik adalah '*compression strain*' yang terjadi pada titik tertinggi lapisan. Deformasi permanen pada setiap lapisan struktur tanah dasar dapat terdeteksi, yang menjadikannya lebih sulit untuk diprediksi dibandingkan dengan retak lelah. Ukuran kegagalan yang ada, yang berkaitan dengan alur, biasanya digunakan untuk menunjukkan kelemahan pada suatu struktur perkerasan. Hal ini umumnya diukur dengan istilah regangan vertikal (ϵ_c) yang terdapat pada lapisan tanah dasar. (Fadhlan & Muis, 2013)

Persamaan yang digunakan untuk menghitung jumlah repetisi beban berdasarkan regangan tekan di bawah lapisan pondasi bawah dapat dilihat pada Persamaan 2.6 dibawah ini.

$$N_r = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (2.6)$$

dengan :

N_d = Jumlah nilai beban repetisi yang diijinkan untuk mengontrol rutting,

ϵ_c = Regangan tekan vertikal di atas lapisan dasar,

f_5 = Koefisien kriteria deformasi permanen, dan

f_4 = Koefisien kriteria deformasi permanen.

c. *Permanent Deformation*

Persamaan untuk deformasi permanen pada perkerasan lentur, yang digunakan untuk menghitung jumlah repetisi beban, dapat ditemukan pada Persamaan 2.7 dibawah ini.

$$N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (2.7)$$

N_d = Jumlah nilai beban repetisi yang diijinkan untuk mengontrol rutting,

ϵ_c = Regangan tekan vertikal di atas lapisan dasar,

f_5 = Koefisien kriteria deformasi permanen, dan

f_4 = Koefisien 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 $f_5 = 4,477$.

11. Program KENPAVE

Program KENPAVE adalah perangkat lunak yang digunakan untuk menganalisis ketebalan perkerasan jalan, mulai dari lapisan tanah dasar, pondasi, hingga lapisan permukaan jalan. Program ini dikembangkan oleh Yang H. Huang. KENPAVE hanya kompatibel dengan sistem operasi Windows 95 hingga *Windows XP Professional Service Pack 2*. Meskipun dapat diinstal pada sistem operasi yang lebih baru seperti *Windows Vista* dan *Windows 7*, program ini tidak akan berfungsi dengan optimal karena dirancang untuk sistem operasi versi lama.

Program KENPAVE memiliki empat pilihan utama, yaitu *LAYERINP*, *KENLAYER*, *SLABSINP*, dan *KENSLABS*, serta beberapa menu tambahan untuk menjalankan program. Untuk analisis perkerasan lentur, menu yang digunakan adalah *LAYERINP* dan *KENLAYER*. Sementara itu, untuk analisis perkerasan lentur dan perkerasan kaku, program KENPAVE menawarkan kemudahan dibandingkan dengan program lainnya. Hal ini karena program KENPAVE hanya memerlukan data karakteristik dan material perkerasan jalan, seperti modulus elastisitas, *Poisson's ratio*, beban roda, tekanan ban, dan koordinat untuk menghitung tegangan dan regangan yang diperlukan.

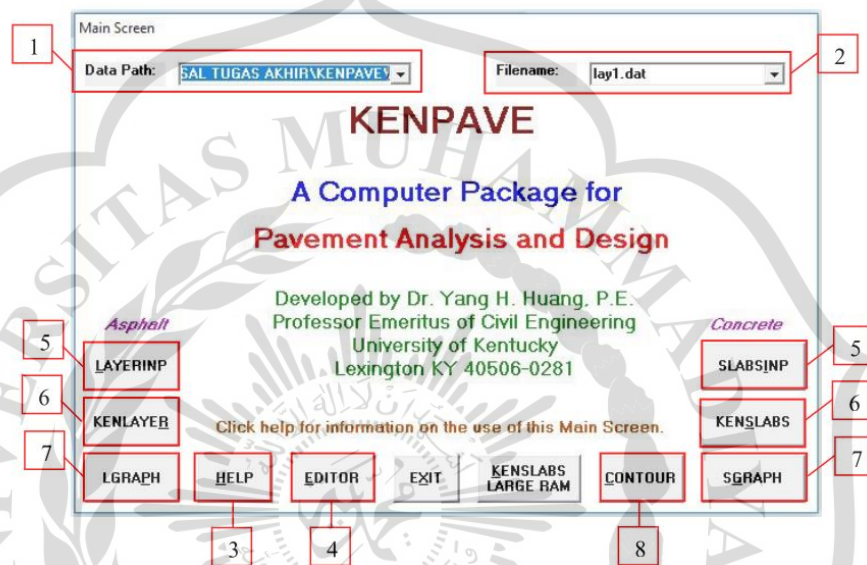
a. Perkembangan pada Program KENPAVE

Program KENPAVE yang disertakan dalam buku *Pavement Analysis and Design* edisi kedua karya Yang Huang merupakan versi Windows yang menggantikan empat program DOS, yaitu *LAYERINP*, *KENLAYER*, *SLABSINP*, dan *KENSLABS*, yang ada pada buku edisi pertama yang diterbitkan pada tahun 1993. Antarmuka program KENPAVE terpusat pada layar utama, memungkinkan berbagai fungsi dilakukan dengan mudah. Setelah *file* data dibuat dan dinamai (atau diganti namanya), seluruh proses analisis dan desain dapat diselesaikan hanya dengan mengklik tombol atau menu tanpa perlu mengetikkan nama *file* lagi.

File data yang dipersiapkan oleh KENPAVE sedikit berbeda dibandingkan dengan program-program sebelumnya. Sebagai contoh, program-program lama hanya mendukung satuan dalam sistem bahasa Inggris atau SI. Pada program lama, satuan berat untuk PCI menggunakan satuan Inggris, sedangkan KENPAVE menggunakan PCF. Namun, pada *LAYERINP* untuk perkerasan lentur dan *SLABSINP* untuk perkerasan kaku, file lama dapat secara otomatis dikonversi ke format baru, sehingga file data lama tetap dapat digunakan untuk menjalankan *KENLAYER* dan *KENSLABS*.

b. Tampilan menu utama program KENPAVE

Gambar 2.6 dibawah ini memperlihatkan tampilan utama dari program KENPAVE, yang terdiri dari dua menu di bagian atas dan sebelas menu di bagian bawah. Tiga menu di sisi kiri digunakan untuk analisis perkerasan lentur, sementara lima menu di sisi kanan digunakan untuk perkerasan kaku, dan sisanya diperuntukkan bagi tujuan umum.



Gambar 2.6 Tampilan Menu Utama Program KENPAVE

Sumber : *Screen picture* KENPAVE, diakses Tahun 2024

1) Data Path

Merupakan direktori yang digunakan untuk menyimpan data, dengan Data Path default biasanya terletak di C:\KENPAVE\ sesuai dengan lokasi penginstalan.

2) *Filename*

Merupakan nama *file* yang akan digunakan untuk analisis dengan *LAYERINP* atau *SLABSINP* ditentukan pada kolom *Filename*. Tidak perlu mengisi kolom *Filename* karena *file* yang dibuat akan otomatis muncul di menu *Filename*. Semua *file* data harus memiliki ekstensi DAT. Nama *file* yang tertera di kotak ini juga akan digunakan dalam file lain yang dihasilkan selama proses

KENLAYER atau *KENSLABS*. Untuk mengedit *file* yang sudah ada, dapat mengetikkan nama *file* atau memilih nama *file* dari daftar *drop-down box*.

3) *Help*

Menu bantuan (*help*) menyediakan penjelasan mengenai parameter input dan cara penggunaan yang benar dari program. Sebagian besar *textbox* dan data berada pada layar yang sama. Beberapa menu bantuan atau tombol perlu diklik untuk membacanya. Menu bantuan ini sangat berguna, karena setiap menu baru dilengkapi dengan penjelasan yang memudahkan pengguna dalam menggunakan program.

4) *Editor*

Pada menu *editor* dapat digunakan untuk memeriksa, mengubah, dan mencetak data *file*. Bagi pengguna pemula dalam pengaturan *file* data, disarankan untuk menggunakan *LAYERINP* atau *SLABSINP* sebagai *editor*. Namun, bagi pengguna yang lebih berpengalaman, mereka mungkin lebih memilih untuk melakukan beberapa perubahan sederhana pada *file* data menggunakan *editor*, karena cara ini memungkinkan mereka untuk mengakses dan melihat isi seluruh *file* dengan lebih cepat, daripada melalui serangkaian layar di *LAYERINP* atau *SLABSINP*. Setelah semua analisis selesai, klik *exit* untuk menutup program KENPAVE.

5) *LAYERINP* dan *SLABSINP*

LAYERINP atau *SLABSINP* digunakan untuk membuat data *file* sebelum *KENLAYER* atau *KENSLABS* dapat dijalankan.

6) *KENLAYER* dan *KENSLABS*

KENLAYER dan *KENSLABS* adalah program utama untuk analisis perkerasan, yang hanya dapat dijalankan setelah *file* data diisi. Program ini akan membaca data dari *file* dan memulai eksekusi. Selama proses eksekusi, beberapa hasil akan ditampilkan di layar untuk memberi indikasi bahwa program sedang berjalan.

7) *LGRAPH* atau *SGRAPH*

LGRAPH atau *SGRAPH* digunakan untuk memvisualisasikan grafik rencana dan penampang perkerasan, serta menyajikan berbagai informasi terkait input dan output.

8) *Contour*

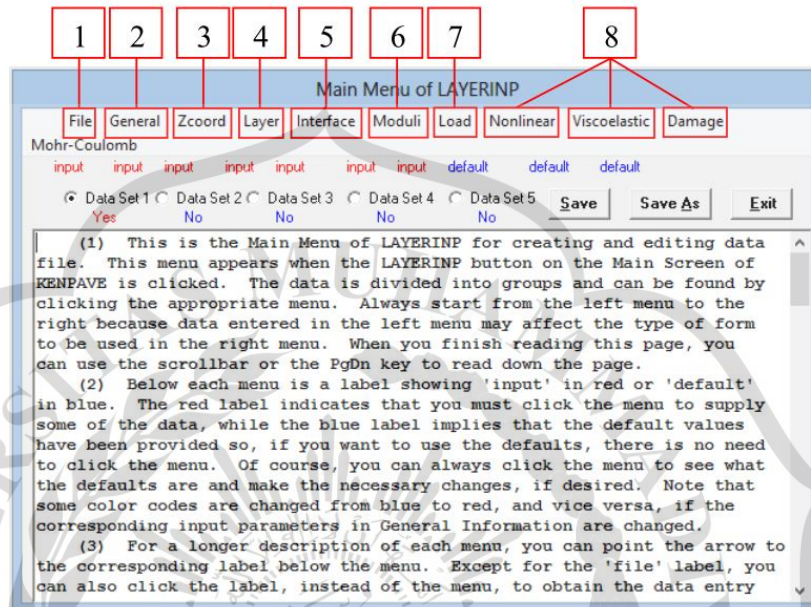
Menu ini digunakan untuk menggambar plot kontur tekanan atau momen pada arah x atau y, dengan plot kontur yang ditujukan khusus untuk perkerasan kaku.

12. Program *KENLAYER*

Program *KENLAYER* digunakan untuk analisis perkerasan lentur dan untuk menentukan rasio kerusakan berdasarkan model tekanan (*distress model*). *Distress model* dalam *KENLAYER* mencakup retak dan deformasi, yang berarti output regangan yang dianalisis melalui *KENLAYER* menghasilkan retak dan deformasi dalam perancangan perkerasan jalan. Salah satu contohnya adalah regangan tarik *horizontal* di bawah lapisan perkerasan yang dapat menyebabkan retak akibat kelelahan, serta regangan tekan vertikal di permukaan dasar yang berpotensi menyebabkan deformasi permanen atau *rutting*.

Program *KENLAYER* menganalisis perkerasan jalan dengan berbagai tipe, seperti linear, non-linear, viscoelastis, serta kombinasi dari ketiganya. Program ini juga dapat menganalisis berbagai jenis beban sumbu kendaraan, termasuk sumbu tunggal, sumbu roda ganda, sumbu tandem, dan sumbu triple. Data dapat diinput ke dalam *KENLAYER* melalui menu *LAYERINP*.

Menu *LAYERINP* memiliki 8 (delapan) submenu, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.7 dibawah yang digunakan untuk menginput data dengan penjelasan sebagai berikut.



Gambar 2.7 Menu Utama Pada *LAYERINP*

Sumber : *Screen picture KENPAVE*, diakses Tahun 2024

a. *File*

Berfungsi untuk memilih *file* yang akan diinput, *new* untuk *file* yang baru dan *old* untuk *file* yang lama.

b. *General*

Untuk menu *General* terdapat beberapa menu terlihat pada Gambar 2.8 dibawah ini dengan keterangan sebagai berikut.

General Information of LAYERINP for Set No. 1

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

(1) This form appears when the 'General' menu 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 entire text, you can click this textbox to make it active and then use the PgDn key.

(2) When creating a new file, this form must be entered first because some default values to be used in the other forms vary with the system

Gambar 2.8 Data *Input* Pada Menu *General*

Sumber : *Screen picture* KENPAVE, diakses Tahun 2024

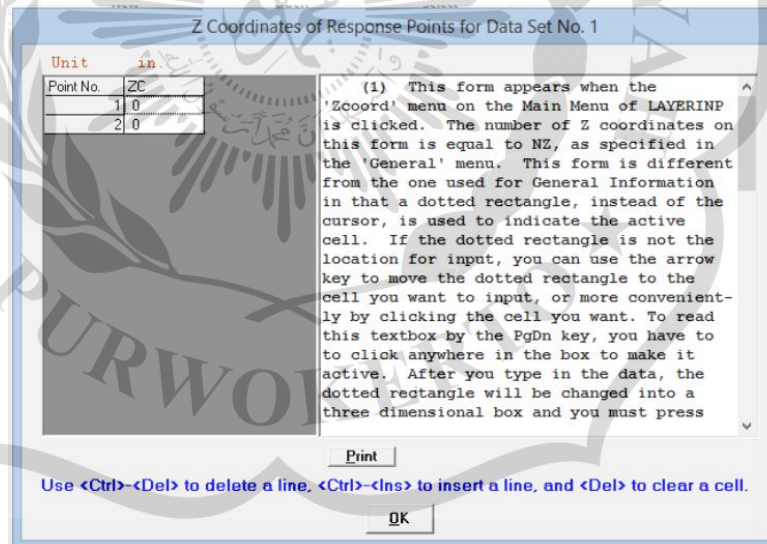
- 1) Title : Judul dari analisis perkerasan.
- 2) MATL : Tipe material, (1) jika seluruh lapisan linear elastis, (2) jika material non linear elastis, (3) jika material lapisan viscoelastis, dan 4) jika material kombinasi dari ketiga lapisan
- 3) NDAMA : Menganalisis kerusakan, (0) jika tidak ada analisis kerusakan, (1) terdapat kerusakan pada analisis, dan (2) jika tidak terdapat kerusakan pada analisis.
- 4) DEL : Akurasi hasil analisis. Standar akurasi 0,001.
- 5) NL : Jumlah lapisan, maksimum 19 lapisan.
- 6) NZ : Letak koordinat arah Z yang ingin dianalisis. Jika

NDAMA = 1 atau 2, maka NZ = 0, hal ini dikarenakan program akan menganalisis koordinat yang mengalami kerusakan.

- 7) NSTD : (1) untuk vertikal displacement, (5) untuk vertikal displacement dan (9) untuk vertikal displacement, nilai tegangan dan regangan.
- 8) NBOUND : (1) jika antar semua lapisan saling terhubung/terikat, jika tiap lapisan tidak terikat atau gaya geser diabaikan
- 9) NUNIT : Satuan yang digunakan. (0) Satuan English, dan (1) Satuan International.

c. *Zcoord*

Jumlah poin yang ada dalam menu *Zcoord* sama dengan jumlah NZ pada menu *General*. Menu *Zcoord* dapat dilihat pada Gambar 2.9, dengan keterangan sebagai berikut.



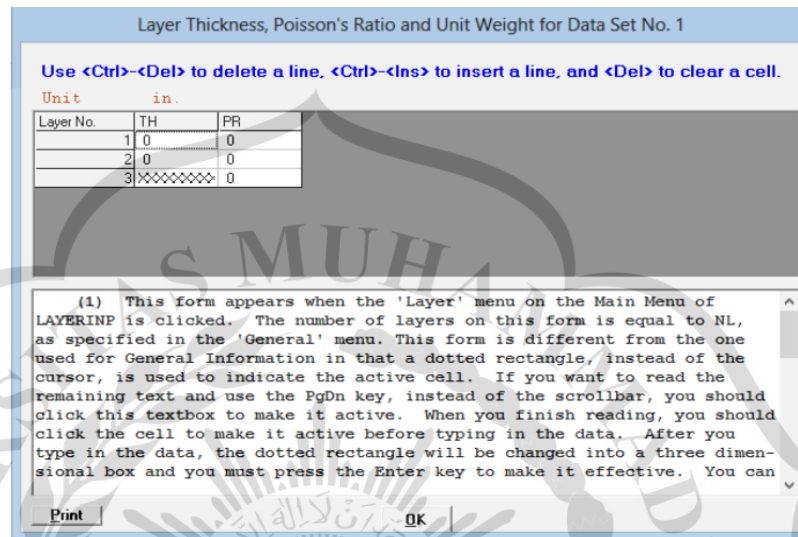
Gambar 2.9 Data Input Pada Menu *Zcoord*

Sumber : *Screen picture* KENPAVE, diakses Tahun 2024

- 1) Unit : Nomor titik sesuai dengan jumlah titik yang ingin dianalisis.
- 2) ZC : Jarak vertikal atau jarak dalam arah Z dimana jarak tersebut yang akan dianalisis program

d. *Layer*

Jumlah layer yang ada dalam menu *Layer* sama dengan jumlah NL pada menu *General*. Menu *Layer* dapat dilihat pada Gambar 2.10, dengan keterangan sebagai berikut.

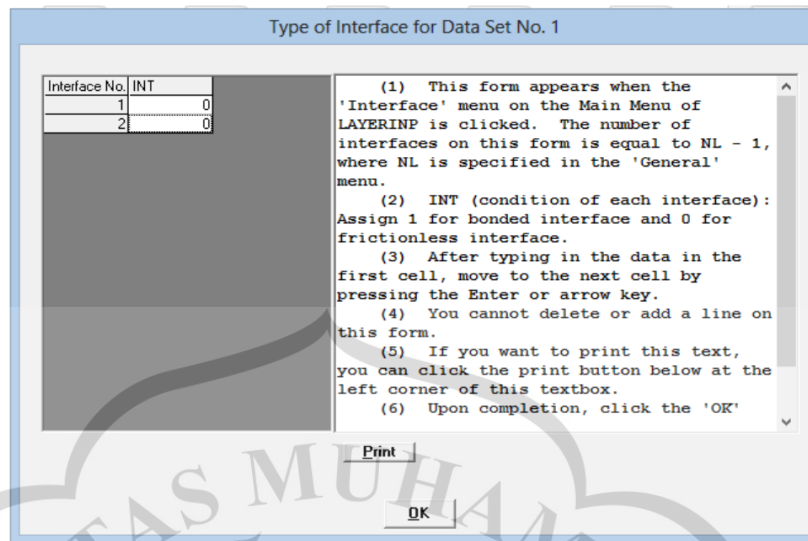


Gambar 2.10 Data Menu Pada *Menu Layer*
Sumber : *Screen picture* KENPAVE, diakses Tahun 2024

- 1) Unit : Nomor titik sesuai dengan jumlah lapisan,
- 2) TH :Tebal tiap lapisan,
- 3) PR : *Poisson Ratio's* tiap layer.

e. *Interface*

Menu interface ini berkaitan dengan NBOND yang ada dalam menu *General*. Jika NBOND = 1, maka menu interface akan default. Jika NBOND = 2, Menu *Layer* dapat dilihat pada Gambar 2.11 dibawah ini.

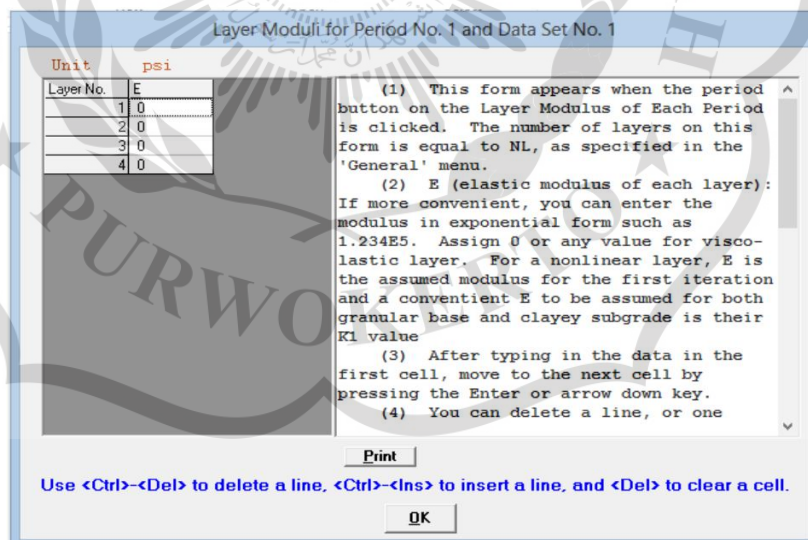


Gambar 2.11 Data Input Pada Menu *Interface*

Sumber : *Screen picture* KENPAVE, diakses Tahun 2024

f. *Moduli*

Jumlah periode pada menu *Moduli* sesuai dengan jumlah NPY pada menu *General*, dengan batas maksimum periode adalah 12. Menu *Moduli* dapat dilihat pada Gambar 2.12, dengan penjelasan sebagai berikut.



Gambar 2.12 Data Input Pada Menu *Moduli*

Sumber : *Screen picture* KENPAVE, diakses Tahun 2024

- 1) Unit : Nomor titik sesuai dengan jumlah lapisan,
- 2) E : Modulus elastisitas tiap layer.

g. *Load*

Jumlah unit yang terdapat dalam menu *Load* sesuai dengan jumlah NLG pada menu *General*. Menu *Load* dapat dilihat pada Gambar 2.13, dengan penjelasan sebagai berikut.

Load Information for Data Set No. 1

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

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

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

(1) This form appears when the 'Load' menu on the Main Menu of LAYERINP is clicked. The number of lines, or load groups, is equal to NLG, as specified in the 'General' menu. Please refer to Figure 3.8 for axle arrangements.

(2) LOAD (type of loading): Assign 0 for single axle with single tire, 1 for single axle with dual tires, 2 for tandem axles, and 3 for tridem axles.

(3) CR (contact radius of circular loaded ares).

(4) CP (contact pressure on circular loaded ares).

(5) YW (center to center spacing between two dual wheels along the y

Print OK

Gambar 2.13 Data Input Pada Menu *Load*

Sumber : *Screen picture* KENPAVE, diakses Tahun 2024

- 1) Load : Jika nilai 0 untuk sumbu tunggal roda tunggal, 1 untuk sumbu tunggal roda ganda, 2 untuk sumbu tandem, 3 untuk sumbu triple.
- 2) CR : Radius kontak pembebanan.
- 3) CP : Nilai beban.
- 4) YW : Jarak antar roda arah y.
- 5) XW : Jarak antar roda arah x.

Jika kolom Load = 0, maka kolom YW dan XW = 0

- 6) NR atau NPT : Jumlah pengulangan beban berdasarkan jumlah *Tire Spacing*.
- 7) Tire Spacing : Jarak tinjauan ban.

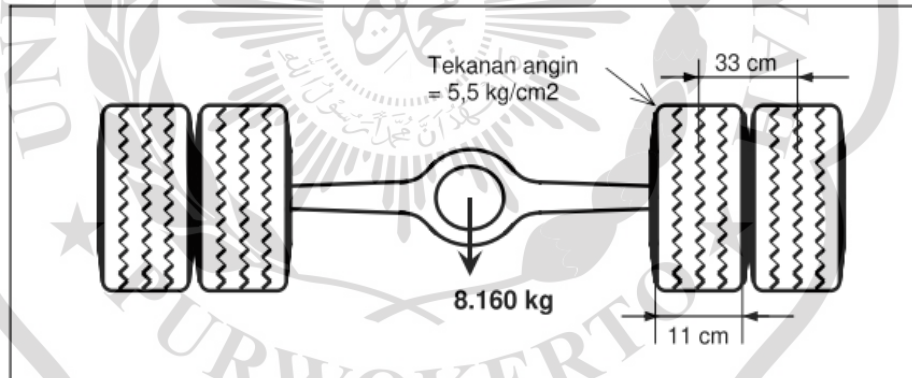
13. Data Masukan (*Input*)

Data yang diperlukan sebagai masukan dalam program KENPAVE adalah data struktur perkerasan yang berkaitan dengan perencanaan tebal perkerasan metode mekanistik teori sistem lapis banyak. Data tersebut antara

lain: modulus elastisitas, *poisson's ratio*, tebal lapis perkerasan, dan kondisi medan. Modulus elastisitas dari lapisan permukaan sampai tanah dasar yang diperlukan adalah dari modulus elastisitas yang telah ditentukan pada tabel 2.7 dan Nilai *poisson's ratio* ditentukan berdasarkan tabel 2.8.

Data terdiri dari data beban roda P (kN/lbs), data tekanan ban q (Kpa/psi), data jarak antara roda ganda d (cm/inch), dan data jari-jari bidang kontak a (cm/inch) yang dapat dilihat pada Gambar 2.14 dibawah. Pada penelitian ini digunakan data kondisi beban berdasarkan data yang digunakan di Indonesia menurut (Sukirman, 2010 penerbit, nova) sebagai berikut.

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



Gambar 2.14 Sumbu Standar Ekuivalen di Indonesia

Sumber : (Sukirman, penerbit nova tahun 2010)

14. Data Keluaran (*Output*)

Setelah semua data yang diperlukan dimasukkan ke dalam program KENPAVE maka program akan menjalankan analisis perkerasan. Keluaran dari program ini adalah tegangan, regangan dan lendutan. Ada sembilan keluaran dari program ini yaitu *vertical deflection*, *tegangan vertikal*, *major principal stress*, *minor principal stress*, *intermediate stress*, *tegangan vertikal*, *major principal strain*, *minor principal strain*, dan *horizontal principal strain*. Pada

penelitian ini menggunakan *horizontal tensile strain* dan *vertical compressive strain* untuk menghitung jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking*, *rutting* dan *permanent deformation*.

