

BAB III

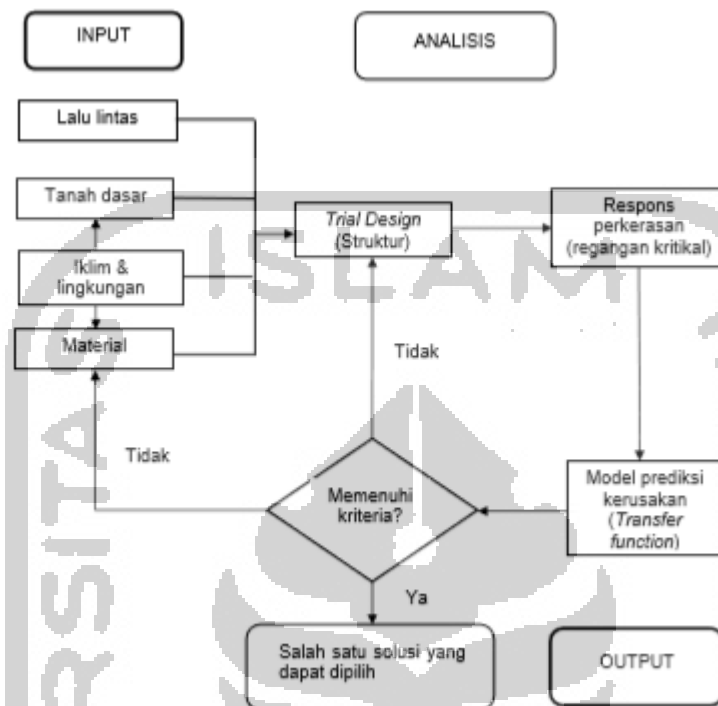
LANDASAN TEORI

3.1 Desain Tebal Perkerasan Dengan Metode Mekanistik Empiris

Metode mekanistik empiris didasarkan pada mekanika material yang membutuhkan data seperti beban roda, respons perkerasan, seperti tegangan atau regangan. Nilai respons digunakan untuk memprediksi tekanan dari uji laboratorium dan data lapangan. Pengamatan pada pengerjaan di lapangan sangat diperlukan karena teori saja belum cukup terbukti untuk merancang perkerasan jalan secara realistis. (Huang, 2014)

Pada metode mekanistik *Multilayered Elastic System* merupakan salah satu sistem yang digunakan untuk penyelesaian secara analisis. Respon dari suatu perkerasan yang dikarenakan terdapat beban sumbu kendaraan yang melintas di atasnya merupakan respon tegangan, regangan dan lendutan yang berkaitan dengan sistem struktur lapisan banyak. Penggunaan teori *Multilayered Elastic System* berhubungan dengan kriteria tegangan untuk mendesain dipertimbangkan berdasarkan teori yang digunakan, karakteristik material dan pengembangan dari kriteria kerusakan dari setiap mode tekanan.

Prosedur desain lapis perkerasan elastis mempertimbangkan deformasi permanen (*rutting*) serta retak lelah dari lapisan ikat aspal sebagai dua mekanisme kegagalan yang paling signifikan. (Yodder dan Witczak, 1975)

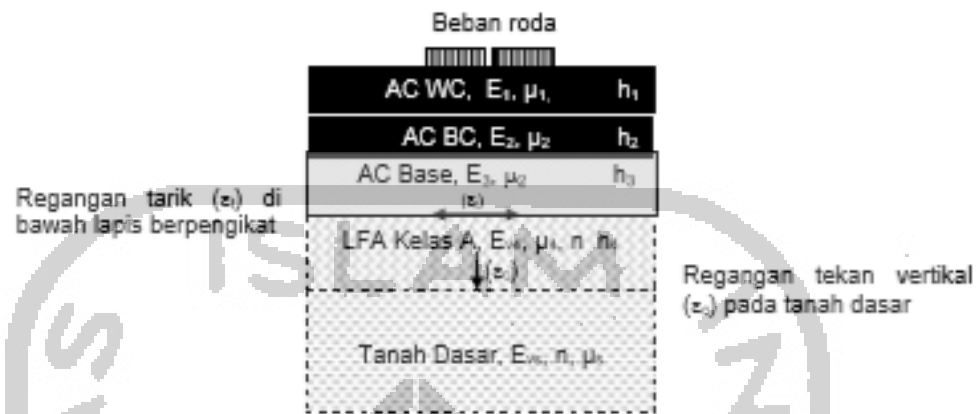


Gambar 3. 1 Prosedur Desain Perkerasan Lentur Menggunakan Pendekatan Mekanistik

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

Seperti ditunjukkan pada bagan alir prosedur perencanaan (Gambar 3.1), proses desain bersifat iteratif (*trial and error*). Dimulai dengan memilih suatu struktur yang diperkirakan akan mampu menerima beban rencana. Selanjutnya dilakukan analisis untuk mendapatkan besaran regangan kritikal untuk melihat apakah struktur tersebut dapat menerima beban rencana. Apabila ternyata seluruh atau salah satu regangan kritikal tersebut menunjukkan bahwa struktur tersebut tidak dapat menerima beban rencana maka dilakukan perubahan struktur (dapat berupa perubahan dimensi atau material, atau kedua-duanya). Analisis diulangi untuk menghitung regangan-regangan kritikal dan seterusnya hingga diperoleh struktur yang memenuhi kriteria desain.

Tipikal sistem perkerasan lentur berdasarkan pendekatan mekanistik ditunjukkan pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Tipikal Sistem Perkerasan

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

dengan:

AC WC = Asphaltic Concrete Wearing Course,

AC BC = Asphaltic Concrete Binder Course,

AC Base = Asphaltic Concrete Base Course,

E_i = Modulus Elastisitas Lapisan ke- i ,

μ_i = Poisson's Ratio Lapisan ke- i , dan

h_i = Tebal Lapisan ke- i .

Kerusakan jalan yang akan dianalisis pada penelitian ini adalah *fatigue cracking*, *rutting*, dan *permanent deformation*. Beban kendaraan dapat mengakibatkan kerusakan perkerasan. Nilai tegangan dan regangan pada perkerasan lentur didapatkan dari perhitungan dengan metode mekanistik-empiris. Untuk dapat memprediksi kerusakan tersebut digunakan nilai tegangan dan regangan. Ada beberapa cara untuk memprediksi jumlah repetisi beban, salah satunya yaitu persamaan model *The Asphalt Institute* (Simanjutak, 2014).

Persamaan 3.1 berikut adalah persamaan retak lelah (*fatigue cracking*) pada perkerasan lentur untuk mengetahui jumlah keseluruhan repetisi beban berdasarkan regangan tarik yang ada di bawah lapis permukaan.

$$N_f = 0,0796 (\epsilon_t)^{-3,921} | E |^{-0,854} \quad (3.1)$$

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 Elastis pada lapis permukaan atau lapisan HMA.

Persamaan 3.2 berikut adalah persamaan retak alur (*rutting*) perkerasan lentur untuk mengetahui jumlah repetisi beban berdasarkan regangan tekan di bawah lapis pondasi bawah.

$$N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (3.2)$$

dengan:

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

ϵ_c = regangan tekan vertical diatas lapisan dasar,

f_5 = koefisien kriteria deformasi permanen, dan

f_4 = koefisien kriteria deformasi permanen.

Persamaan 3.3 berikut adalah persamaan *permanent deformation* perkerasan lentur untuk mengetahui jumlah repetisi beban.

$$N_d = f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \quad (3.3)$$

dengan:

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

ϵ_c = regangan tekan vertical diatas 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 $f_5 = 4,477$.

3.2 Desain Tebal Perkerasan Dengan Metode Bina Marga 2017

3.2.1 Umur Rencana

Umur rencana jalan perlu ditentukan dalam perencanaan tebal lapisan perkerasan. Umur rencana adalah berapa tahun perkerasan tersebut dapat menahan beban rencana mulai jalan tersebut dibuka sampai memerlukan perbaikan yang berarti atau diberi *overlay*. Tabel 3.1 berikut menunjukkan umur rencana perkerasan jalan baru.

Tabel 3.1 Umur Rencana Perkerasan Jalan Baru (UR)

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

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

3.2.2 Faktor Pertumbuhan Lalu Lintas

Nilai (i) dapat ditentukan berdasarkan data–data pertumbuhan series (*historical growth data*) atau beberapa rumus yang berhubungan dengan faktor pertumbuhan lain yang berlaku. Tabel 3.2 dapat digunakan jika tidak tersedia data.

Tabel 3.2 Faktor Pertumbuhan Laju 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: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

Pertumbuhan lalu lintas selama umur rencana dihitung dengan faktor pertumbuhan kumulatif (*Cumulative Growth Factor*) seperti pada persamaan 3.4 berikut.

$$R = \frac{(1+0,01 i)^{UR}-1}{0,01 i} \quad (3.4)$$

dengan:

R = faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif ,

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

UR= umur rencana (tahun).

Jika kemungkinan selama umur rencana terjadi perbedaan laju pertumbuhan maka faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif dapat dihitung dari persamaan 3.5 berikut.

$$R = \frac{(1+0,01 i_1)^{UR_1}-1}{0,01 i_1} + (1 + 0, i_1)^{(UR_1-1)}(1 + 0,01 i_2) \left\{ \frac{(1+0,01 i_2)^{(UR-UR_1)}-1}{0,01 i_2} \right\} \quad (3.5)$$

dengan:

R = faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif,

i_1 = laju pertumbuhan tahunan lalu lintas periode 1(%),

i_2 = laju pertumbuhan tahunan lalu lintas periode 2 (%),

UR = total umur rencana (tahun), dan

UR1 = umur rencana periode 1 (tahun).

Persamaan 3.6 berikut adalah perhitungan faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif apabila kapasitas lalu lintas diperkirakan tercapai pada tahun ke (Q) dari umur rencana (UR).

$$R = \frac{(1+0,01 i)^Q - 1}{0,01 i} + (UR - Q) (1 + 0, i)^{(Q-1)} \quad (3.6)$$

3.2.3 Lalu Lintas Pada Lajur Rencana

Lajur rencana adalah salah satu lajur lalu lintas dari suatu ruas jalan yang menampung lalu lintas kendaraan niaga (truk dan bus) paling besar. Faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL) digunakan untuk menghitung beban lalu lintas pada lajur rencana yang dinyatakan dalam kumulatif beban gandar standar (ESA).

Faktor distribusi arah (DD) umumnya diambil nilai 0,5 untuk jalan dua arah kecuali untuk lokasi yang dilintasi 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. Tabel 3.3 berikut menunjukkan nilai faktor distribusi lajur.

Tabel 3.3 Faktor Distribusi Lajur (DL)

Jumlah Lajur Setiap Arah	Kendaraan Niaga Pada Lajur Desain (% terhadap populasi kendaraan niaga)
1	100
2	80
3	60
4	50

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

3.2.4 Faktor Ekuivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*)

Nilai *VDF* diambil berdasarkan survei yang telah dilakukan dilapangan. Apabila tidak memungkinkan dilakukan survei, Tabel 3.4 berikut dapat menjadi acuan.

Tabel 3.4 Nilai VDF Masing–Masing Jenis Kendaraan Niaga

Jenis Kendaraan	Sumatera				Jawa				Kalimantan				Sulawesi				Bali, Nusa Tenggara, Maluku dan Papua			
	Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal		Beban Aktual		Normal	
	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5	VDF 4	VDF 5
5B	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6A	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50	0,55	0,50
6B	4,50	7,40	3,40	4,60	5,30	9,20	4,00	5,10	4,80	8,50	3,40	4,70	4,90	9,00	2,90	4,00	3,00	4,00	2,50	3,00
7A1	10,10	18,40	5,40	7,40	8,20	14,40	4,70	6,40	9,90	18,30	4,10	5,30	7,20	11,40	4,90	6,70	-	-	-	-
7A2	10,50	20,00	4,30	5,60	10,20	19,00	4,30	5,60	9,60	17,70	4,20	5,40	9,40	19,10	3,80	4,80	4,90	9,70	3,90	6,00
7B1	-	-	-	-	11,80	18,20	9,40	13,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7B2	-	-	-	-	13,70	21,80	12,60	17,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7C1	15,90	29,50	7,00	9,60	11,00	19,80	7,40	9,70	11,70	20,40	7,00	10,20	13,20	25,50	6,50	8,80	14,00	11,90	10,20	8,00
7C2A	19,80	39,00	6,10	8,10	17,70	33,00	7,60	10,20	8,20	14,70	4,00	5,20	20,20	42,00	6,60	8,50	-	-	-	-
7C2B	20,70	42,80	6,10	8,00	13,40	24,20	6,50	8,50	-	-	-	-	17,00	28,80	9,30	13,50	-	-	-	-
7C3	24,50	51,70	6,40	8,00	18,10	34,40	6,10	7,70	13,50	22,90	9,80	15,00	28,70	59,60	6,90	8,80	-	-	-	-

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

3.2.5 Beban Sumbu Standar Kumulatif

Beban sumbu standar kumulatif atau *Cumulative Equivalent Single Axle Load* (*CESAL*) merupakan jumlah kumulatif beban sumbu lalu lintas desain pada lajur desain selama umur rencana, yang ditentukan sebagaimana persamaan 3.7 berikut.

$$ESA_{TH-1} = (\sum LHRJK \times VDFJK) \times 365 \times DD \times DL \times R \quad (3.7)$$

dengan:

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

$LHRJK$ = lintas harian rata – rata tiap jenis kendaraan niaga (satuan kendaraan per hari),

$VDFJK$ = Faktor Ekivalen Beban (*Vehicle Damage Factor*) tiap jenis kendaraan niaga Tabel 3.4,

DD = Faktor distribusi arah,

DL = Faktor distribusi lajur (Tabel 3.3),

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

R = Faktor pengali pertumbuhan lalu lintas kumulatif.

3.2.6 Menentukan Nilai *CBR* Tanah Dasar

Metode Persentil dipilih untuk menghitung *CBR* tanah dasar dengan nilai *CBR* yang beragam. Nilai *CBR* yang dipilih adalah nilai persentil ke 10 (*10thpercentile*) yang berarti 10% data tersebut lebih kecil atau sama dengan nilai *CBR* pada persentil tersebut.

Tabel 3.5 Desain Fondasi Jalan Minimum

CBR Tanah Dasar (%)	Kelas Kekuatan Tanah Dasar	Uraian Struktur Fondasi	Perkerasan Lentur			Perkerasan Kaku
			Beban lalu lintas pada lajur rencana dengan umur rencana 40 tahun (juta ESA5)			Stabilisasi Semen
			<2	2-4	>4	
			Tebal minimum perbaikan tanah dasar			
≥6	SG6	Perbaikan tanah dasar dapat berupa stabilisasi semen atau material timbunan pilihan (sesuai persyaratan Spesifikasi Umum, Devisi 3 - Pekerjaan Tanah) (Pemadatan lapisan ≤ 200mm tebal gembur)	Tidak diperlakukan perbaikan			300
5	SG5		-	-	100	
4	SG4		100	150	200	
3	SG3		150	200	300	
2,5	SG2,5		175	250	350	
Tanah Ekspansif (Potensi Pemuaian > 5%)			400	500	600	Berlaku ketentuan yang sama dengan fondasi jalan perkerasan lentur
Perkerasan di atas tanah lunak	SG1	Lapis penopang	1000	1100	1200	
		atau lapis penopang dan geogrid	650	750	850	
Tanah gambut dengan HRS ata DBST untuk perkerasan untuk jalan raya minor (nilai minimum - ketentuan lain berlaku)		Lapis penopang berbutir	1000	1250	1500	

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

3.2.7 Pemilihan Struktur Perkerasan

Pemilihan jenis perkerasan dilakukan berdasarkan nilai $CESA_4$. Tabel 3.6 dapat dijadikan acuan untuk pemilihan jenis perkerasan, namun perencana harus mempertimbangkan biaya, keefektifan dan keefisienan pekerjaan. Tabel 3.7 digunakan untuk menentukan tebal perkerasan. Pemilihan tebal perkerasan dipilih berdasarkan nilai $CESA_5$.

Tabel 3.6 Pemilihan Jenis Perkerasan

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

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

Tabel 3.7 Bagan Desain - 3B. Desain Perkerasan Lentur – Aspal dengan Lapis Fondasi Berbutir

STRUKTUR PERKERASAN										
	FFF1	FFF2	FFF3	FFF4	FFF5	FFF6	FFF7	FFF8	FFF9	
Solusi yang dipilih					Lihat Catatan 2					
Kumulatif beban sumbu 20 tahun pada lajur rencana (10 ESA 5)	< 2	≥ 2 - 4	> 4 - 7	> 7 - 1-	> 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 BC</i>	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
<i>AC Base</i>	0	70	80	105	145	160	180	210	245	
LPA Kelas A	400	300	300	300	300	300	300	300	300	
Catatan	1		2			3				

(Sumber: Manual Desain Perkerasan Jalan 2017)

3.3 Program *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*. *Software* ini ditulis dalam bahasa pemrograman *Visual Basic* dan dapat dijalankan dengan versi Windows 95 atau di atasnya.

Software ini terbagi dalam empat program, yaitu LAYERINP, KENLAYER, SLABINP dan KENSLAB. LAYERINP dan KENLAYER merupakan program analisis untuk perkerasan lentur yang berdasarkan pada teori sistem lapis banyak, sedangkan SLABINP dan KENSLAB merupakan program analisis untuk perkerasan kaku yang berdasarkan metode elemen hingga.

Penelitian ini menggunakan program *KENPAVE* bagian KENLAYER yaitu program analisis yang menghitung sistem banyak lapis (*multi layers*) pada perkerasan lentur. Program ini cukup interaktif dan mudah digunakan. Program ini bisa digunakan untuk menghitung regangan, tegangan, serta lendutan permukaan perkerasan akibat beban tertentu.

Pada tampilan awal program *KENPAVE* ditunjukkan pada Gambar 3.3 terdiri dari dua menu pada bagian atas dan 11 menu bagian bawah. Tiga menu pada bagian kiri digunakan untuk perkerasan lentur, dan tiga menu pada bagian kanan untuk perkerasan kaku, dan lima menu lainnya pada bagian bawah.



Gambar 3.3 Tampilan Menu Utama Program *KENPAVE*

Dalam permodelan lapis perkerasan jalan dengan model lapisan elastis ini diperlukan data input untuk tegangan dan regangan pada struktur perkerasan dan respon terhadap beban. Parameter-parameter yang digunakan sebagai berikut.

1. Parameter setiap lapisan Parameter lapisan yang dimaksud antara lain adalah sebagai berikut.
 - a. Modulus elastisitas
 - b. *Poisson's ratio*
2. Ketebalan setiap lapisan
3. Kondisi beban

3.3.1 Program KENLAYER

Program komputer KENLAYER ini hanya dapat diaplikasikan pada jenis perkerasan lentur tanpa sambungan dan lapisan kaku. Dasar dari program KENLAYER ini adalah teori sistem lapis banyak. KENLAYER dapat diaplikasikan pada perilaku lapis yang berbeda, seperti linier, non linier, atau viskoelastis dan juga empat jenis sumbu roda, yaitu sumbu tunggal roda tunggal, sumbu tunggal roda ganda, sumbu tandem dan sumbu triple. Tampilan program LAYERINP ditunjukkan pada Gambar 3.4.

Data yang diperlukan untuk program KENLAYER adalah data struktur perkerasan jalan untuk menganalisa perencanaan tebal perkerasan jalan. Data tersebut antara lain tebal perkerasan jalan, modulus elastisitas, *poisson ratio*, dan kondisi beban. Nilai tebal perkerasan didapatkan dengan perhitungan tebal perkerasan jalan dengan menggunakan metode Bina Marga 2017. Modulus elastisitas didapatkan dari Tabel 3.8 berikut.

Tabel 3.8 Nilai Modulus 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)

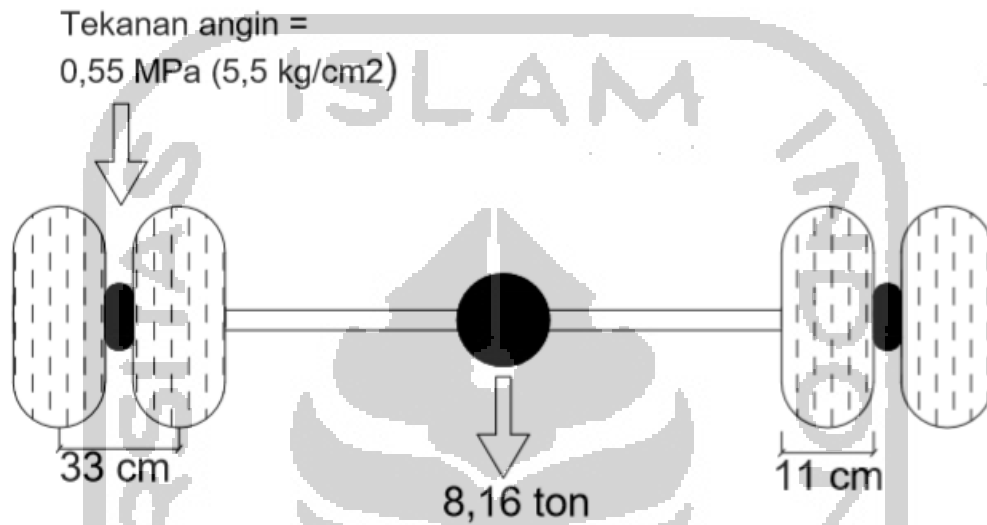
Untuk nilai *poisson ratio* didapat pada Tabel 3.9 dibawah ini

Tabel 3.9 Nilai Poisson's Ratio

Materials	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>	0,3-0,3	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	0,40
<i>Saturated Soft Clay</i>	0,40	0,45

(Sumber : Huang 2004)

Sedangkan untuk nilai kondisi beban terdiri dari data beban roda (P), data tekanan ban (q), data jarak antar roda ganda (d) dan data jari-jari bidang kontak (a) yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Sumbu Standar Ekuivalen di Indonesia

(Sumber: Sukirman, 1999)

Setelah input data selesai, maka dilakukan running program KENLAYER. Output dari program ini berupa *vertical displacement*, *vertical stress*, *major principal stress*, *minor principal stress*, *intermediate principal stress*, *vertical strain*, *major principal strain*, *minor principal strain*, dan *horizontal principal strain*. Dalam penelitian ini data yang digunakan yaitu *horizontal principal strain* dan *vertical principal strain* untuk menghitung jumlah repetisi beban.