

## **BAB V**

### **ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

#### **5.1 Data Studi Simulasi**

##### **5.1.1 Data Lalu Lintas**

Data lalu lintas ruas Jalan Gading – Gledag adalah data sekunder yang didapat dari laporan satuan kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta tahun anggaran 2015. Jalan Gading – Gledag dibangun sebagai pengembangan jaringan jalan di Kabupaten Bantul. Jalan Gading – Gledag merupakan jalan nasional dengan lebar 7 meter, memiliki 2 lajur dengan 2 arah. Hasil perhitungan lalu lintas berdasarkan golongan kendaraan dapat dilihat pada Tabel 5.1 dan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1.

**Tabel 5.1 Perhitungan Lalu Lintas Ruas Jalan Gading – Gledag**

<b>No</b>	<b>Jenis Kendaraan</b>	<b>LHR 2017</b>
1	Sepeda Motor, Mobil Penumpang, Angkutan Umum, Pick-Up, Station Wagon	28643
2	Bus Besar dan Kecil Golongan 5a	245
3	Bus Besar dan Kecil Golongan 5b	145
4	Truk 2as Golongan 6a	250
5	Truk 2as Golongan 6b	566
6	Truk 2as Golongan 7a	59
7	Truk 2as Golongan 7b	0
8	Truk 2as Golongan 7c	24

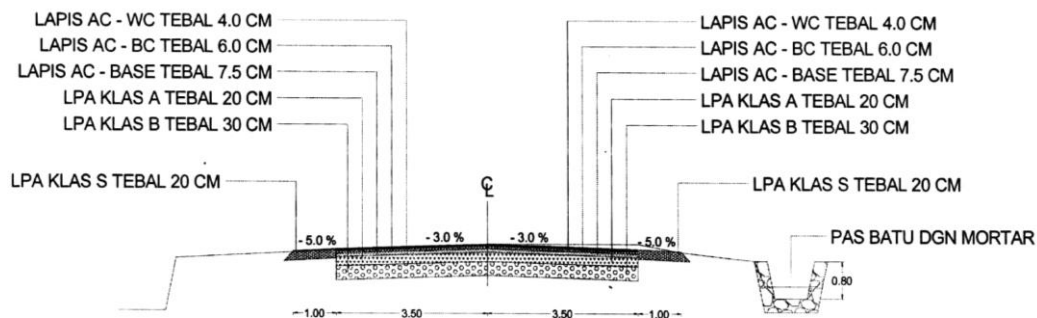
Sumber: Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta (2017)

##### **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.

### 5.1.3 Data Tebal Perkerasan Eksisting

Ruas Jalan Gading – Gledag merupakan jalan yang dibangun pada tahun 2015 dengan jenis penanganan yaitu peningkatan struktur. Berdasarkan data yang diperoleh dari Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta, tebal perkerasan Jalan Gading – Gledag dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



**Gambar 5.1** Tebal Perkerasan Eksisting Ruas Jl. Gading – Gledag

Sumber: Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional D.I.Yogyakarta (2017)

## 5.2 Evaluasi 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.

### 5.2.1 Analisis Beban Lalu Lintas

Perancangan beban lalu lintas menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan Nomor 04/SE/Db/2017 memerlukan beberapa tahap penyelesaian. Adapun tahapan dari metode ini adalah sebagai berikut.

#### 1. Umur rencana jalan

Berdasarkan Tabel 3.1, untuk jenis perkerasan lentur dengan elemen perkerasan aspal menggunakan umur rencana 20 tahun dari tahun 2015 sehingga akan habis masa pelayanan pada tahun 2035.

#### 2. Nilai faktor laju pertumbuhan lalu lintas (i)

Berdasarkan Tabel 3.2, dapat dilihat bahwa Jalan Gading – Gledag termasuk kelas kolektor rural daerah Jawa sehingga faktor pertumbuhan lalu lintas (i) adalah 3,50%.

3. Nilai faktor pengali pertumbuhan lalu lintas (R)

Untuk menghitung pertumbuhan lalu lintas selama umur rencana dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1 berikut.

$$\begin{aligned} R &= \frac{(1 + 0,01i)^{UR} - 1}{0,01i} \\ &= \frac{(1 + 0,01 \times 3,50)^{20} - 1}{0,01 \times 3,50} \\ &= 28,280\% \end{aligned}$$

4. Nilai faktor distribusi arah (DD) dan faktor distribusi laju (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 Gading – Gledag yang menggunakan sistem dua arah, faktor distribusi arah (DD) umumnya diambil 0,50. Sedangkan untuk faktor distribusi lajur kendaraan niaga (DL), Jalan Gading – Gledag bernilai 1 didasarkan pada Tabel 3.3 adalah 100% karena jumlah lajur per arah adalah 1.

5. 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 dilihat pada Tabel 3.4. Berdasarkan Tabel 3.4 dapat disimpulkan bahwa masing-masing klasifikasi tiap kelas jalan memiliki  $VDF^4$  dan  $VDF^5$  yang berbeda-beda dan dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

**Tabel 5.2 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, Station Wagon	0	0
5a	Bus Besar dan Kecil Golongan 5a	0	0
5b	Bus Besar dan Kecil Golongan 5b	1,0	1,0
6a	Truk 2as Golongan 6a	0,55	0,5
6b	Truk 2as Golongan 6b	5,3	9,2
7a	Truk 2as Golongan 7a	8,2	14,4
7b	Truk 2as Golongan 7b	11,8	18,2
7c	Truk 2as Golongan 7c	11,0	19,8

Sumber: Direktorat Jenderal Bina Marga (2017)

Dari data-data di atas maka dapat dicari rencana jumlah kendaraan dalam periode 20 tahun. Berikut ini adalah contoh perhitungan kendaraan golongan 5b.

$$\begin{aligned}
 ESA_4 &= (\sum \text{jenis kendaraan LHRT} \times VDF_4) \times 365 \times DD \times DL \times R \\
 &= (566 \times 1) \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 28,280 \\
 &= 748351,08
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ESA_5 &= (\sum \text{jenis kendaraan LHRT} \times VDF_5) \times 365 \times DD \times DL \times R \\
 &= (566 \times 1) \times 365 \times 0,5 \times 1 \times 28,280 \\
 &= 748351,08
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan beban selanjutnya dan tahun berikutnya dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut ini.

**Tabel 5.3 Prediksi Jumlah Kendaraan Selama Umur Rencana (20 Tahun)**

Jenis Kendaraan		R	Jumlah Hari	DD	DL	VDF4	VDF5	ESAL4	ESAL5
Gol 1, 2, 3, 4	28643	28,280	365	0,5	1	0	0	0	0
Gol 5a	245	28,280	365	0,5	1	0	0	0	0
Gol 5b	145	28,280	365	0,5	1	1,0	1,0	748.351	748.351
Gol 6a	250	28,280	365	0,5	1	0,55	0,5	709.643	645.130
Gol 6b	566	28,280	365	0,5	1	5,3	9,2	15.482.094	26.874.578
Gol 7a	59	28,280	365	0,5	1	8,2	14,4	2.496.912	4.384.821
Gol 7b	0	28,280	365	0,5	1	11,8	18,2	0	0
Gol 7c	24	28,280	365	0,5	1	11,0	19,8	1.362.515	2.452.527
<i>CESA</i>								20.799.515	35.105.407

Maka dari perhitungan Tabel 5.3 di atas didapat nilai:

1.  $CESA_4 = 20.799.515 \text{ ESAL}$
2.  $CESA_5 = 35.105.407 \text{ ESAL}$

### 5.2.2 Analisis Data Masukan

#### 1. 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 3.16 yang merupakan data kondisi beban berdasarkan data yang digunakan di Indonesia menurut Sukirman (1993), sebagai berikut.

- a. Beban kendaraan sumbu standar adalah 18000 pon atau 8,16 ton,
- b. Tekanan roda satu ban adalah  $0,55 \text{ MPa} = 5,5 \text{ kg/cm}^2$ ,
- c. Jari-jari bidang kontak adalah 110 mm atau 11 cm, dan
- d. Jarak antar masing-masing sumbu roda ganda adalah 33 cm.

#### 2. Menentukan parameter tiap lapis perkerasan

Pada analisis material ini, untuk 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 5.4 berikut.

**Tabel 5.4 Rekapitulasi Parameter Tiap Lapis Perkerasan**

Lapis Permukaan	Modulus Elastisitas	2.000.000 kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0,3
Agregat Kelas A	Modulus Elastisitas	315.00 kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0,35
Agregat Kelas B	Modulus Elastisitas	210.000 kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0,35
<i>Subgrade</i>	Modulus Elastisitas	150.000 kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0,45

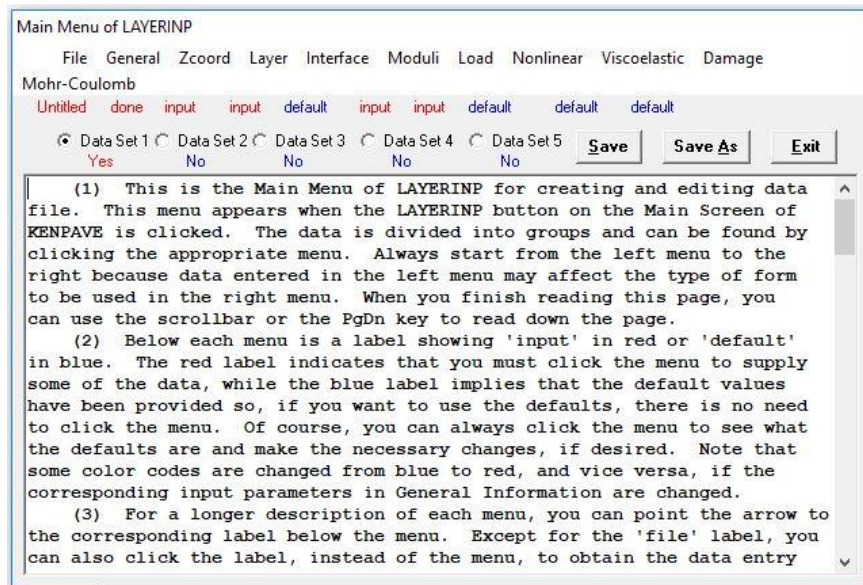
Sumber: Huang (2004)

### 5.2.3 Input Data

Berikut ini cara input ke program *KENPAVE* khususnya *KENLAYER* untuk perhitungan tegangan dan regangan perkerasan lentur adalah sebagai berikut.

#### 1. *LAYERINP*

Untuk melakukan input data, klik bagian menu *LAYERINP* seperti Gambar 5.2.



**Gambar 5.2** Tampilan Menu *LAYERINP*

(Sumber: *Screen picture KENPAVE*, diakses Tahun 2018)

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

#### 2. *General*

Pada menu *General* isi nilai-nilai berdasarkan data yang ada seperti Tabel 5.5.

**Tabel 5.5** Data Input *General*

Istilah	Nilai	Keterangan
<i>Title</i>	<i>Trial</i>	Diisi nama judul yang diinginkan
<i>MATL</i>	1	Pada analisis lapis perkerasan adalah linier elastis
<i>NDAMA</i>	0	Tidak ada analisis kerusakan
<i>NPY</i>	1	Mengikuti <i>KENPAVE</i>

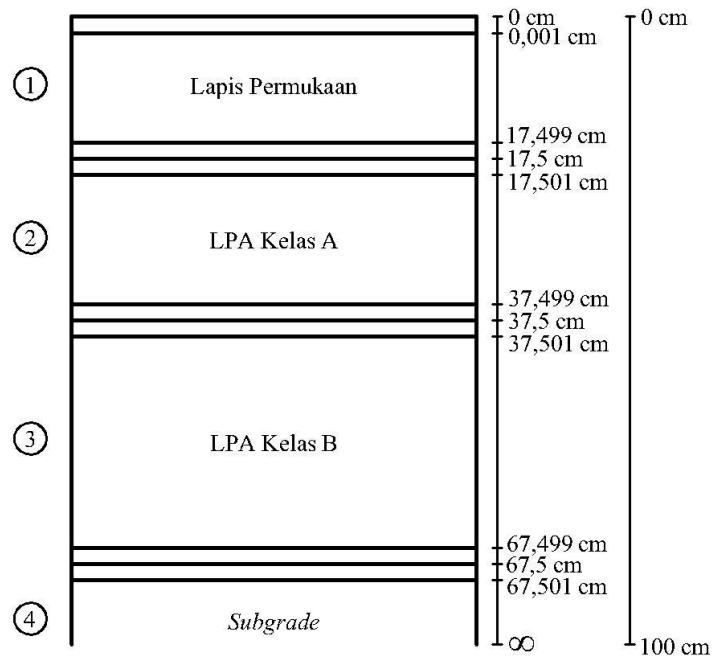
Lanjutan Tabel 5.5 Data *Input* General

<b>Istilah</b>	<b>Nilai</b>	<b>Keterangan</b>
<i>NLG</i>	1	Mengikuti <i>KENPAVE</i>
<i>DEL</i>	0,001	Standar akurasi
<i>NL</i>	4	Jumlah lapisan perkerasan pada analisis adalah 6 ( <i>Surface, Base, Subbase</i> dan <i>Subgrade</i> )
<i>NZ</i>	12	Letak koordinat arah Z yang akan dianalisis
<i>ICL</i>	80	Mengikuti <i>KENPAVE</i>
<i>NSDT</i>	9	<i>Output</i> berupa <i>vertical displacement</i> , nilai tegangan dan nilai regangan.
<i>NBOND</i>	1	Semua lapisan saling terikat
<i>NLBT</i>	0	
<i>NLTC</i>	0	
<i>NUNIT</i>	1	Satuan SI (Standar Internasional)

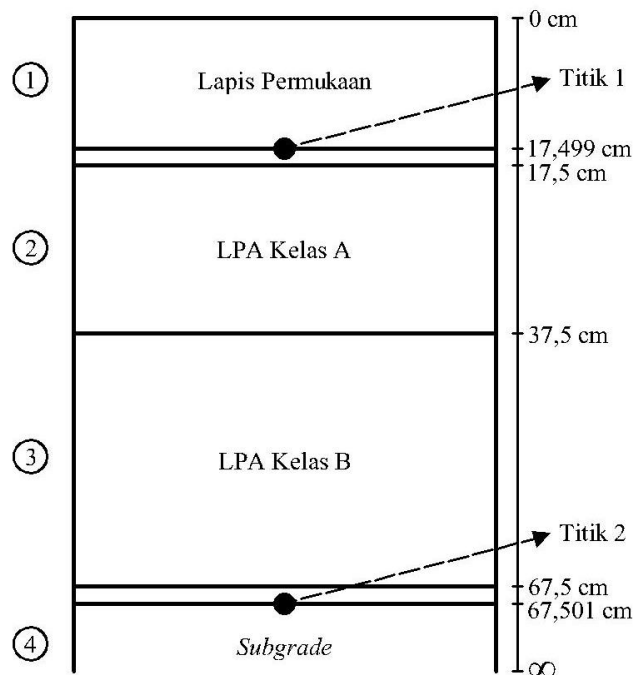
### 3. *Zcoord*

Jumlah point yang ada dalam menu *Zcoord* sama dengan jumlah NZ pada menu General. Letak titik respon struktur dilihat pada Gambar 5.3 dan letak titik kerusakan dapat dilihat pada Gambar 5.4.





**Gambar 5.3 Letak Titik Respon Struktur Perkerasan**



**Gambar 5.4 Letak Titik Tinjauan Kerusakan**

Pada Gambar 5.4 di atas, titik nomor satu merupakan titik pada dasar lapisan aspal, titik tersebut adalah 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 5.6.

**Tabel 5.6 Data Input Zcoord**

No	Kedalaman (cm)	Keterangan
1	0	Permukaan AC-WC
2	0,001	AC-WC
3	17,499	Dasar AC-WC
4	17,5	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas A
5	17,501	Lapis Pondasi Agregat Kelas A
6	37,499	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas A
7	37,5	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas B
8	37,501	Lapis Pondasi Agregat Kelas B
9	67,499	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas B
10	67,5	Permukaan <i>Subgrade</i>
11	67,501	<i>Subgrade</i>
12	100	1 m di bawah lapis permukaan AC-WC

#### 4. Layer

Parameter yang harus dimasukkan ke dalam *KENLAYER* adalah tebal perkerasan dan *Poisson's Ratio*. Untuk nilai kedua parameter tersebut didapatkan dari Huang (2004) dapat dilihat pada Tabel 5.7.

**Tabel 5.7 Data Input Menu Layer**

No Layer	Thickness (cm)	Poisson's Ratio	Keterangan
1	17,5	0,3	Lapis Permukaan
2	20	0,35	LPA Kelas A
3	30	0,35	LPA Kelas B
4	$\infty$	0,45	Subgrade

### 5. Moduli

Parameter yang harus dimasukkan dalam *KENLAYER* adalah *modulus resilient* atau modulus elastisitas yang diambil dari Tabel 3.6, dengan Gambar 5.3 modulus elastisitas pada masing-masing lapisan dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut.

**Tabel 5.8 Data Input Moduli**

No	E (kPa)	Keterangan
1	2.000.000	Lapis Permukaan
2	315.000	LPA Kelas A
3	210.000	LPA Kelas B
4	150.000	Subgrade

Sumber: Huang (2004)

### 6. Load

Berikut merupakan cara menentukan data *Load* pada *KENLAYER*.

- a. *Load* = 1 (*single axle road*, roda gandar tunggal)

Digunakan beban sumbu standar 8160 kg

- b. CR

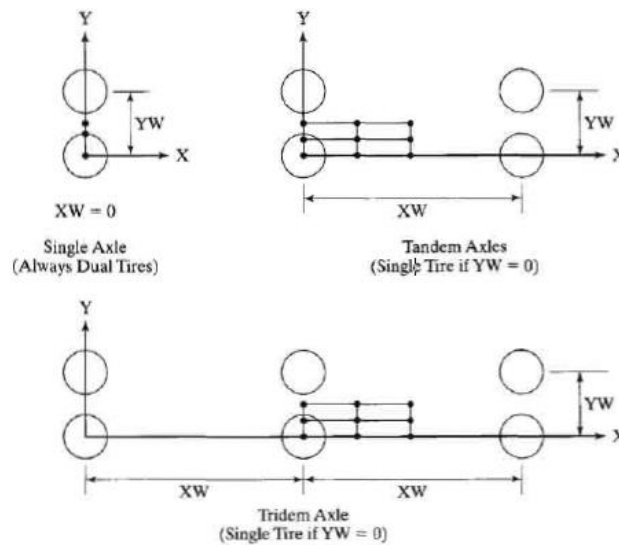
Berdasarkan nilai jarak antar ban = 11 cm

- c. CP

Berdasarkan nilai tekanan ban = 0,55 MPa = 550 kPa

- d. YW dan XW

Nilai YW dan XW ditentukan berdasarkan Gambar 5.5 berikut.

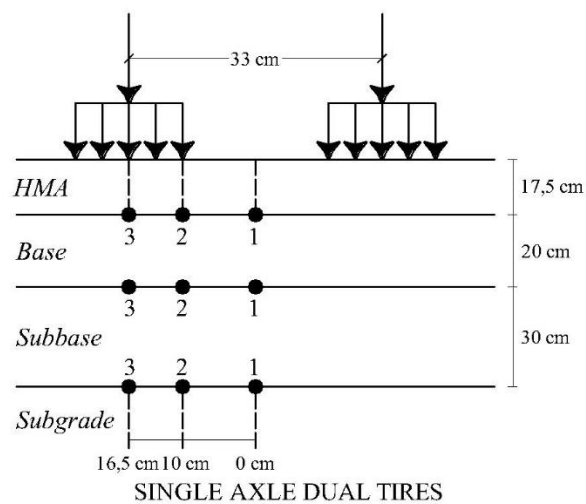


**Gambar 5.5 Plan View Of Multiple Wheels**

(Sumber: Huang, 2004)

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

Nilai NPT adalah 3 karena koordinat yang ditinjau adalah 3. Sehingga, nilai koordinat tinjauan berdasarkan jenis roda dapat dilihat pada Gambar 5.6 dan Tabel 5.9 berikut.



**Gambar 5.6 Koordinat Tinjauan Berdasarkan Jenis Roda**

**Tabel 5.9 Data Input NPT**

<b>Koordinat Tinjauan</b>	<b>Koordinat (cm)</b>
1	0
2	10
3	16,5

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.

#### 5.2.4 Hasil Analisis *KENLAYER*

*Output* dari analisis menggunakan *KENLAYER* adalah nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada perkerasan lentur jalan. Hasil analisis *KENLAYER* untuk *single axle load* (roda gandar tunggal), respon yang dapat diidentifikasi dan dapat dianalisis hanya *vertical compressive strain* yang terdapat di permukaan tanah dasar dan *horizontal tensile strain* yang terletak di bawah aspal. Tabel 5.10 berikut merupakan *output* tegangan dan regangan ketika struktur perkerasan jalan sudah dibebani berdasarkan koordinat yang ditinjau pada Gambar 5.6.

**Tabel 5.10 Hasil Perhitungan *KENLAYER***

<b>No. Koordinat</b>	<b>Koordinat Vertikal</b>		<b><i>Horizontal Displacement</i></b>	<b><i>Vertical Displacement</i></b>
1	0	<i>Stress</i>	0,02657	550
		<i>Strain</i>	0,0001441	0,0000343
	0,001	<i>Stress</i>	0,02703	548,493
		<i>Strain</i>	0,0001325	0,00006543
	17,499	<i>Stress</i>	0,02454	121,544
		<i>Strain</i>	-0,0001575	0,0001562
	17,5	<i>Stress</i>	0,02454	121,537
		<i>Strain</i>	-0,0001576	0,0001562
17,501	<i>Stress</i>	0,02454	121,531	

Lanjutan Tabel 5.10 Hasil Perhitungan *KENLAYER*

No. Koordinat	Koordinat Vertikal		<i>Horizontal Displacement</i>	<i>Vertical Displacement</i>	
	37,499	<i>Strain</i>	-0,0001576	0,0003799	
		<i>Stress</i>	0,01945	48,244	
	37,5	<i>Strain</i>	-0,0001038	0,0001891	
		<i>Stress</i>	0,01945	48,243	
	37,501	<i>Strain</i>	-0,0001038	0,0001891	
		<i>Stress</i>	0,01945	48,241	
	67,499	<i>Strain</i>	-0,00006601	0,0002368	
		<i>Stress</i>	0,01439	21,774	
	67,5	<i>Strain</i>	-0,00006601	0,0001293	
		<i>Stress</i>	0,01439	21,773	
	67,501	<i>Strain</i>	-0,000066	0,0001293	
		<i>Stress</i>	0,01439	21,773	
	100	<i>Strain</i>	-0,00003806	0,0001366	
		<i>Stress</i>	0,01096	12,651	
	2	0	<i>Strain</i>	-0,00003806	0,00008128
			<i>Stress</i>	0,02694	550
		0,001	<i>Strain</i>	0,0001158	0,00009181
			<i>Stress</i>	0,02688	556,297
17,499		<i>Strain</i>	0,0001225	0,00006591	
		<i>Stress</i>	0,02526	110,612	
17,5		<i>Strain</i>	-0,0001595	0,0001311	
		<i>Stress</i>	0,02526	110,607	
17,501		<i>Strain</i>	-0,0001595	0,0001311	
		<i>Stress</i>	0,02526	110,607	
37,499		<i>Strain</i>	-0,0001595	0,0003318	
		<i>Stress</i>	0,02017	51,925	
37,5		<i>Strain</i>	-0,0001108	0,0002043	
		<i>Stress</i>	0,01472	51,925	
37,501		<i>Strain</i>	-0,0001108	0,0002043	
		<i>Stress</i>	0,02017	51,922	
67,499		<i>Strain</i>	-0,0001108	0,0002557	
		<i>Stress</i>	0,000001472	22,997	
67,5	<i>Strain</i>	-0,00006858	0,0001375		
	<i>Stress</i>	0,01472	22,996		
67,501	<i>Strain</i>	-0,00006858	0,0001375		
	<i>Stress</i>	0,01472	22,996		

Lanjutan Tabel 5.10 Hasil Perhitungan *KENLAYER*

No. Koordinat	Koordinat Vertikal		<i>Horizontal Displacement</i>	<i>Vertical Displacement</i>
	100	<i>Strain</i>	-0,06857	0,0001475
		<i>Stress</i>	0,01111	13,081
		<i>Strain</i>	-0,00003891	0,00008458
3	0	<i>Stress</i>	0,0265	0
		<i>Strain</i>	0,00009791	-0,00001254
	0,001	<i>Stress</i>	0,02551	-2,029
		<i>Strain</i>	-0,0002024	-0,00007811
	17,499	<i>Stress</i>	0,02526	102,177
		<i>Strain</i>	-0,0001564	0,0001147
	17,5	<i>Stress</i>	0,02526	102,175
		<i>Strain</i>	-0,0001564	0,0001147
	17,501	<i>Stress</i>	0,02526	102,172
		<i>Strain</i>	-0,0001564	0,0002985
	37,499	<i>Stress</i>	0,0203	52,459
		<i>Strain</i>	-0,000112	0,0002064
	37,5	<i>Stress</i>	0,0203	52,457
		<i>Strain</i>	-0,000112	0,0002064
	37,501	<i>Stress</i>	0,0203	52,455
		<i>Strain</i>	-0,000112	0,0002582
	67,499	<i>Stress</i>	0,01479	23,227
		<i>Strain</i>	-0,00006906	0,0001391
	67,5	<i>Stress</i>	0,01479	23,227
		<i>Strain</i>	-0,00006906	0,0001391
	67,501	<i>Stress</i>	0,01479	23,226
		<i>Strain</i>	-0,00006906	0,0001474
	100	<i>Stress</i>	0,01114	13,162
		<i>Strain</i>	-0,00003906	0,00008519

Berdasarkan Tabel 5.10 di atas dapat diketahui bahwa semakin jauh jarak koordinat roda maka regangan vertikal pada dasar lapis permukaan akan semakin kecil, sedangkan regangan *horizontal* akan semakin besar, dan regangan vertikal pada *subgrade* juga akan semakin besar. Nilai tersebut mempengaruhi besar repetisi beban yang disebabkan oleh roda gandar tunggal.

Nilai tegangan dan regangan pada Tabel 5.11 dan Tabel 5.12 merupakan tegangan dan regangan terbesar dari setiap *layer* sub program *KENLAYER*.

**Tabel 5.11 Rekapitulasi Respon Struktur Perkerasan Eksisting**

Lokasi	Kedalaman (cm)	Respon Struktur Perkerasan Eksisting	No. Koordinat
AC-WC	0,001	$\sigma_{r0}$ (kpa) = 0,02703	1
Dasar AC-WC	17,499	$\sigma_{r1}$ (kpa) = 0,02526	2
		$\epsilon_t$ = 0,0001595	2
Lapis Pondasi Agregat Kelas A	17,501	$\sigma_z$ (kpa) = 121,531	1
		$\sigma'_{r1}$ (kpa) = 0,02526	2
Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas A	37,499	$\sigma_{r2}$ (kpa) = 0,0203	3
Lapis Pondasi Agregat Kelas B	37,501	$\sigma_z$ (kpa) = 52,455	3
		$\sigma'_{r2}$ (kpa) = 0,0203	3
Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas B	67,499	$\sigma_{r3}$ (kpa) = 0,01479	3
Permukaan <i>Subgrade</i>	67,501	$\sigma_z$ (kpa) = 23,226	3
		$\sigma'_{r3}$ (kpa) = 0,01479	3
		$\epsilon_c$ = 0,0001475	2
1 m di bawah lapis permukaan AC-WC	100	$\sigma_z$ (kpa) = 13,162	3
		$\sigma_{r100}$ (kpa) = 0,01114	3

**Tabel 5.12 Rekapitulasi Nilai *Vertical Strain* dan *Horizontal Strain* Perkerasan Eksisting**

No. Koordinat	<i>Vertical Strain</i> pada kedalaman 17,499 cm	<i>Vertical Strain</i> pada kedalaman 67,501 cm	<i>Horizontal Strain</i> pada kedalaman 17,499 cm
1	0,0001562	0,0001366	0,0001575
2	0,0001311	0,0001475	0,0001595
3	0,0001147	0,0001474	0,0001564
<i>Max</i>	0,0001562	0,0001475	0,0001595

Setelah nilai tegangan dan regangan diperoleh, yang dilakukan selanjutnya adalah analisis kerusakan *fatigue cracking*, *permanent deformation* dan *rutting* dalam menentukan jumlah repetisi beban. Repetisi beban dilakukan dengan cara menghitung nilai *Nf* (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban



pengulangan untuk mengontrol *fatigue cracking*),  $N_r$  (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *rutting*), dan  $N_d$  (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *permanent deformation*) harus lebih besar dari *CESA* yang telah diprediksi. Untuk nilai  $f_4$  dan  $f_5$  mengikuti rekomendasi dari *Asphalt Institute*.

1. Perhitungan  $N_f$ ,  $N_r$  dan  $N_d$

a. Jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking*

$$\begin{aligned} N_f &= 0,0796 (\epsilon_t)^{-3,921} |E^*|^{-0,854} \\ &= 0,0796 (0,0001595)^{-3,921} |2.000.000|^{-0,854} \\ &= 256.335.524 \text{ ESAL} \end{aligned}$$

b. Jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan *rutting*

$$\begin{aligned} N_r &= f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \\ &= 1,365 \times 10^{-9} (0,0001562)^{-4,477} \\ &= 149.976.316 \text{ ESAL} \end{aligned}$$

c. Jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan *permanent deformation*

$$\begin{aligned} N_d &= f_4 (\epsilon_c)^{-f_5} \\ &= 1,365 \times 10^{-9} (0,0001475)^{-4,477} \\ &= 193.843.292 \text{ ESAL} \end{aligned}$$

2. Kontrol prediksi umur pelayanan jalan dengan program *KENPAVE*

Dari hasil analisis program *KENLAYER* didapatkan bahwa perkerasan Jalan Gading – Gledag akan mengalami kerusakan *fatigue cracking* setelah dilewati beban repetisi sebanyak 256.335.524 *ESAL*, kerusakan *rutting* setelah dilewati beban repetisi sebanyak 149.976.316 *ESAL*, dan *permanent deformation* sebanyak 193.843.292 *ESAL*. Dengan nilai *CESA* pada kerusakan-kerusakan tersebut 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.

a. Prediksi umur pelayanan jalan akan mengalami kerusakan *fatigue cracking*

$$CESA = \Sigma(LHRT_{\text{jenis kendaraan}} \times VDF) \times 365 \times DD \times DL \times \frac{(1 + 0,01i)^{UR}}{0,01i}$$

$$\begin{aligned}
256335524 = & \left[ 28643 \times 0 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 245 \times 0 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 145 \times 1 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 250 \times 0,5 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 566 \times 9,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 59 \times 14,4 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 0 \times 18,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 24 \times 19,8 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right]
\end{aligned}$$

UR = 61 tahun

b. Prediksi umur pelayanan jalan akan mengalami kerusakan *rutting*

$$CESA = \Sigma(LHRT_{\text{jenis kendaraan}} \times VDF) \times 365 \times DD \times DL \times \frac{(1 + 0,01i)^{UR}}{0,01i}$$

$$\begin{aligned}
149976316 = & \left[ 28643 \times 0 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 245 \times 0 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 145 \times 1 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 250 \times 0,5 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 566 \times 9,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 59 \times 14,4 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 0 \times 18,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
& + \left[ 24 \times 19,8 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{UR} - 1}{0,01 \times 3,5} \right]
\end{aligned}$$

UR = 48 tahun

c. Prediksi umur pelayanan jalan akan mengalami kerusakan *permanent deformation*

$$\begin{aligned}
 \text{CESA} &= \Sigma(\text{LHRT}_{\text{jenis kendaraan}} \times \text{VDF}) \times 365 \times \text{DD} \times \text{DL} \times \frac{(1 + 0,01i)^{\text{UR}}}{0,01i} \\
 193843292 &= \left[ 28643 \times 0 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
 &+ \left[ 245 \times 0 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
 &+ \left[ 145 \times 1 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
 &+ \left[ 250 \times 0,5 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
 &+ \left[ 566 \times 9,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
 &+ \left[ 59 \times 14,4 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
 &+ \left[ 0 \times 18,2 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right] \\
 &+ \left[ 24 \times 19,8 \times 365 \times 0,5 \times 1 \times \frac{(1 + 0,01(3,5))^{\text{UR}} - 1}{0,01 \times 3,5} \right]
 \end{aligned}$$

$$\text{UR} = 54 \text{ tahun}$$

Berdasarkan hasil analisis di atas, evaluasi desain perkerasan eksisting menggunakan sub program *KENLAYER* dapat disimpulkan bahwa jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking* adalah sebesar 256.335.524 *ESAL*, berdasarkan kerusakan *rutting* sebesar 149.976.316 *ESAL*, dan berdasarkan kerusakan *permanent deformation* sebesar 193.843.292 *ESAL*. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa repetisi beban pada kerusakan *rutting* (alur) lebih kecil daripada repetisi beban pada kerusakan *fatigue cracking* dan *permanent deformation*.

Setelah dilakukan prediksi umur pelayanan, Jalan Gading – Gledag akan mengalami kerusakan *fatigue cracking* setelah 61 tahun, *rutting* setelah 48 tahun dan *permanent deformation* setelah 54 tahun, melampaui angka umur rencana 20

tahun. Hal ini menunjukkan bahwa struktur perkerasan mampu mengakomodasi beban lalu lintas.

Analisis beban lalu lintas pada jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking*, *rutting* dan *permanent deformation* dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut.

**Tabel 5.13 Analisis Beban Lalu Lintas**

Beban Lalu Lintas Rencana (Nrencana)	Beban Repetisi (ESAL)		Analisis Beban Lalu Lintas
35.105.407 ESAL	Nf	256.335.524	Nf > Nrencana (Ya)
35.105.407 ESAL	Nr	149.976.316	Nr > Nrencana (Ya)
35.105.407 ESAL	Nd	193.843.292	Nd > Nrencana (Ya)

Berdasarkan Tabel 5.13 di atas dapat diketahui bahwa jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking* (Nf), *rutting* (Nr), dan *permanent deformation* (Nd) pada perkerasan eksisting lebih besar daripada beban lalu lintas selama umur rencana.

### 5.3 Pengaruh Variasi Tebal Lapis Terhadap Respon Struktur Perkerasan Lentur dan Beban Repetisi

Tebal lapisan yang dianalisis adalah lapisan permukaan, lapisan pondasi atas, dan lapisan pondasi bawah. Ketebalan perkerasan eksisting lapis permukaan adalah 17,5 cm, lapis pondasi atas 20 cm, dan lapis pondasi bawah 30 cm. Setiap lapis perkerasan struktur akan divariasikan ketebalannya. Variasi tebal lapisan dapat dilihat pada Tabel 5.14, Tabel 5.15 dan Tabel 5.16 berikut.

**Tabel 5.14 Variasi Tebal Lapis Permukaan**

<b>Penambahan Tebal Lapis Permukaan</b>	<b>Variasi Tebal Lapis Permukaan (cm)</b>						
Lapis Permukaan	15,0	16,0	16,5	17,5	18,5	19,0	20
Lapis Pondasi Atas	20	20	20	20	20	20	20
Lapis Pondasi Bawah	30	30	30	30	30	30	30
<i>Subgrade</i>	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

**Tabel 5.15 Variasi Tebal Lapis Pondasi Atas**

<b>Penambahan Tebal Lapis Pondasi Atas</b>	<b>Variasi Tebal Lapis Pondasi Atas (cm)</b>						
Lapis Permukaan	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Lapis Pondasi Atas	17	18	19	20	21	22	23
Lapis Pondasi Bawah	30	30	30	30	30	30	30
<i>Subgrade</i>	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

**Tabel 5.16 Variasi Tebal Pondasi Bawah**

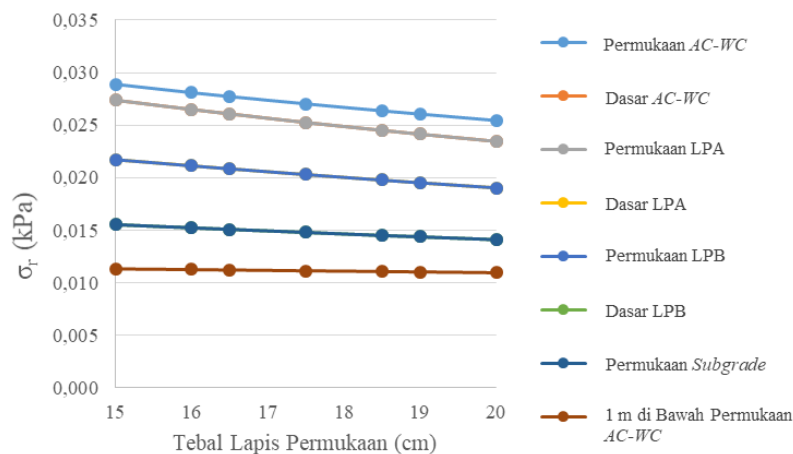
<b>Penambahan Tebal Lapis Pondasi Bawah</b>	<b>Variasi Tebal Lapis Pondasi Bawah (cm)</b>						
Lapis Permukaan	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5
Lapis Pondasi Atas	20	20	20	20	20	20	20
Lapis Pondasi Bawah	25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5
<i>Subgrade</i>	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

Berdasarkan 5.14 dengan menggunakan sub program *KENLAYER*, rekapitulasi hasil respon struktur lapis permukaan dapat dilihat pada Tabel 5.17 dan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 3.

**Tabel 5.17 Rekapitulasi Respon Struktur Penambahan Tebal Lapis Permukaan**

Lapis Perkerasan	Lokasi	Respon Struktur	Tebal Lapis Permukaan (cm)						
			15	16	16,5	17,5	18,5	19	20
Lapis Permukaan	Permukaan AC-WC	$\sigma_{r0}$ (kpa)	0,02889	0,02810	0,02773	0,02703	0,02637	0,02606	0,02545
	Dasar AC-WC	$\sigma_{r1}$ (kpa)	0,02738	0,02650	0,02608	0,02526	0,02451	0,02415	0,02346
		$\epsilon_t$	0,0001822	0,0001720	0,0001677	0,0001595	0,0001517	0,0001479	0,0001407
Lapis Pondasi Atas	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_z$ (kpa)	148,814	136,946	131,512	121,531	112,596	108,503	100,897
		$\sigma'_{r1}$ (kpa)	0,02738	0,02650	0,02608	0,02526	0,02451	0,02415	0,02346
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_{r2}$ (kpa)	0,02172	0,02114	0,02085	0,0203	0,01978	0,01952	0,01903
Lapis Pondasi Bawah	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_z$ (kpa)	60,175	56,914	55,372	52,455	49,747	48,467	46,041
		$\sigma'_{r2}$ (kpa)	0,02172	0,02113	0,02085	0,02030	0,01977	0,01952	0,01903
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_{r3}$ (kpa)	0,01553	0,01523	0,01508	0,01479	0,01450	0,01437	0,01410
Subgrade	Permukaan Subgrade	$\sigma_z$ (kpa)	25,683	24,662	24,171	23,226	22,330	21,900	21,073
		$\sigma'_{r3}$ (kpa)	0,01553	0,01523	0,01508	0,01479	0,01450	0,01437	0,01410
		$\epsilon_c$	0,0001630	0,0001565	0,0001534	0,0001475	0,0001417	0,0001390	0,0001337
	1 m di bawah lapis permukaan AC-WC	$\sigma_z$ (kpa)	13,635	13,446	13,351	13,162	12,972	12,877	12,688
		$\sigma_{r100}$ (kpa)	0,01132	0,01125	0,01121	0,01114	0,01107	0,01103	0,01096

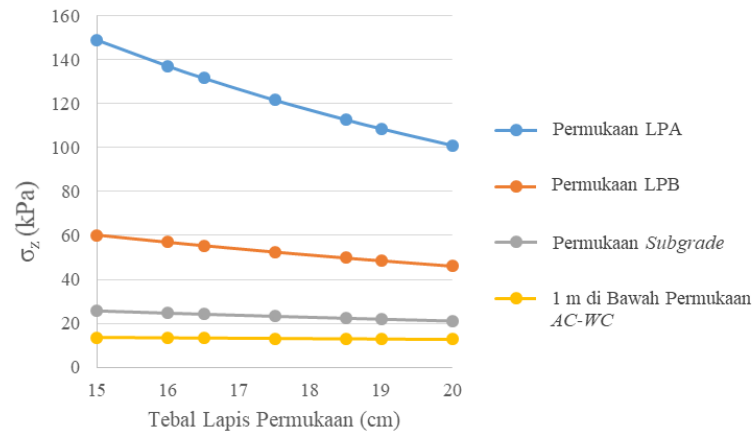
Berdasarkan Tabel 5.17 di atas, nilai tegangan *horizontal* dan vertikal serta regangan untuk respon struktur perkerasan eksisting pada berbagai variasi tebal lapis permukaan dapat dilihat pada Gambar 5.7, Gambar 5.8, dan Gambar 5.9 berikut.



**Gambar 5.7 Tegangan *Horizontal* pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Permukaan**

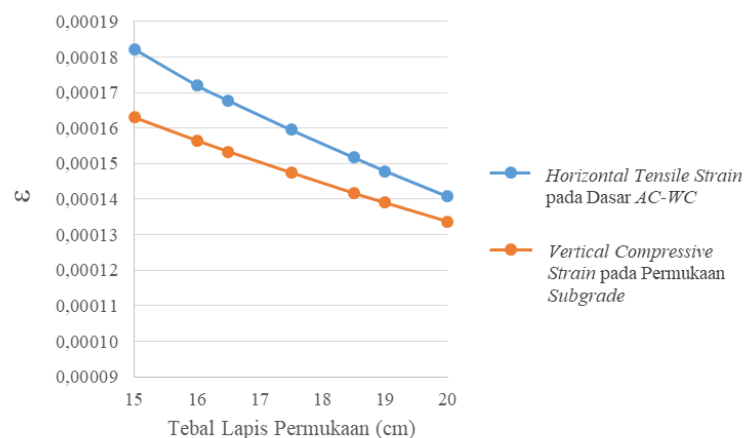
Gambar 5.7 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis permukaan terhadap nilai tegangan *horizontal* pada lapis permukaan AC-WC, dasar AC-WC, permukaan LPA, dasar LPA, permukaan LPB, dasar LPB, permukaan *subgrade*, dan 1 m di bawah permukaan AC-WC. Semakin tebal lapis permukaan maka akan semakin kecil tegangan *horizontal* yang diperoleh.

Tegangan *horizontal* pada dasar lapis AC-WC dengan permukaan LPA memiliki nilai yang sama, begitu pula dengan nilai tegangan pada dasar LPA dengan permukaan LPB serta tegangan pada dasar LPB dengan permukaan *subgrade*. Namun variasi tebal lapis permukaan tidak mempengaruhi respon struktur pada *subgrade* (1 m di bawah Permukaan AC-WC) karena tegangan *horizontal* pada lapisan tersebut tidak mengalami penurunan yang terlalu besar.



**Gambar 5.8 Tegangan Vertikal pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Permukaan**

Gambar 5.8 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis permukaan terhadap nilai tegangan vertikal pada permukaan LPA, permukaan LPB, permukaan *subgrade*, dan 1 m di bawah permukaan AC-WC. Semakin tebal lapis permukaan maka tegangan vertikal pada lapisan tersebut akan semakin kecil. Variasi tebal lapis permukaan diketahui mempengaruhi nilai tegangan vertikal pada lapis pondasi atas karena pada lapisan tersebut nilai tegangan mengalami penurunan yang signifikan, sedangkan untuk lapis *subgrade* variasi lapis permukaan tidak mengalami penurunan yang terlalu besar pada tegangan vertikal yang terjadi.



**Gambar 5.9 Horizontal dan Vertical Strain pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Permukaan**



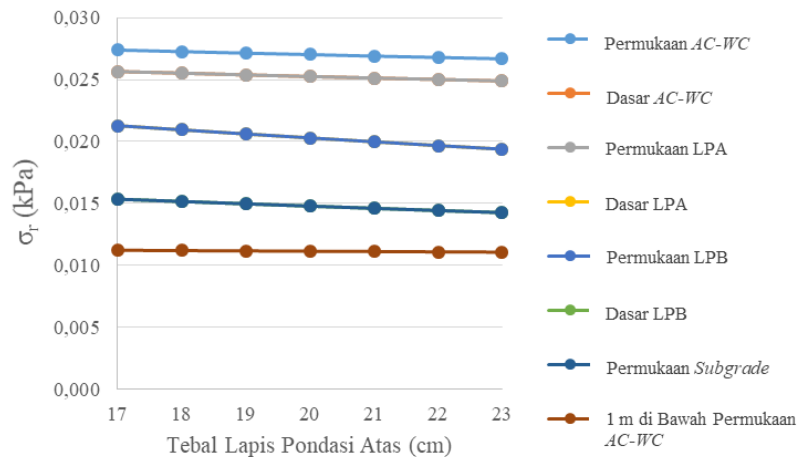
Gambar 5.9 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis permukaan terhadap nilai *horizontal tensile strain* (regangan tarik *horizontal*) pada dasar lapis *AC-WC* dan nilai *vertical compressive strain* (regangan tekan vertikal) pada lapis permukaan *subgrade*. Semakin tebal lapis permukaan maka akan semakin kecil nilai regangan tarik yang didapat. Perubahan regangan pada dasar lapis *AC-WC* berpengaruh pada repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking* dan *rutting*, sedangkan perubahan regangan pada lapis permukaan *subgrade* berpengaruh pada repetisi beban berdasarkan kerusakan *permanent deformation*.

Berdasarkan 5.15 dengan menggunakan sub program *KENLAYER*, rekapitulasi hasil respon struktur lapis pondasi atas dapat dilihat pada Tabel 5.18 dan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 4.

**Tabel 5.18 Rekapitulasi Respon Struktur Penambahan Tebal Lapis Pondasi Atas**

Lapis Perkerasan	Lokasi	Respon Struktur	Tebal Lapis Pondasi Atas (cm)						
			17	18	19	20	21	22	23
Lapis Permukaan	Permukaan AC-WC	$\sigma_{r0}$ (kpa)	0,02740	0,02727	0,02715	0,02703	0,02691	0,02680	0,02669
	Dasar AC-WC	$\sigma_{r1}$ (kpa)	0,02566	0,02553	0,02539	0,02526	0,02514	0,02502	0,02490
		$\epsilon_t$	0,0001614	0,0001607	0,0001601	0,0001595	0,0001590	0,0001585	0,0001580
Lapis Pondasi Atas	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_z$ (kpa)	120,340	120,766	121,163	121,531	121,876	122,197	122,498
		$\sigma'_{r1}$ (kpa)	0,02566	0,02553	0,02539	0,02526	0,02514	0,02502	0,02490
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_{r2}$ (kpa)	0,02129	0,02095	0,02062	0,02030	0,01999	0,01968	0,01939
Lapis Pondasi Bawah	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_z$ (kpa)	57,298	55,628	54,014	52,455	50,950	49,496	48,093
		$\sigma'_{r2}$ (kpa)	0,02129	0,02095	0,02062	0,02030	0,01999	0,01968	0,01939
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_{r3}$ (kpa)	0,01535	0,01516	0,01497	0,01479	0,01461	0,01443	0,01426
Subgrade	Permukaan Subgrade	$\sigma_z$ (kpa)	24,898	24,322	23,765	23,226	22,705	22,200	21,711
		$\sigma'_{r3}$ (kpa)	0,01535	0,01516	0,01497	0,01479	0,01461	0,01443	0,01426
		$\epsilon_c$	0,0001573	0,0001539	0,0001506	0,0001475	0,0001443	0,0001413	0,0001383
	1 m di bawah lapis permukaan AC-WC	$\sigma_z$ (kpa)	13,301	13,253	13,206	13,162	13,118	13,076	13,035
		$\sigma_{r100}$ (kpa)	0,01122	0,01119	0,01117	0,01114	0,01112	0,01109	0,01107

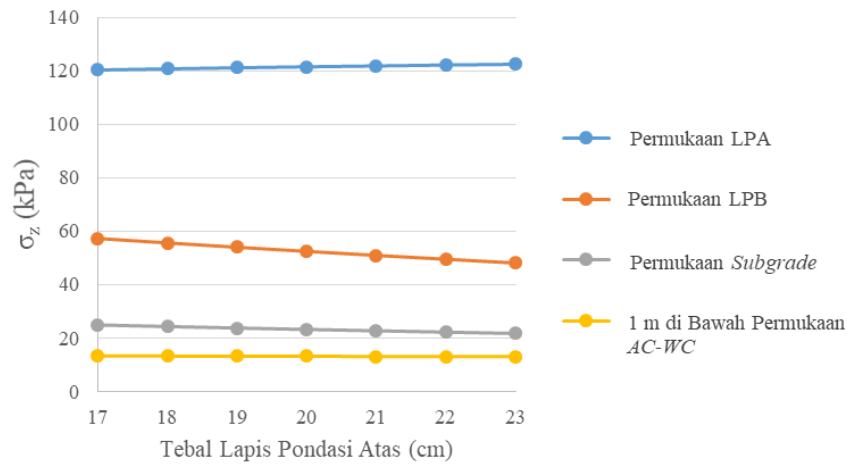
Berdasarkan Tabel 5.18 di atas, nilai tegangan *horizontal* dan vertikal serta regangan untuk respon struktur perkerasan eksisting pada berbagai variasi tebal lapis pondasi atas dapat dilihat pada Gambar 5.10, Gambar 5.11, dan Gambar 5.12 berikut.



**Gambar 5.10 Tegangan *Horizontal* pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Pondasi Atas**

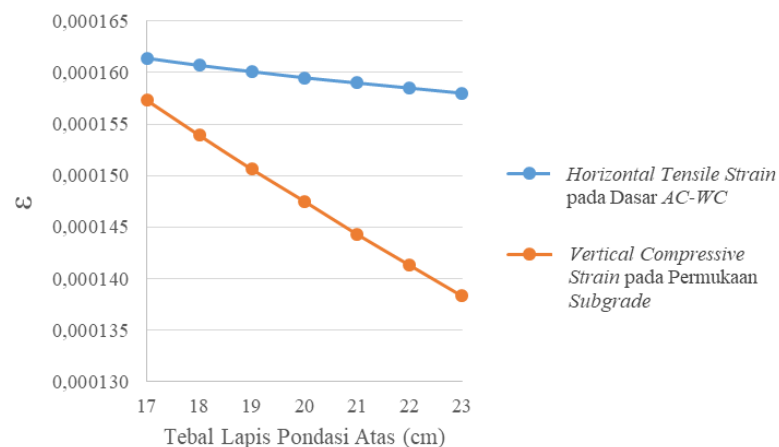
Gambar 5.10 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis pondasi atas terhadap nilai tegangan *horizontal* pada lapis permukaan AC-WC, dasar AC-WC, permukaan LPA, dasar LPA, permukaan LPB, dasar LPB, permukaan *subgrade*, dan 1 m di bawah permukaan AC-WC. Semakin tebal lapis pondasi atas maka akan semakin kecil tegangan *horizontal* yang diperoleh.

Tegangan *horizontal* pada dasar lapis AC-WC dengan permukaan LPA memiliki nilai yang sama, begitu pula dengan nilai tegangan pada dasar LPA dengan permukaan LPB serta tegangan pada dasar LPB dengan permukaan *subgrade*. Variasi tebal pondasi atas diketahui mempengaruhi nilai tegangan pada lapis permukaan LPB karena tegangan *horizontal* pada lapis tersebut mengalami penurunan yang sedikit lebih besar dibanding lapisan lainnya.



**Gambar 5.11 Tegangan Vertikal pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Pondasi Atas**

Gambar 5.11 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis pondasi atas terhadap nilai tegangan vertikal pada permukaan LPA, permukaan LPB, permukaan *subgrade*, dan 1 m di bawah permukaan AC-WC. Semakin tebal lapis pondasi atas maka tegangan vertikal pada lapisan tersebut akan semakin besar. Variasi tebal lapis pondasi atas diketahui tidak mempengaruhi lapisan di bawahnya karena tegangan vertikal lapisan-lapisan tersebut mengalami penurunan.



**Gambar 5.12 Horizontal dan Vertical Strain pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Pondasi Atas**

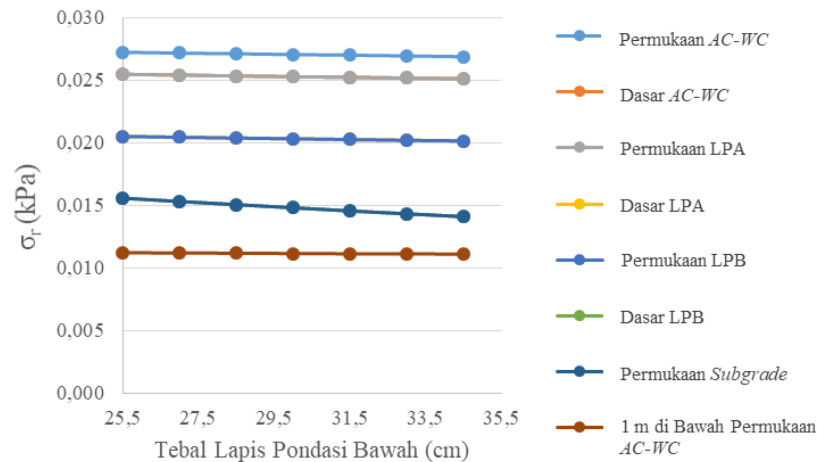
Gambar 5.12 di atas menunjukkan bahwa semakin tebal lapis pondasi atas maka nilai regangan akan semakin kecil. Variasi tebal lapis pondasi atas mempengaruhi *vertical compressive strain* (regangan tekan vertikal) pada permukaan *subgrade* karena regangan menurun secara signifikan. Sedangkan variasi tebal lapis pondasi atas tidak mempengaruhi *horizontal tensile strain* (regangan tarik *horizontal*) pada dasar lapis AC-WC karena nilai regangan tidak mengalami penurunan yang terlalu besar. Perubahan regangan pada dasar lapis AC-WC berpengaruh pada repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking* dan *rutting*, sedangkan perubahan regangan pada lapis permukaan *subgrade* berpengaruh pada repetisi beban berdasarkan kerusakan *permanent deformation*.

Berdasarkan Tabel 5.16 dengan menggunakan sub program *KENLAYER*, rekapitulasi hasil respon struktur lapis pondasi bawah dapat dilihat pada Tabel 5.19 dan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 5.

**Tabel 5.19 Rekapitulasi Respon Struktur Penambahan Tebal Lapis Pondasi Bawah**

Lapis Perkerasan	Lokasi	Respon Struktur	Tebal Lapis Pondasi Bawah (cm)						
			25,5	27	28,5	30	31,5	33	34,5
Lapis Permukaan	Permukaan AC-WC	$\sigma_{r0}$ (kpa)	0,02721	0,02714	0,02709	0,02703	0,02698	0,02692	0,02686
	Dasar AC-WC	$\sigma_{r1}$ (kpa)	0,02545	0,02539	0,02532	0,02526	0,02521	0,02515	0,02510
		$\epsilon_t$	0,0001599	0,0001598	0,0001596	0,0001595	0,0001594	0,0001593	0,0001592
Lapis Pondasi Atas	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_z$ (kpa)	121,287	121,375	121,455	121,531	121,602	121,667	121,727
		$\sigma'_{r1}$ (kpa)	0,02545	0,02538	0,02532	0,02526	0,02521	0,02515	0,02509
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_{r2}$ (kpa)	0,02049	0,02042	0,02036	0,0203	0,02024	0,02018	0,02013
Lapis Pondasi Bawah	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_z$ (kpa)	51,965	52,138	52,302	52,455	52,600	52,735	52,863
		$\sigma'_{r2}$ (kpa)	0,02049	0,02042	0,02036	0,0203	0,0202	0,02018	0,02013
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_{r3}$ (kpa)	0,01556	0,01530	0,01504	0,01479	0,01454	0,01431	0,01408
Subgrade	Permukaan Subgrade	$\sigma_z$ (kpa)	25,612	24,780	23,985	23,226	22,501	21,808	21,145
		$\sigma'_{r3}$ (kpa)	0,01556	0,01530	0,01504	0,01479	0,01454	0,01431	0,01408
		$\epsilon_c$	0,0001621	0,0001569	0,0001521	0,0001475	0,0001429	0,0001386	0,0001345
	1 m di bawah lapis permukaan AC-WC	$\sigma_z$ (kpa)	13,243	13,215	13,188	13,162	13,136	13,111	13,086
		$\sigma_{r100}$ (kpa)	0,01120	0,01118	0,01116	0,01114	0,01112	0,01111	0,01109

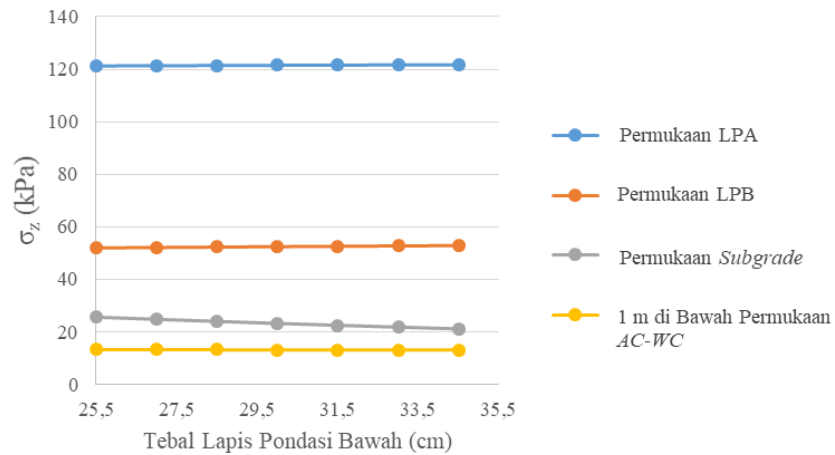
Berdasarkan Tabel 5.19 di atas, nilai tegangan *horizontal* dan vertikal serta regangan untuk respon struktur perkerasan eksisting pada berbagai variasi tebal lapis pondasi bawah dapat dilihat pada Gambar 5.13, Gambar 5.14, dan Gambar 5.15 berikut.



**Gambar 5.13 Tegangan *Horizontal* pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Pondasi Bawah**

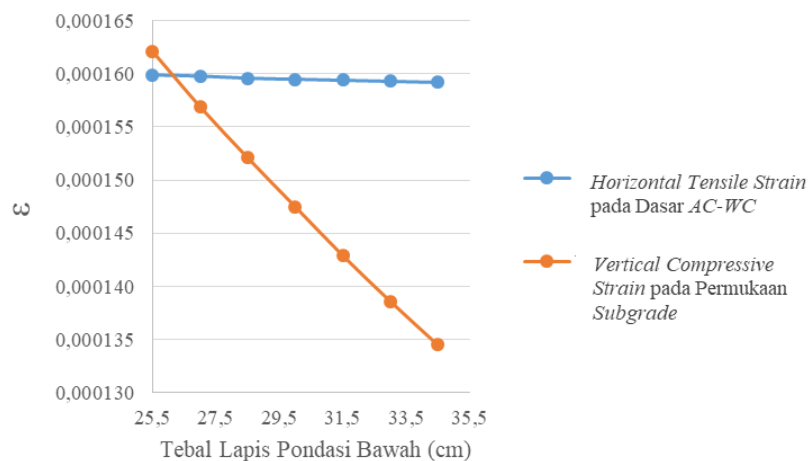
Gambar 5.13 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis pondasi bawah terhadap nilai tegangan *horizontal* pada lapis permukaan AC-WC, dasar AC-WC, permukaan LPA, dasar LPA, permukaan LPB, dasar LPB, permukaan *subgrade*, dan 1 m di bawah permukaan AC-WC. Semakin tebal lapis pondasi bawah maka akan semakin kecil tegangan *horizontal* yang diperoleh.

Tegangan *horizontal* pada dasar lapis AC-WC dengan permukaan LPA memiliki nilai yang sama, begitu pula dengan nilai tegangan pada dasar LPA dengan permukaan LPB serta tegangan pada dasar LPB dengan permukaan *subgrade*. Variasi tebal pondasi bawah diketahui mempengaruhi nilai tegangan pada lapis permukaan *subgrade* karena tegangan *horizontal* pada lapis tersebut mengalami penurunan yang sedikit lebih besar dibanding lapisan lainnya.



**Gambar 5.14 Tegangan Vertikal pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Pondasi Bawah**

Gambar 5.14 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis pondasi bawah terhadap nilai tegangan vertikal pada permukaan LPA, permukaan LPB, permukaan *subgrade*, dan 1 m di bawah permukaan AC-WC. Semakin tebal lapis pondasi bawah maka tegangan vertikal pada lapisan LPB dan LPA akan semakin besar. Variasi tebal lapis pondasi bawah diketahui tidak mempengaruhi lapisan *subgrade* karena tegangan vertikal lapisan-lapisan tersebut mengalami penurunan.



**Gambar 5.15 Horizontal dan Vertical Strain pada Berbagai Variasi Tebal Lapis Pondasi Bawah**



Gambar 5.15 di atas menunjukkan bahwa semakin tebal lapis pondasi bawah maka nilai regangan akan semakin kecil. Variasi tebal lapis pondasi bawah mempengaruhi *vertical compressive strain* (regangan tekan vertikal) pada permukaan *subgrade* karena regangan menurun secara drastis. Sedangkan variasi tebal lapis pondasi bawah tidak mempengaruhi *horizontal tensile strain* (regangan tarik *horizontal*) pada dasar lapis AC-WC karena nilai regangan hampir sama atau tidak mengalami penurunan yang besar. Perubahan regangan pada dasar lapis AC-WC berpengaruh pada kerusakan *fatigue cracking* dan *rutting*, sedangkan perubahan regangan pada lapis permukaan *subgrade* berpengaruh pada kerusakan *permanent deformation*.

Repetisi beban dilakukan dengan cara menghitung nilai Nf (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *fatigue cracking*), Nr (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *rutting*), dan Nd (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *permanent deformation*) harus lebih besar dari CESA yang telah diprediksi. Untuk nilai f4 dan f5 mengikuti rekomendasi dari *Asphalt Institute*. Jumlah repetisi beban pada berbagai lapis perkerasan dan umur perkerasan dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut.

**Tabel 5.20 Repetisi Beban Berdasarkan Analisis Kerusakan Retak lelah,  
Alur dan Deformasi Permanen beserta Umur Perkerasan**

Variasi Tebal Perkerasan* (cm)		Repetisi Beban		
		Umur Rencana*		
		<i>Fatigue Cracking (ESAL)</i>	<i>Rutting (ESAL)</i>	<i>Permanent Deformation (ESAL)</i>
Lapis Permukaan (LPA & LPB konstan pada tebal 20 cm & 30 cm)	15	152.132.948	70.820.724	123.927.802
		48 tahun	31 tahun	43 tahun
	16	190.689.338	96.167.395	148.693.486
		53 tahun	38 tahun	47 tahun
	16,5	210.590.761	111.779.188	162.626.950
		56 tahun	41 tahun	50 tahun
	17,5	256.335.524	149.976.316	193.843.292
		61 tahun	48 tahun	54 tahun
	18,5	312.024.711	199.837.784	231.979.620
		66 tahun	55 tahun	58 tahun
	19	344.657.903	230.519.393	252.845.594
		68 tahun	58 tahun	60 tahun
20	419.152.726	303.955.497	300.913.964	
	74 tahun	65 tahun	65 tahun	
Lapis Pondasi Atas (LP & LPB konstan pada tebal 17,5 cm & 30 cm)	17	244.705.488	146.585.127	145.337.659
		60 tahun	47 tahun	47 tahun
	18	248.911.636	147.845.719	160.274.839
		60 tahun	47 tahun	49 tahun
	19	252.589.352	149.119.599	176.607.951
		60 tahun	47 tahun	51 tahun
	20	256.335.524	149.976.316	193.843.292
		61 tahun	48 tahun	54 tahun
	21	259.510.735	151.272.712	213.844.107
		61 tahun	48 tahun	56 tahun
	22	262.735.464	152.144.597	234.934.173
		61 tahun	48 tahun	59 tahun
23	266.010.643	153.022.636	258.625.743	
	62 tahun	48 tahun	61 tahun	
Lapis Pondasi Bawah (LP & LPA konstan pada tebal 17,5 cm & 20 cm)	25,5	253.830.395	149.119.599	127.038.130
		61 tahun	47 tahun	44 tahun
	27	254.453.786	149.547.207	147.003.858
		61 tahun	48 tahun	47 tahun
	28,5	255.706.343	149.547.207	168.942.984
		61 tahun	48 tahun	50 tahun
30	256.335.524	149.976.316	193.843.292	

**Lanjutan Tabel 5.20 Repetisi Beban Berdasarkan Analisis Kerusakan Retak lelah, Alur dan Deformasi Permanen beserta Umur Perkerasan**

Variasi Tebal Perkerasan* (cm)		Repetisi Beban			
		Umur Rencana*			
		<i>Fatigue Cracking (ESAL)</i>	<i>Rutting (ESAL)</i>	<i>Permanent Deformation (ESAL)</i>	
	31,5	61 tahun	48 tahun	54 tahun	
		256.966.648	150.406.933	223.384.669	
	33	61 tahun	48 tahun	57 tahun	
		257.599.725	150.839.063	256.128.950	
	34,5	61 tahun	48 tahun	61 tahun	
		258.234.760	150.839.063	292.983.380	
			61 tahun	48 tahun	64 tahun

\*Catatan: Lapis perkerasan yang tidak dianalisis memiliki ketebalan yang sama dengan tebal perkerasan eksisting.

Asumsi angka pertumbuhan lalu lintas = 3,5% per tahun, sesuai MDPJ 2017 Tabel 3.2 untuk Pulau Jawa

Pada Tabel 5.13 telah menjelaskan bahwa perkerasan eksisting dengan tebal lapis permukaan 17,5 cm, lapis pondasi atas 20 cm, dan lapis pondasi bawah 30 cm sehingga didapat repetisi beban untuk kerusakan retak lelah sebesar 256.335.524 *ESAL*, untuk kerusakan alur 149.976.316 *ESAL* dan untuk kerusakan deformasi permanen 193.843.292 *ESAL*. Tebal perkerasan eksisting tersebut memiliki beban repetisi yang lebih besar dari beban kendaraan selama umur rencana sebesar 35.105.407 *ESAL*. Kemudian dilakukan variasi tebal lapis perkerasan untuk mengetahui efek tebal lapisan pada setiap lapis sehingga diketahui besar repetisi beban pada kerusakan retak lelah, alur dan deformasi permanen.

Tabel 5.20 menunjukkan pengaruh variasi tebal lapis permukaan, lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah terhadap nilai repetisi beban berdasarkan kerusakan lelah retak lelah, alur dan deformasi permanen serta umur rencana perkerasan. Diketahui semakin tebal lapis perkerasan maka jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan yang dianalisis akan semakin besar sehingga umur rencana juga akan semakin besar. Seluruh variasi tebal perkerasan di atas memiliki beban repetisi yang lebih besar daripada beban kendaraan selama umur rencana sebesar

35.105.407 *ESAL*. Tetapi dari ketiga variasi tebal lapis perkerasan, hanya variasi tebal pada lapis permukaan yang berdampak besar pada jumlah repetisi beban. Oleh karena itu Tabel 5.20 dapat digunakan sebagai referensi pemilihan struktur perkerasan empat lapis dengan material linear elastis berdasarkan nilai repetisi beban yang diinginkan. Namun bila struktur perkerasan menggunakan material viskoelatis maka jumlah repetisi beban yang dihasilkan akan berbeda.

#### 5.4 Pengaruh Variasi Modulus Elastisitas Terhadap Respon Struktur Perkerasan Lentur dan Beban Repetisi

Nilai modulus elastisitas yang dianalisis adalah lapisan pondasi atas dan lapisan pondasi bawah. Nilai-nilai tersebut diasumsikan dan diambil dari Tabel 3.6. Lapis permukaan tidak dianalisis karena menggunakan bahan perkerasan yang sama yaitu berbahan aspal beton. Simulasi 1 merupakan nilai modulus awal lapis permukaan sebesar 2.000.000 kPa, lapis pondasi atas 315.000 kPa, dan lapis pondasi bawah 210.000 kPa. Simulasi 2 – 4 merupakan variasi modulus elastisitas pada pondasi atas, sedangkan Simulasi 5 – 7 merupakan variasi modulus elastisitas pada pondasi bawah. Modulus elastisitas divariasikan berdasarkan bahan perkerasan seperti pada Tabel 2.21, Tabel 2.22 dan Tabel 2.23 berikut.

**Tabel 5.21 Nilai Modulus Elastisitas Pada Lapis Perkerasan Eksisting**

Lapis Perkerasan	Lapis Permukaan	
	Simulasi 1	
	Bahan	E (kPa)
	Aspal Beton	2.000.000
Lapis Permukaan	Aspal Beton	2.000.000
Lapis Pondasi Atas	<i>Unbound Granular Materials</i>	315.000
Lapis Pondasi Bawah	<i>Unbound Granular Materials</i>	210.000
<i>Subgrade</i>	<i>Fine Grained/Natural Subgrade Materials</i>	150.000

Sumber: Huang (2004)

**Tabel 5.22 Variasi Modulus Elastisitas Pada Lapis Pondasi Atas**

Lapis Perkerasan	Lapis Pondasi Atas					
	Simulasi 2		Simulasi 3		Simulasi 4	
	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)
	<i>Cement Treated Granular Base</i>	500.000	<i>Asphalt Treated Base</i>	1.500.000	<i>Cement Agregat Mixture</i>	3.500.000
Lapis Permukaan	Aspal Beton	2.000.000	Aspal Beton	2.000.000	Aspal Beton	2.000.000
Lapis Pondasi Atas	<i>Cement Treated Granular Base</i>	500.000	<i>Asphalt Treated Base</i>	800.000	<i>Cement Agregat Mixture</i>	3.500.000
Lapis Pondasi Bawah	<i>Unbound Granular Materials</i>	210.000	<i>Unbound Granular Materials</i>	210.000	<i>Unbound Granular Materials</i>	210.000
<i>Subgrade</i>	<i>Fine Grained/Natural Subgrade Materials</i>	150.000	<i>Fine Grained/Natural Subgrade Materials</i>	150.000	<i>Fine Grained/Natural Subgrade Materials</i>	150.000

Sumber: Huang (2004)

**Tabel 5.23 Variasi Modulus Elastisitas Pada Pondasi Bawah**

Lapis Perkerasan	Lapis Pondasi Bawah					
	Simulasi 5		Simulasi 6		Simulasi 7	
	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)
	<i>Lime Stabilized</i>	140.000	<i>Bituminous Stabilized Mixture</i>	380.000	<i>Cement Agregat Mixture</i>	3.500.000
Lapis Permukaan	Aspal Beton	2.000.000	Aspal Beton	2.000.000	Aspal Beton	2.000.000
Lapis Pondasi Atas	<i>Unbound Granular Materials</i>	315.000	<i>Unbound Granular Materials</i>	315.000	<i>Unbound Granular Materials</i>	315.000
Lapis Pondasi Bawah	<i>Lime Stabilized</i>	140.000	<i>Bituminous Stabilized Mixture</i>	380.000	<i>Cement Agregat Mixture</i>	3.500.000
<i>Subgrade</i>	<i>Fine Grained/Natural Subgrade Materials</i>	150.000	<i>Fine Grained/Natural Subgrade Materials</i>	150.000	<i>Fine Grained/Natural Subgrade Materials</i>	150.000

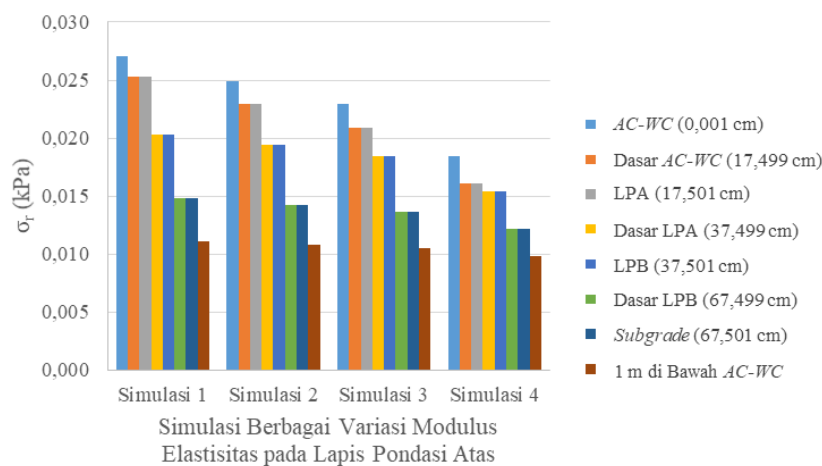
Sumber: Huang (2004)

Dari ketiga Tabel 5.1, Tabel 5.2 dan Tabel 5.3 di atas, dengan menggunakan Program *KENPAVE*, rekapitulasi hasil respon struktur dapat dilihat pada Tabel 5.26 dan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 6 dan 7.

**Tabel 5.24 Rekapitulasi Respon Struktur pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas**

Lapis Perkerasan	Lokasi	Respon Struktur	Variasi Modulus Elastisitas													
			Lapis Permukaan		Lapis Pondasi Atas						Lapis Pondasi Bawah					
			Simulasi 1		Simulasi 2		Simulasi 3		Simulasi 4		Simulasi 5		Simulasi 6		Simulasi 7	
			Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)
			Aspal Beton	2.000.000	Cement Treated Granular Base	500.000	Asphalt Treated Base	1.500.000	Cement Agregat Mixture	3.500.000	Lime Stabilized	140.000	Bituminous Stabilized Mixture	380.000	Cement Agregat Mixture	3.500.000
Lapis Permukaan	Permukaan AC-WC	$\sigma_{t0}$ (kpa)	0,02703		0,02488		0,02295		0,01845		0,02901		0,02465		0,01931	
	Dasar AC-WC	$\sigma_{t1}$ (kpa)	0,02526		0,02295		0,02089		0,01608		0,02738		0,02272		0,01701	
		$\epsilon_t$	0,0001595		0,0001230		0,0000880		0,0000102		0,0001657		0,0001513		0,0001346	
Lapis Pondasi Atas	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_z$ (kpa)	121,531		140,050		160,340		222,661		117,330		127,390		142,157	
		$\sigma'_{t1}$ (kpa)	0,02526		0,02295		0,02089		0,01608		0,02738		0,02272		0,01701	
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas A	$\sigma_{t2}$ (kpa)	0,0203		0,01940		0,01841		0,01539		0,02237		0,01778		0,01173	
Lapis Pondasi Bawah	Permukaan Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_z$ (kpa)	52,455		49,079		44,604		29,981		47,319		59,737		83,153	
		$\sigma'_{t2}$ (kpa)	0,02030		0,01940		0,01841		0,01539		0,02237		0,01778		0,01173	
	Dasar Lapis Pondasi Agregat Kelas B	$\sigma_{t3}$ (kpa)	0,01479		0,01421		0,01366		0,01217		0,01506		0,01421		0,01120	
Subgrade	Permukaan Subgrade	$\sigma_z$ (kpa)	23,226		21,525		19,845		15,352		23,447		22,167		14,077	
		$\sigma'_{t3}$ (kpa)	0,01479		0,01421		0,01366		0,01217		0,01506		0,01421		0,01120	
		$\epsilon_c$	0,0001475		0,00013770		0,00012610		0,00009005		0,00014620		0,00013920		0,00006934	
	1 m di bawah lapis permukaan AC-WC	$\sigma_z$ (kpa)	13,162		12,319		11,576		9,759		13,532		12,529		9,243	
		$\sigma_{t100}$ (kpa)	0,01114		0,01081		0,01052		0,009800		0,011400		0,010760		0,009250	

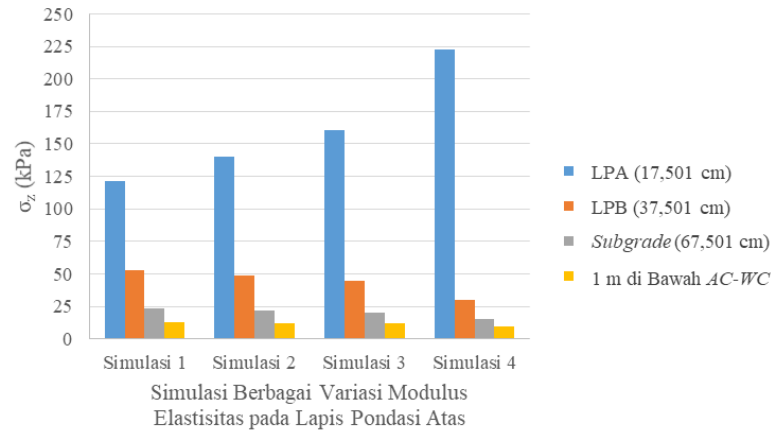
Berdasarkan Tabel 5.24 di atas, nilai tegangan *horizontal* dan vertikal serta regangan untuk respon struktur perkerasan eksisting pada berbagai variasi modulus elastisitas dapat dilihat pada Gambar 5.16 sampai Gambar 5.21 berikut.



**Gambar 5.16 Tegangan *Horizontal* pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas Lapis Pondasi Atas**

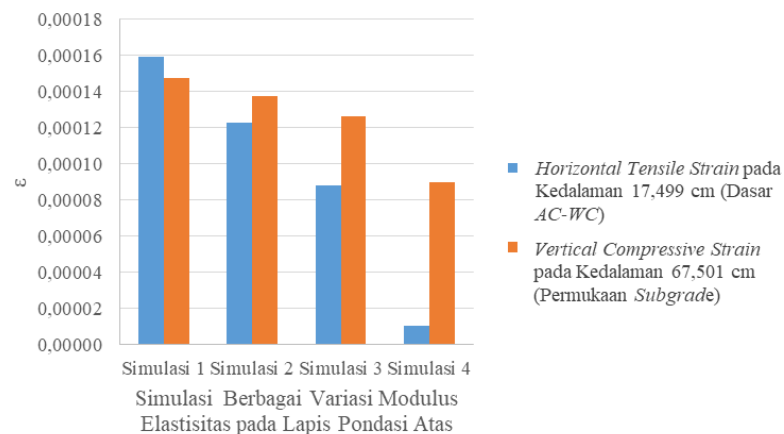
Gambar 5.16 di atas menunjukkan pengaruh variasi modulus elastisitas lapis pondasi atas terhadap nilai tegangan *horizontal* pada lapis permukaan *AC-WC*, dasar *AC-WC*, permukaan *LPA*, dasar *LPA*, permukaan *LPB*, dasar *LPB*, permukaan *subgrade*, dan 1 m di bawah permukaan *AC-WC*. Semakin besar modulus elastisitas bahan pada pondasi atas maka akan semakin kecil tegangan *horizontal* yang diperoleh.

Tegangan *horizontal* pada dasar lapis *AC-WC* dengan permukaan *LPA* memiliki nilai yang sama, begitu pula dengan nilai tegangan pada dasar *LPA* dengan permukaan *LPB* serta tegangan pada dasar *LPB* dengan permukaan *subgrade*. Namun variasi modulus elastisitas lapis pondasi atas tidak mempengaruhi respon struktur pada lapisan *subgrade* karena tegangan *horizontal* tidak mengalami penurunan yang terlalu besar.



**Gambar 5.17 Tegangan Vertikal pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas Lapis Pondasi Atas**

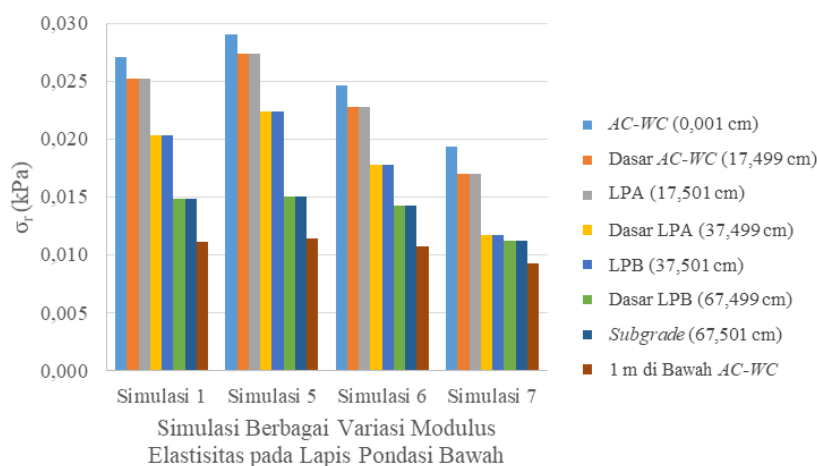
Gambar 5.17 di atas menunjukkan pengaruh variasi lapis permukaan terhadap nilai tegangan vertikal pada permukaan LPA (17,501 cm), permukaan LPB (37,501 cm), permukaan *subgrade* (67,501 cm), dan 1 m di bawah permukaan AC-WC. Semakin besar modulus elastisitas bahan pada pondasi atas maka tegangan vertikal pada lapisan tersebut akan semakin besar. Namun variasi modulus pada pondasi atas tidak mempengaruhi respon struktur untuk lapisan di bawah pondasi atas karena tegangan vertikal pada lapis pondasi bawah dan *subgrade* mengalami penurunan.



**Gambar 5.18 Horizontal dan Vertical Strain pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas Lapis Pondasi Atas**



Gambar 5.18 di atas menunjukkan bahwa semakin besar modulus elastisitas pada lapis pondasi atas maka nilai regangan akan semakin kecil. Variasi modulus elastisitas lapis pondasi atas disimpulkan mempengaruhi *horizontal tensile strain* (regangan tarik *horizontal*) pada kedalaman 17,499 cm (Dasar AC-WC). Simulasi 4 berbahan *Cement Aggregate Mixture* dengan modulus elastisitas yang cukup besar yaitu 3.500.000 kPa maka regangan menurun secara drastis. Variasi modulus elastisitas juga mempengaruhi *vertical compressive strain* (regangan tekan vertikal) pada kedalaman 67,501 cm (*subgrade*) namun penurunan regangan tidak sebesar penurunan pada kedalaman 17,499 cm (Dasar AC-WC).

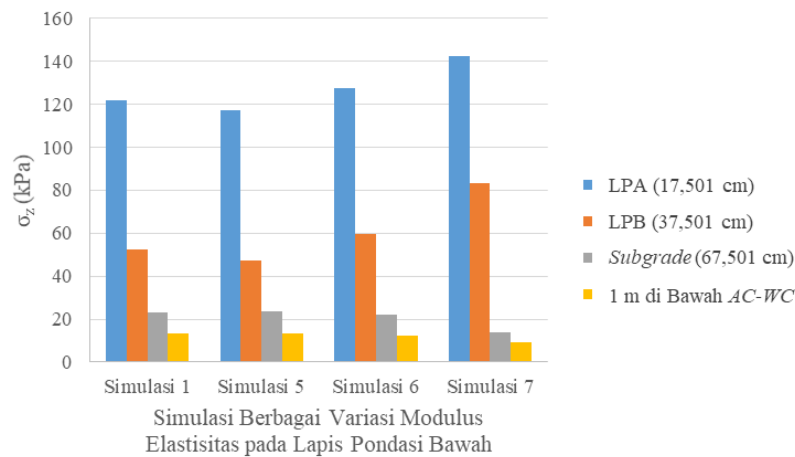


**Gambar 5.19 Tegangan *Horizontal* pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas Lapis Pondasi Bawah**

Gambar 5.19 di atas menunjukkan bahwa semakin besar modulus elastisitas maka nilai tegangan *horizontal* akan semakin kecil. Simulasi 5 berbahan *Lime Stabilized* dengan modulus elastisitas 140.000 kPa lebih kecil daripada modulus elastisitas perkerasan eksisting yang berbahan *Unbound Granular Material* dengan modulus elastisitas 210.000 kPa.

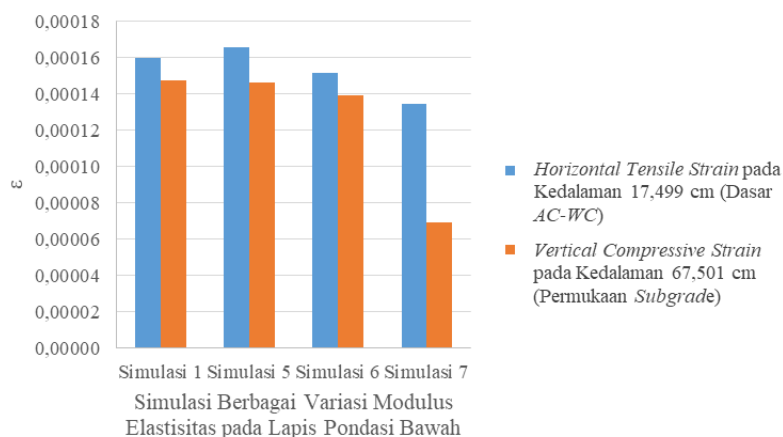
Tegangan *horizontal* pada dasar lapis AC-WC dengan permukaan LPA memiliki nilai yang sama, begitu pula dengan nilai tegangan pada dasar LPA dengan permukaan LPB serta tegangan pada dasar LPB dengan permukaan *subgrade*. Variasi modulus elastisitas disimpulkan mempengaruhi nilai regangan

pada lapis *AC-WC* sampai lapis pondasi bawah, namun tidak mempengaruhi lapisan *subgrade* karena nilai regangan tidak mengalami penurunan yang terlalu besar seperti lapisan-lapisan di atasnya.



**Gambar 5.20 Tegangan Vertikal pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas Lapis Pondasi Bawah**

Gambar 5.20 di atas menunjukkan bahwa semakin besar modulus elastisitas pada lapis pondasi bawah, maka tegangan vertikal pada lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah akan semakin besar. Simulasi 7 memiliki modulus yang cukup besar yaitu 3.500.000 kPa karena lapisan berbahan *Cement Aggregate Mixture*, oleh karena itu regangan vertikal pada simulasi tersebut mengalami kenaikan yang cukup tinggi. Sedangkan lapis pondasi atas dan lapis pondasi bawah mengalami kenaikan pada berbagai variasi modulus elastisitas, lapisan *subgrade* tidak mengalami perubahan karena tegangan vertikal hampir sama atau tidak menurun terlalu besar.



**Gambar 5.21** *Horizontal dan Vertical Strain* pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas Lapis Pondasi Bawah

Gambar 5.21 di atas menunjukkan bahwa semakin besar modulus elastisitas pada lapis pondasi bawah maka nilai regangan akan semakin kecil. Variasi modulus elastisitas lapis pondasi bawah disimpulkan mempengaruhi *vertical compressive strain* (regangan tekan vertikal) pada kedalaman 67,501 cm (*subgrade*). Simulasi 7 berbahan *Cement Aggregate Mixture* dengan modulus 3.500.000 kPa maka regangan menurun secara drastis. Variasi modulus elastisitas juga mempengaruhi *horizontal tensile strain* (regangan tarik *horizontal*) pada kedalaman 17,499 cm (Dasar *AC-WC*) namun penurunan regangan tarik tidak sebesar penurunan pada kedalaman 67,501 cm (*subgrade*).

Repetisi beban dilakukan dengan cara menghitung nilai  $N_f$  (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *fatigue cracking*),  $N_r$  (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *rutting*), dan  $N_d$  (jumlah nilai beban pengulangan yang diijinkan beban pengulangan untuk mengontrol *permanent deformation*) harus lebih besar dari *CESA* yang telah diprediksi. Untuk nilai  $f_4$  dan  $f_5$  mengikuti rekomendasi dari *Asphalt Institute*. Jumlah repetisi beban pada berbagai lapis perkerasan dan umur perkerasan dapat dilihat pada Tabel 5.20 berikut. Jumlah repetisi beban pada variasi modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 5.25 berikut.

**Tabel 5.25 Repetisi Beban Berdasarkan Kerusakan Retak leleh, Alur dan Deformasi Permanen pada Berbagai Variasi Modulus Elastisitas**

Repetisi Beban  Umur Rencana*	Lapis Permukaan		Lapis Pondasi Atas* (LP & LPB konstan pada modulus elastisitas 2.000.000 kPa & 105.000 kPa)				Lapis Pondasi Bawah* (LP & LPA konstan pada modulus elastisitas 2.000.000 kPa & 315.000 kPa)							
	Simulasi 1		Simulasi 2		Simulasi 3		Simulasi 4		Simulasi 5		Simulasi 6		Simulasi 7	
	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)	Bahan	E (kPa)
	Aspal Beton	2.000.000	<i>Cement Treated Granular Base</i>	500.000	<i>Asphalt Treated Base</i>	1.500.000	<i>Cement Agregat Mixture</i>	3.500.000	<i>Lime Stabilized</i>	140.000	<i>Bituminous Stabilized Mixture</i>	380.000	<i>Cement Agregat Mixture</i>	3.500.000
<i>Fatigue Cracking (ESAL)</i>	256.335.524		710.093.455		2.641.824.440		12.286.933.753.198		220.734.337		315.271.719		498.709.650	
	61 tahun		88 tahun		125 tahun		370 tahun		57 tahun		66 tahun		78 tahun	
<i>Rutting (ESAL)</i>	149.976.316		254.480.794		450.106.063		1.765.668.014		137.731.589		167.952.002		206.060.633	
	48 tahun		61 tahun		76 tahun		114 tahun		46 tahun		50 tahun		55 tahun	
<i>Permanent Deformation (ESAL)</i>	193.843.292		263.709.273		391.049.026		1.765.668.014		201.680.200		251.223.230		5.689.158.216	
	54 tahun		61 tahun		72 tahun		114 tahun		55 tahun		60 tahun		147 tahun	

\*Catatan: Lapis perkerasan yang tidak dianalisis memiliki modulus elastisitas yang sama dengan modulus elastisitas perkerasan eksisting (Simulasi 1).

Asumsi angka pertumbuhan lalu lintas = 3,5% per tahun, sesuai MDPJ 2017 Tabel 3.2 untuk Pulau Jawa

Simulasi 1 merupakan modulus elastisitas yang digunakan pada perkerasan eksisting, lapis permukaan menggunakan bahan aspal beton dengan modulus sebesar 2.000.000 kPa, lapis pondasi atas merupakan *unbound granular materials* sebesar 315.000 kPa dan lapis pondasi bawah merupakan *unbound granular materials* sebesar 210.000 kPa. Tabel 5.13 merupakan hasil repetisi beban untuk modulus elastisitas perkerasan eksisting berdasarkan kerusakan retak lelah sebesar 256.335.524 *ESAL*, kerusakan alur 149.976.316 *ESAL* dan kerusakan deformasi permanen 193.843.292 *ESAL*. Kemudian dilakukan variasi modulus elastisitas lapis pondasi atas dan pondasi bawah untuk mengetahui efek modulus pada setiap lapis sehingga diketahui besar repetisi beban pada kerusakan retak lelah, alur dan deformasi permanen.

Tabel 5.25 di atas menunjukkan pengaruh variasi modulus elastisitas terhadap nilai repetisi beban berdasarkan kerusakan retak lelah, alur dan deformasi permanen serta umur perkerasan. Diketahui semakin besar modulus elastisitas maka jumlah repetisi beban berdasarkan kerusakan yang dianalisis dan umur perkerasan akan semakin besar. Seluruh variasi modulus elastisitas di atas memiliki beban repetisi yang lebih besar daripada beban kendaraan selama umur rencana sebesar 35.105.407 *ESAL*. Oleh karena itu Tabel 5.25 dapat digunakan sebagai referensi pemilihan struktur perkerasan empat lapis berdasarkan nilai repetisi beban yang diinginkan.

Variasi modulus elastisitas pada lapis pondasi atas diketahui mempengaruhi repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking* (retak lelah) pada Simulasi 4 menggunakan bahan *cement aggregate mixture* sebesar 3.500.000 kPa, sedangkan variasi modulus elastisitas pada pondasi bawah diketahui mempengaruhi repetisi beban berdasarkan kerusakan *permanent deformation* pada Simulasi 7 menggunakan bahan *cement aggregate mixture* sebesar 3.500.000 kPa. Bila ingin memperbesar nilai repetisi beban berdasarkan kerusakan *fatigue cracking* dan *rutting*, pondasi atas lebih baiknya memiliki nilai modulus elastisitas yang besar atau bila ingin memperbesar nilai repetisi beban berdasarkan kerusakan *permanent deformation*, pondasi bawah lebih baiknya memiliki nilai modulus elastisitas yang besar.