JURNAL TEKNIK, Volume XI, No. 1, April 2012, 63-79

Analisis Perbandingan Model Linier Dan Nonlinier Struktur Perkerasan Berdasarkan Pengaruh Variasi Tebal Dan Modulus

Agus Juhara

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Achmad Yani

Abstrak. Analisis perbandingan model linier dan nonlinier dilakukan untuk mengetahui dampak terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada struktur perkerasan lentur akibat pengaruh peningkatan tebal lapis perkerasan (h) dan nilai modulus (E) material perkerasan.

Dari hasil analisis sensitivitas respon struktur perkerasan dengan model nonlinier, bahwa peningkatan modulus lapis perkerasan tidak menunjukan adanya sensitivitas regangan tarik horizontal (ε_t) maupun regangan tekan vertikal (ε_c). Hal ini terjadi karena pada model nonlinier peningkatan modulus sangat dipengaruhi oleh peningkatan beban yang bekerja serta adanya pengaruh konstanta K_1 dan K_2 dari masing-masing lapis pondasi dan tanah dasar. Dimana konstanta K_1 dan K_2 adalah sifat fisik material

Kata Kunci : Elastik linier, elastik nonlinier, konstanta nonlinier K_1 dan K_2

I. Pendahuluan

I.1 Latar Belakang

Dengan perkembangan metoda analisis perkerasan lentur serta pertumbuhan lalu lintas yang sangat pesat, maka dipandang perlu untuk mencari alternatip struktur perkerasan yang ekonomis. Dari hal tersebut perlu mengetahui perlilaku perubahan tebal dan modulus resilent masing – masing lapis perkerasan dengan mengambil dua model struktur perkerasan yaitu variasi model perilaku linier dan nonlinier. Dalam analisis ini akan terjadi interaksi yang komplek antara sejumlah parameter sehingga akan sulit untuk disimpulkan secara akurat dari gambar respons struktur perkerasan yang ditimbulkan, karena besarnya respon struktur perkerasan tidak hanya dipengaruh satu parameter, tetapi semua parameter lainnya. Kesimpulan yang didasarkan pada satu parameter bisa tidak valid, jika beberapa parameter lainnya berubah. Pendekatan terbaik adalah dengan memperbaiki semua parameter yang masuk akal untuk menunjukan pengaruh respon perkerasan yang terjadi.

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengevaluasi pengaruh dari perbedaan karakteristik elastik linier dan elastiknonlinier dari lapis perkerasan terhadap respon struktur perkerasan lentur
2. Melakukan analisis sensitivitas dari variasi tebal perkerasan, dan variasi modulus lapisan perkerasan dengan prilaku elastik linier dan elastik nonlinier terhadap respon kritis regangan tarik horizontal (ε_t) di bagian bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) di bagian atas tanah dasar pada struktur perkerasan lentur.

I.3 Ruang Lingkup Penelitian

Kegiatan-kegiatan yang akan dilakukan dalam penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut :

1. Struktur perkerasan untuk analisis perbandingan sensitifitas linier dan non-linier menggunakan struktur tiga lapis (*three-layer*) dengan perilaku elastik linier
2. Beban roda yang digunakan beban sumbu tunggal roda ganda
3. Analisis struktur perkerasan dengan asumsi bidang kontak antara ban dan permukaan perkerasan berbentuk lingkaran

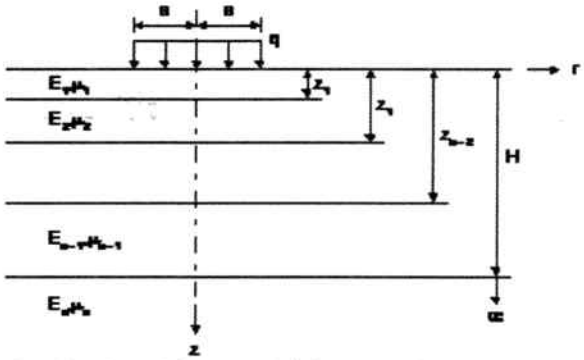
II. Tinjauan Pustaka

II.1 Sistem Multilayer

Persamaan Boussinesq's digunakan sebagai solusi untuk analisis elastik sistem satu lapis, Bumister (1943) pertama kali mengembangkan untuk sistem dua lapis dan kemudian sistem tiga lapis. Satu keuntungan dari teori ini adalah dapat digunakan untuk memperoleh suatu *multilayer system* yang merupakan sebagian besar digunakan dalam analisis struktur perkerasan lentur. Tetapi ada beberapa anggapan-anggapan diperlukan untuk menggunakan teori Burmister :

- Beban diaplikasikan merata diatas permukaan perkerasan dengan tekanan bidang kontak diasumsikan berbentuk lingkaran
- Semua lapisan perkerasan dalam arah horizontal takhingga dan kedalaman subgrade takhingga
- Interface antara dua lapisan adalah *full friction*

Bila dibandingkan respon perkerasan dari teori *multilayer* dari Bumister labih teliti dibandingkan dengan teorinya Boussinesq's. Gambar 2.1 Menggambarkan sistem *multilayer* dari struktur perkerasan lentur dengan karakteristik material yaitu, modulus elastik (E) dan *Ratio Poisson* (μ).



Gambar 2.1. Sistem *Multilayer* Perkerasan Lentur

II.2 Analisis Elastik Linier

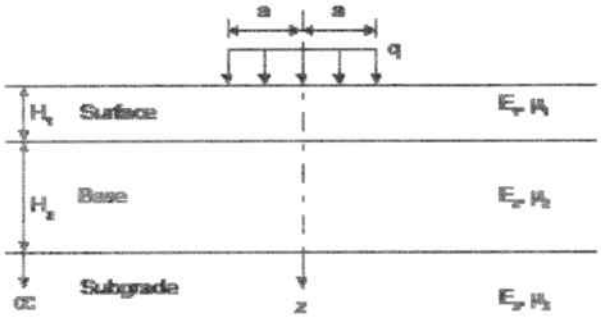
Modulus resilien adalah salah satu variabel sifat material merupakan input yang penting untuk mengevaluasi struktur perkerasan menggunakan konsep-konsep mekanistik. Perincian mengenai modulus resilien disajikan pada persamaan 2.1.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad \text{.....(2-1)}$$

Dimana σ_d tegangan deviator

Dalam konsep *multilayered elastic system*, material perkerasan diasumsikan elastik linier. Meskipun lapis aspal adalah viscoelastik dan lapisan glanular elastik nonlinier dengan karakteristik yang dinyatakan dengan parameter sebagai berikut :

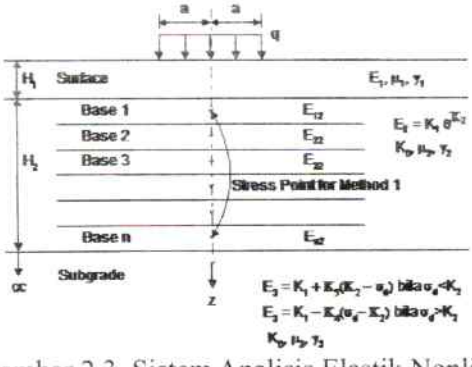
- Besaran tegangan adalah sebanding terhadap regangan dalam setiap material
- Masing lapis adalah homogen dan isotropik



Gambar 2.2. Sistem Analisis Elastik Linier

II.3 Analisis Elastik Nonlinier

Model struktur perkerasan yang di kembangkan dalam analisis elastik nonlinier seperti pada Gambar 2.3 dibawah ini. Dimana lapis pondasi dibagi kedalam beberapa lapis dengan titik tegangan ditengah ketebalan masing-masing lapis.



Gambar 2.3. Sistem Analisis Elastik Nonlinier

Material perkerasan diasumsikan elastik nonlinier dengan karakteristik yang dinyatakan dengan parameter sebagai berikut :

- Besar tegangan adalah tidak berbanding linier terhadap regangan untuk setiap jenis material, dinamakan elastik nonlinier
- Masing-masing lapis perkerasan bersifat homogen dan anisotropik

Analisis elastik nonlinier dimana modulus elastik bervariasi sesuai besarnya tingkat tekanan sehingga untuk penyesaian masalah nonlinier diperlukan proses iterasi yang merupakan bagian yang sangat penting dalam memperoleh solusi sistem persamaan nonlinier. Kebutuhan proses iterasi sangat menentukan dalam mencapai kekonvergenan analisis.

Metoda analisis iterasi merupakan metoda yang sering digunakan untuk menyelesaikan masalah-masalah nonlinier. Hal ini didukung dengan semakin berkembangnya perangkat penghitung yang mempunyai kemampuan lebih tinggi sehingga dapat memberikan efesiensi dan hasil yang lebih akurat.

II.4 Model K-θ untuk Material *Unbound Granular*

Telah diketahui bahwa material-material berbutir dan tanah dasar adalah material dengan perilaku nonlinier dengan modulus elastik yang bervariasi sesuai besarnya tingkat tekanan. Modulus elastik yang akan digunakan dalam sistem struktur perkerasan berlapis merupakan modulus resilien yang diperoleh dari uji triaksial.

Modulus resilien dari material berbutir tersebut akan meningkat dengan meningkatnya intensitas tekanan yang terjadi, sedangkan modulus resilien dari tanah-tanah berbutir halus akan berkurang dengan meningkatnya intensitas tekanan.
Hubungan konstitutif suatu hubungan yang sederhana antara modulus resilien dengan *stress invariant* pertama dapat dinyatakan sebagai berikut (Huang,1993) :

$$E = K_1 \theta^{K_2} \quad \text{.....(2-2)}$$

Dimana K_1 dan K_2 konstanta menurut percobaan dan adalah tegangan *invariant*, yang berjumlah tiga tegangan normal, σ_x, σ_y, dan σ_z, atau berjumlah tiga tegangan utama, σ_1, σ_2, dan σ_3.

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad \text{.....(2-3)}$$

Bila berat volume material masuk sistem *multilayer* akan diperoleh

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z + yz(1 + 2K_o) \quad \text{.....(2-4)}$$

dimana y adalah berat volume rata-rata, z adalah jarak di bawah permukaan dimana modulusnya akan ditentukan

Rada dan Witczak (1981) mempublikasikan data analisis statistik mengenai modulus resilien untuk beberapa material granular, seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2.1 (Finn dkk., 1986) bahwa modulus resilien dari aggregat *base* dan aggregat *subbase* dalam AASHO Road Test dapat digambarkan oleh Persamaan 2.2 dengan K_2 sama dengan 0,6 dan K_1 berkisar dari 3.200 sampai 8.000 psi, bergantung pada kadar kelembaban. Nilai-nilai K_1 dan K_2 diperlihatkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Konstanta Nonlinier K_1 and K_2 untuk material *Granular*

Material Type	No. of data points	K1 (psi)		K2 (psi)	
		Mean	Standard Deviation	Mean	Standard Deviation
Silty sand	8	1.620	78	0,62	0,13
Sand-gravel	37	4.480	4.300	0,53	0,17
Sand-aggregat blend	78	4.350	2.630	0,59	0,13
Crushed stone	115	7.210	7.490	0,45	0,23

Tabel 2.2 Batasan dari K_1 dan K_2 material *Untreated Granular*

Reference	Material	K1 (psi)	K2 (psi)
Hicks (1970)	Partially crushed gravel, cruche rock	1.600 - 5.000	0,57 - 0,73
Hicks and Finn (1970)	Untreated base at San Diego Test Road	2.100 - 5.400	0,61
Allen (1973	Gravel, crushed stone	1.800 - 8.000	0,32 - 0,70
Kalcheff and Hicks (1973)	Crushed stone	4.000 - 9.000	0,46 - 0,64
Boyce et al. (1976)	Well-graded crushed lime stone	8000	0,67
Monismitth and Withzak (1980)	In service base and subbase material	2.900 - 7.750	0,46 - 0,65

Sumber : Huang, 2004

Tabel 2.3 Beberapa Jenis Material yang Dikembangkan ILLI-PAVE

Some material Properties for Developing ILLI-PAVE Alogarithms

Property	Hot mix asphalt			Crushed Stone base	Subgrade soils			
	40°F	70°F	100°F		Stiff	Medium	Soft	Very Soft
Unit weight (pcf)	145	145	145	135	125	120	115	110
Coefficient of earth pressure at rest	0,37	0,67	0,85	0,6	0,82	0,82	0,82	0,82
Poisson ratio	0,27	0,40	0,46	0,38	0,45	0,45	0,45	0,45
Modulus (103 psi)	1.400	500	100	9.000q0.33	See Figure 3.6			

Sumber : Huang, 2004

II.5 Model Bilinier untuk Material Subgrade

Model bilinier merupakan salah satu dari model modulus resilien yang lazim digunakan untuk subgrade melalui hubungan tekanan modulus-deviator

Modulus dari tanah berbitir halus akan berkurang dengan peningkatan tegangan deviator σ_d. dalam pengujian triaxial, $\sigma_2 = \sigma_3$, sehingga tegangan deviator didefinisikan sebagai berikut :

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{.....(2-5)}$$

Dalam sistem *multilayer*, σ_2 mungkin tidak sama dengan σ_3, sehingga rata-rata dari σ_2 dan σ_3 dianggap sebagai σ_3. Dengan memperhitungkan berat volume dimasukan dalam sistem *multilayer* tersebut akan diperoleh persamaan.

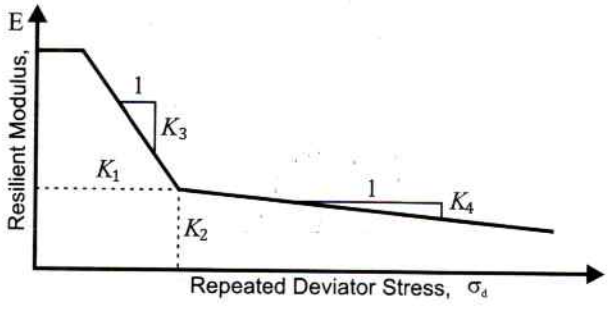
$$\sigma_d = \alpha_1 - 0{,}5\,(\sigma_2 + \sigma_3) + yz\,(1-K_0) \quad \text{.....(2-6)}$$

Hubungan antara modulus resilien dan tekanan deviator dari tanah-tanah berbutiran halus yang diperoleh dari uji triaxial di laboratorium. Perilaku bilinier dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$E = K_1 + K_3 (K_2 - \alpha_d) \text{ bila } \alpha_d < K_2 \quad \text{.....(2-7)}$$

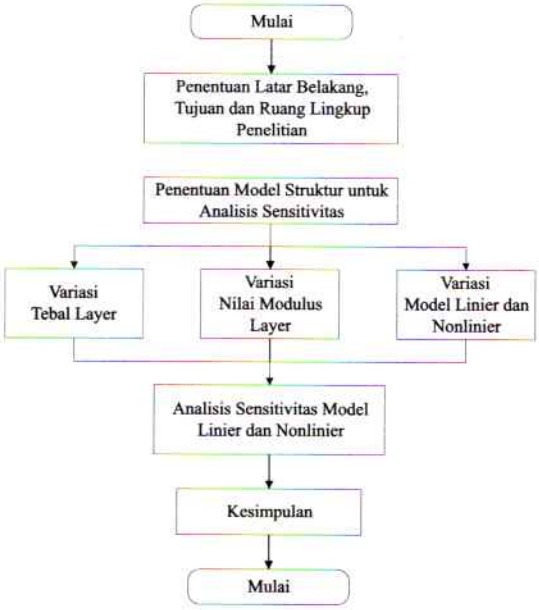
$$E = K_1 + K_4 (\alpha_d - K_2) \text{ bila } \alpha_d > K_2 \quad \text{.....(2-8)}$$

Dimana : K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 adalah konstanta material.



Hubungan Modulus dan Tegangan Deviator Tanah Dasar

III. Metodologi



Gambar 3.1. Bagan Alir Metodologi Penelitian

Penelitian dimulai dengan penentuan latar belakang, tujuan penelitian dan ruang lingkup penelitian yang merupakan dasar serta akan menjadi acuan di dalam pelaksanaan penelitian.

Model struktur lapis perkerasan pondasi dan tanah dasar digunakan perilaku linier dan nonlinier. Dalam analisis sensitivitas variasi yang ditinjau adalah variasi tebal lapis perkerasan dan variasi nilai modulus untuk masing-masing kondisi model linier dan nonlinier. Untuk lebih jelas Tabel 3.1 memberikan gambaran asumsi dari struktur perkerasan lentur yang akan di kaji.

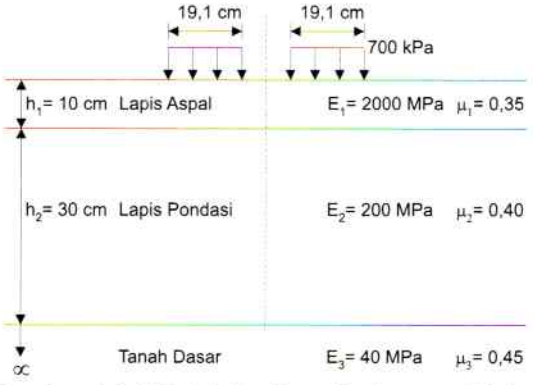
Tabel 3.1. Model Analisis Sensitivitas Struktur Perkerasan Lentur

Model	Beban	Susunan Perkerasan	Jenis Perkerasan	Perilaku Bahan Perkerasan	Ketebalan	*Modulus*
1	Sumbu Tunggal	Lapis 1	Campuran aspal	Linier elastik	Variasi	Variasi
		Lapis 2	Material berbutir	Linier elastik	Variasi	Variasi
		Lapis 3	Tanah dasar	Linier elastik	-	Variasi
2		Lapis 1	Campuran aspal	Linier elastik	Variasi	Variasi
		Lapis 2	Material berbutir	Non-linier elastik	Variasi	Variasi
		Lapis 3	Tanah dasar	Non-linier elastik	-	Variasi

Kegiatan penelitian dilanjutkan dengan melakukan analisis sensitivitas yang berupa nilai regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) struktur perkerasan untuk setiap variasi nilai tebal dan variasi modulus lapis perkarasan dari masing - masing model dengan berperilaku linier dan nonlinier. Kemudian melakukan perbandingan dari setiap model struktur perkerasan selanjutnya kegiatan penelitian diakhiri dengan memberikan kesimpulan dan rekomendasi dari hasil analisis yang telah dilakukan pada kegiatan penelitian ini dan kegiatan-kegiatan penelitian yang harus dikembangkan.

IV. Analisis Sensitivitas

A. Analisis Model Linier



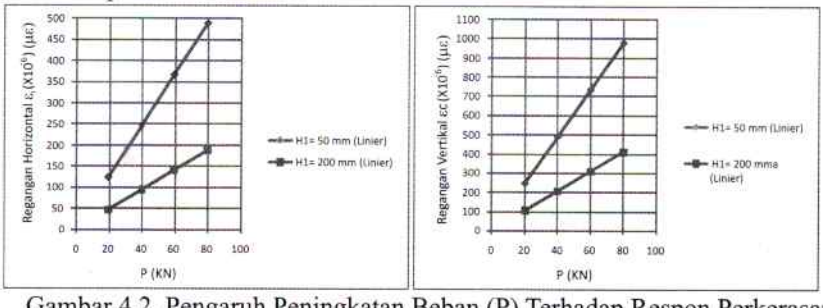
Gambar 4.1. Model Struktur Perkerasan Linier

Analisis sensituvitas linier ini dilakukan untuk mengetahui sensitivitas respon struktur perkerasan lentur dilihat dari besaran regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c). Analisis sensitivitas linier ini didasarkan pada asumsi bahwa semua material lapisan struktur perkerasan berperilaku linier, meskipun lapisan perkerasan yang sebenarnya dilapangan adalah campuran aspal viskoelastik, lapis pondasi dan tanah dasar adalah berperilaku nonlinier.

Analisis sensitivitas ini digunakan struktur perkerasan sistem tiga lapis seperti terlihat pada Gambar 4.1. Untuk menggambarkan respon struktur perkerasan akibat pengaruh dari beberapa faktor perencanaan, dimana variabel yang perlu dipertimbangkan adalah keteban lapisan perkerasan h_1 dan h_2, modulus bahan lapisan E_1, E_2, dan E_3. Karakteristk material lain yaitu *poisson ratio* untuk masing-masing lapisan 0.35, 0.4 dan 0.45. Jenis beban roda yang digunakan adalah beban roda ganda (*Dual Wheel*) dengan jarak antar roda 34,3 cm, jari-jari bidang kontak 19,1 cm dan tegangan kontak 700 kPa. Besaran respon regangan yang akan digambarkan dalam analisis ini sebagai cerminan dari kriteria keruntuhan *fatigue* yang terjadi dibawah lapis aspal dan *permanent deformation* diatas lapis tanah dasar. Variasi yang di tinjau dalam analisis sensitivitas linier ini adalah sebagai berikut :

a. Variasi Beban (P)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi peningkatan beban (P) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar dari struktur perkerasan lentur.



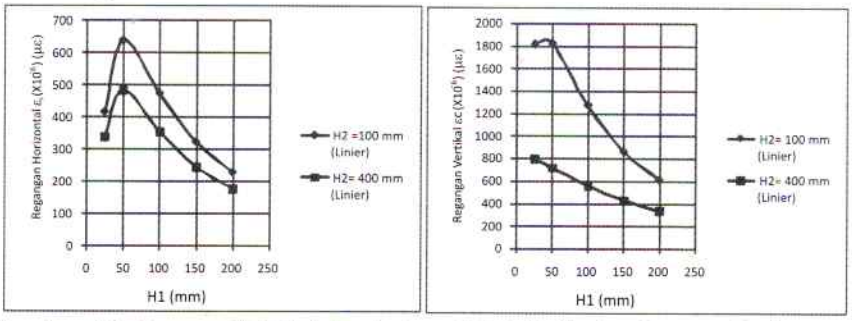
Gambar 4.2. Pengaruh Peningkatan Beban (P) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 menunjukan besarnya pengaruh variasi beban (P) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada struktur perkerasan, ketika E_1 = 2000 MPa, E_2 = 200 MPa, E_3 = 40 MPa dan h_1 = 50 atau 200 cm. Digunakannya dua variasi ketebalan lapis aspal (h_1) yang berbeda, agar diketahui respon struktur perkerasan pada saat h_1 tipis maupun h_1 tebal. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan beban (P) pengaruhnya signifikan terhadap peningkatan regangan tarik horizontal (ε_t) ketika h_1 tipis namun kurang signifikan ketika h_1 besar.
2. Peningkatan beban (P) pengaruhnya signifikan terhadap peningkatan regangan tekan vertikal (ε_c) signifikan ketika h_1 tipis namun kurang signifikan ketika h_1 tebal
3. Hubungan antara beban (P) dan regangan tarik horizontal (ε_t) maupun regangan tekan vertikal (ε_c) adalah linier

b. Variasi Tebal Lapis Aspal

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tebal lapis aspal (h_1) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar dari struktur perkerasan lentur.



Gambar 4.3. Pengaruh Tebal Lapis Aspal (h_1) Terhadap Respon Perkerasan

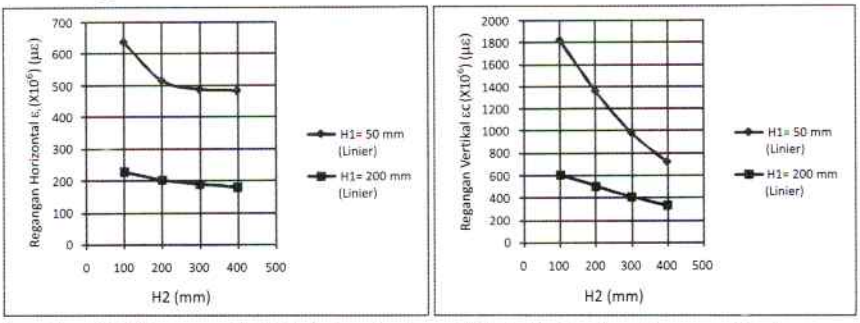
Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 menunjukan besarnya pengaruh variasi tebal lapis aspal (h_1) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan, ketika E_1 = 2000 MPa, E_2 = 200 MPa, E_3 = 40 MPa dan h_2 = 100 atau 400 cm. Digunakannya dua variasi ketebalan lapis pondasi (h_2) yang berbeda, agar diketahui respon struktur perkerasan pada saat h_2 tipis maupun h_2 tebal. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Adanya ketebalan h_1 kritis dimana regangan tarik (ε_t) maksimum, kecenderungan yang sama baik pada saat h2 tipis maupun tebal. Hal ini menunjukan bahwa untuk meminimalkan kelelahan retak dapat dilakukan dengan menjaga agar lapis aspal setipis mungkin.
2. Demikian juga terjadi pada regangan tekan (ε_c), terjadinya ketebalan h_1 kritis pada saat ketebalan h_2 tipis
3. Peningkatan h_1 efektif dalam mengurangi regangan tarik vertikal (ε_t) ketika h_2 tipis maupun h_2 tebal

Peningkatan h_1 efektif dalam mengurangi regangan tekan (ε_c) ketika h_2 tipis, dan tidak efektif ketika h_2 tebal

c. Variasi Tebal Lapis Pondasi

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tebal lapis pondasi (h_2) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar dari struktur perkerasan lentur.



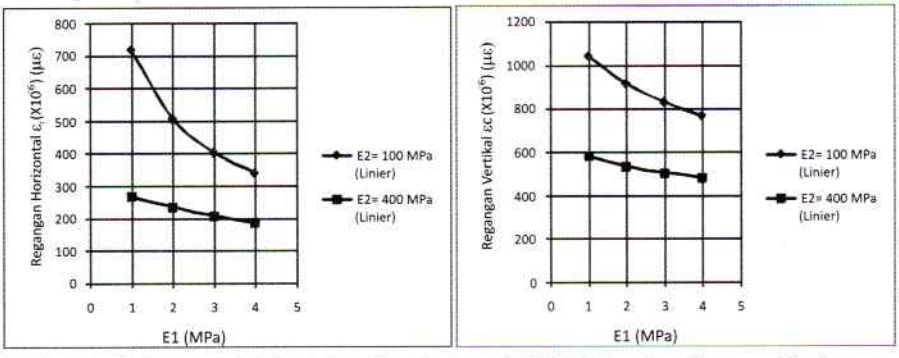
Gambar 4.4.Pengaruh Tebal Lapis Aspal (h_2) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 menunjukan besarnya pengaruh variasi tebal lapis pondasi (h_2) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan, ketika E_1= 2000 MPa, E_2= 200 MPa, E_3= 40 MPa dan h_2 = 100 atau 400 cm. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan h_2 tidak menyebabkan pengurangan regangan tarik horizontal (ε_t) signifikan baik saat h_1 tipis maupun tebal, kecuali ketika peningkatan h_2 hingga 200 mm untuk h_1 tipis terjadi pengurangan yang signifikan.
2. Peningkatan h_2 efektif dalam mengurangi regangan tekan (ε_c) ketika h_1 tipis namun tidak ketika h_2 tebal.

d. Variasi Modulus Lapis Aspal

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi modulus lapis aspal (E_1) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar struktur perkerasan lentur.



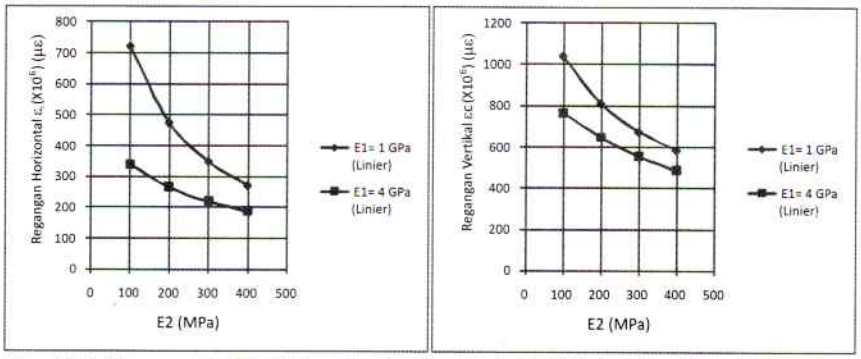
Gambar 4.5. Pengaruh Modulus Lapis Aspal (E_1) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 menunjukan besarnya pengaruh variasi E_1 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) perkerasan pada saat E_3= 40 MPa, h_1= 100 mm, h_2= 300 dan E_2 = 100 MPa atau 400 MPa. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan E_1 besar pengaruhnya dalam mengurangi regangan tarik horizontal (ε_t) ketika E_2 kecil dan tidak ketika E_2 besar
2. Peningkatan E_1 besar pengaruhnya dalam mengurangi regangan tekan vertikal (εc) ketika E_2 kecil dan tidak ketika E_2 besar.

e. Variasi Modulus Lapis Pondasi

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi modulus lapis pondasi (E_2) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar struktur perkerasan lentur.



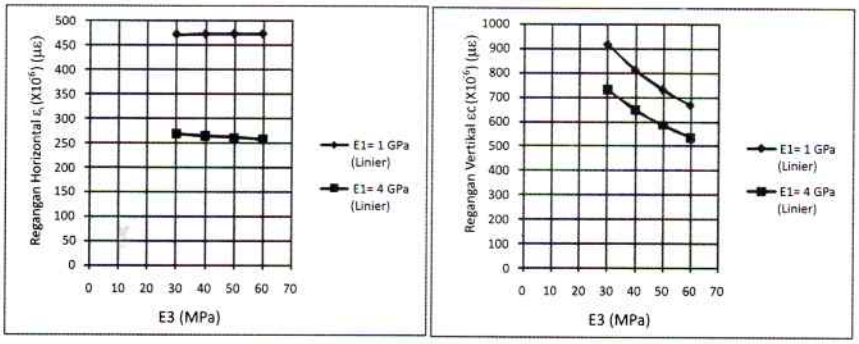
Gambar 4.6. Pengaruh Modulus Lapis Pondasi (E_2) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 menunjukan besarnya pengaruh variasi E_2 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) perkerasan pada saat E_3= 40 MPa, h_1= 100 mm, h_2= 300 dan E_2 = 1 GPa atau 4 GPa. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan E_2 besar pengaruhnya dalam mengurangi regangan tarik horizontal (ε_t) ketika E_1 kecil dan tidak ketika E_1 besar
2. Peningkatan E_2 besar pengaruhnya dalam mengurangi regangan tekan vertikal (ε_c) ketika E_1 kecil maupun E_1 besar

f. Variasi Modulus Tanah Dasar

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi modulus tanah dasar (E_3) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar dari struktur perkerasan lentur .

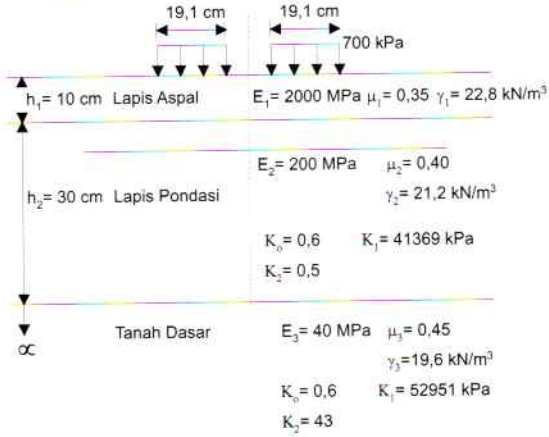


Gambar 4.7. Pengaruh Modulus Tanah Dasar (E_3) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.7 menunjukan besarnya pengaruh variasi E_1 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) perkerasan pada saat E_2= 200 MPa, h_1= 100 mm, h_2= 300 dan E_1=1 GPa atau 4 GPa. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan E_3 tidak mempunyai pengaruh pengurangan regangan tarik horizontal (ε_t) yang signifikan baik ketika E_1 kecil dan ketika E_1 besar.
2. Peningkatan E_3 mempunyai pengaruh yang besar dalam mengurangi regangan tekan vertikal (ε_c) baik ketika E_1 kecil maupun ketika E_1 besar

B. Analisis Model Non-linier



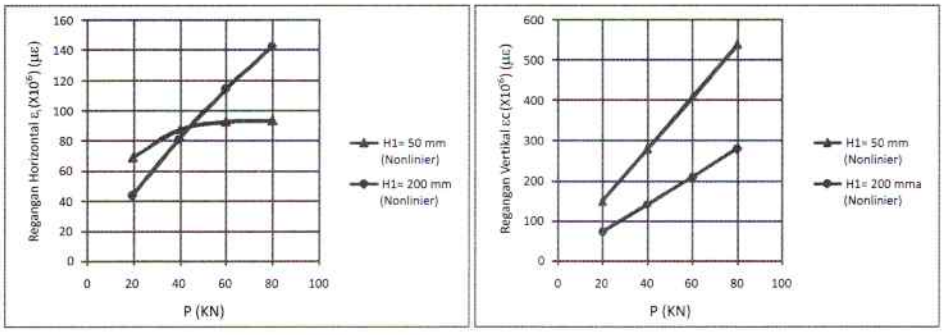
Gambar 4.8. Model Struktur Perkerasan Nonlinier

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui sensitivitas respon kritis struktur perkerasan lentur dilihat dari besaran regangan tarik horizontal (ε_t) maupun regangan tekan vertikal (ε_c). Analisis sensitivitas nonlinier ini didasarkan pada asumsi bahwa lapis aspal linier meskipun viskoelastik, lapis pondasi dan tanah dasar adalah nonlinier. Analisisnya, tebal lapis pondasi dibuat beberapa sub-lapis, dimana tiap sub-lapis tidak lebih 5 cm dengan titik control tegangan di tengah tebal dari masing-masing sub-lapis.

Analisis sensitivitas ini digunakan sistem struktur tiga lapis dengan karakteristik bahan perkerasan dan Jenis beban roda yang digunakan adalah beban roda ganda (*Dual Wheel*) dengan jarak antar roda 34,3 cm, jari-jari bidang kontak 19,1 cm dan tegangan kontak 700 kPa seperti terlihat pada Gambar 4.8 untuk menggambarkan pengaruh peningkatan tebal dan modulus digambarkan dari nilai regangan tarik (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada struktur perkerasan.. besaran regangan yang akan digambarkan dalam analisis ini sebagai cerminan dari kriteria kerintuhan *fatigue* yang terjadi dibawah lapis aspal dan *permanent depormation* diatas lapis tanah dasar.

a. Variasi Beban (P)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi peningkatan beban (P) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar dari struktur perkerasan lentur.



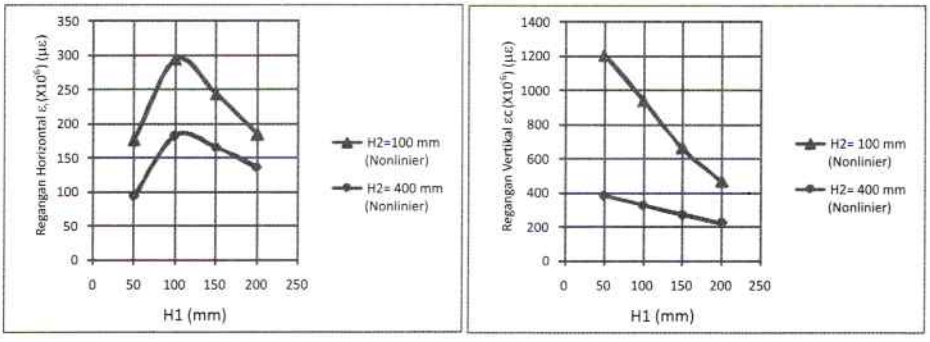
Gambar 4.9. Pengaruh Peningkatan Beban (P) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.9 menunjukan besarnya pengaruh variasi beban (P) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan, ketika E_1 = 2000 MPa, E_2 = 200 MPa, E_3 = 40 MPa dan h_1 = 50 atau 200 cm. Digunakannya dua variasi ketebalan lapis aspal (h_1) yang berbeda, agar diketahui respon struktur perkerasan pada saat h_1 tipis maupun h_1 tebal. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan beban (P) pengaruhnya tidak signifikan terhadap pengurangan regangan tarik horizontal (ε_t) ketika h_1 tipis namun signifikan ketika h_1 besar.
2. Peningkatan beban (P) pengaruhnya signifikan terhadap peningkatan regangan tekan vertikal (ε_c) yang signifikan ketika h_1 tipis namun kurang signifikan ketika h_1 tebal
3. Efek nonlinier, hubungan antara beban (P) dan regangan tarik horizontal (ε_t) ketika h_1 tipis tidak linier sedangkan ketika h_1 tebal hampir linier
4. Hubungan antara beban (P) dan regangan tekan vertikal (ε_c) adalah linier

b. Variasi Tebal Lapis Aspal (h_1)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tebal lapis aspal (h_1) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar struktur perkerasan lentur.



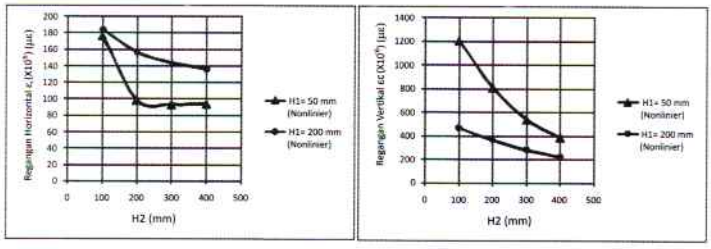
Gambar 4.10. Pengaruh Tebal Lapis Aspal (h_1) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.10 menunjukan besarnya pengaruh variasi h_1 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan pada saat E_1= 2000 MPa; E_2= 200 MPa K_1= 41369 kPa, K_2=0,5; E_3= 40 MPa, K_1= 20822 kPa; dan h_2 = 100 atau 400 mm. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Pada variasi h_1 nilai regangan hasil analisis nonlinier mempunyai pola yang sama dengan analisis linier.
2. Ketebalan h_1 kritis regangan tarik horizontal (ε_t) maksimum analisis nonlinier lebih besar dari analisis linier, mempunyai kecenderungan yang sama baik pada saat h_2 tipis maupun tebal. Hal ini menunjukan bahwa untuk meminimalkan kelelahan retak dapat dilakukan dengan menjaga agar lapis aspal setipis mungkin.
3. Peningkatan h_1 efektif dalam mengurangi regangan tarik horizontal (ε_t) ketika h_2 tipis maupun h_2 tebal
4. Peningkatan h_1 efektif dalam mengurangi regangan tekan vertikal (ε=) ketika h_2 tipis, dan tidak efektif ketika h_2 tebal

c. Variasi Tebal Lapis Pondasi (h_2)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tebal lapis pondasi (h_2) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar struktur perkerasan lentur.



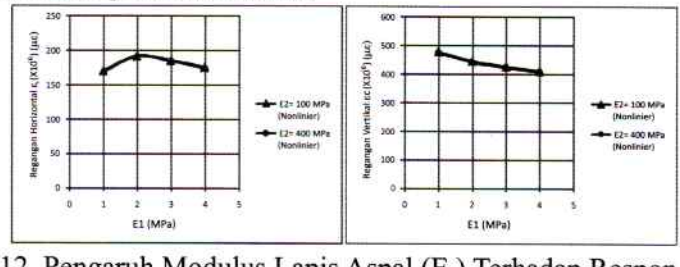
Gambar 4.11. Pengaruh Tebal Lapis Pondasi (h_2) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.11 menunjukan besarnya pengaruh variasi h_1 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan pada saat E_1= 2000 MPa; E_2= 200 MPa K_1= 41369 kPa, K_2=0,5; E_3= 40 MPa, K_1= 20822 kPa; dan h_2 = 100 atau 400 cm. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan h_2 tidak menyebabkan pengurangan regangan tarik horizontal (ε_t) yang signifikan baik ketika h_1 tipis maupun tebal, pada saat peningkata h_2 hingga 200 mm untuk h_1 tipis terjadi pengurangan yang signifikan.
2. Peningkatan h_2 efektif dalam mengurangi regangan tekan (ε_c) ketika h_1 tipis namun tidak ketika h_2 tebal

d. Variasi Modulus Lapis Aspal (E_1)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi modulus lapis aspal (E_1) terhadap respon regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar struktur perkerasan lentur.



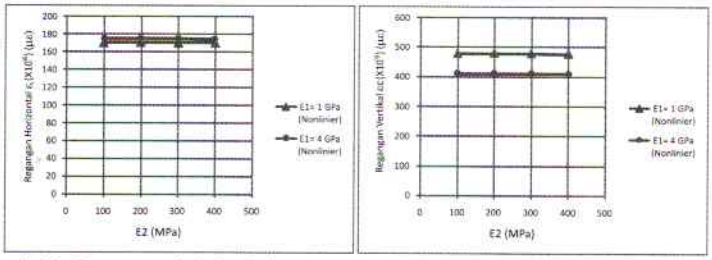
Gambar 4.12. Pengaruh Modulus Lapis Aspal (E_1) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.12 menunjukan besarnya pengaruh variasi E_1 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan pada saat h_1= 100 mm, h_2= 300, K_1= 41369 kPa, K_2=0,5; dan E_3= 40 MPa, K_1= 20822 kPa. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan E_1 pengaruhnya kecil dalam mengurangi regangan tarik horizontal (ε_t) ketika E_2 kecil maupun ketika E_2 besar
2. Peningkatan E_1 pengaruhnya kecil dalam mengurangi regangan tekan vertikal (ε_c) ketika E_2 kecil maupun ketika E_2 besar

e. Variasi Modulus Lapis Pondasi (E_2)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi modulus lapis pondasi (E_2) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar struktur perkerasan lentur.



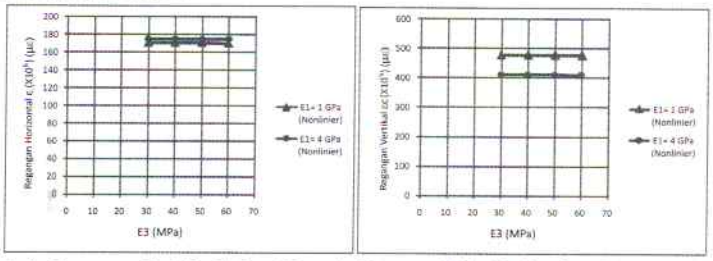
Gambar 4.13. Pengaruh Modulus Pondasi (E_2) Terhadap Respon Perkerasan

Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.13 menunjukan besarnya pengaruh variasi E_2 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan pada saat h_1= 100 mm, h_2= 300, K_1= 41369 kPa, K_2=0,5; dan E_3= 40 MPa, K_1= 20822 kPa. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan E_2 tidak ada pengaruhnya dalam mengurangi regangan tarik horizontal (ε_t) kritis ketika E_2 kecil maupun ketika E_2 besar
2. Demikian juga terhadap regangan tekan vertikal (ε_c) Peningkatan E_1 pengaruhnya tidak ada baik ketika E_2 kecil maupun ketika E_2 besar

f. Variasi Modulus Tanah Dasar (E_3)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi modulus dasar (E_3) terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar struktur perkerasan lentur.



Gambar 4.14. Pengaruh Modulus Tanah Dasar (E_3) Terhadap Respon Perkerasan

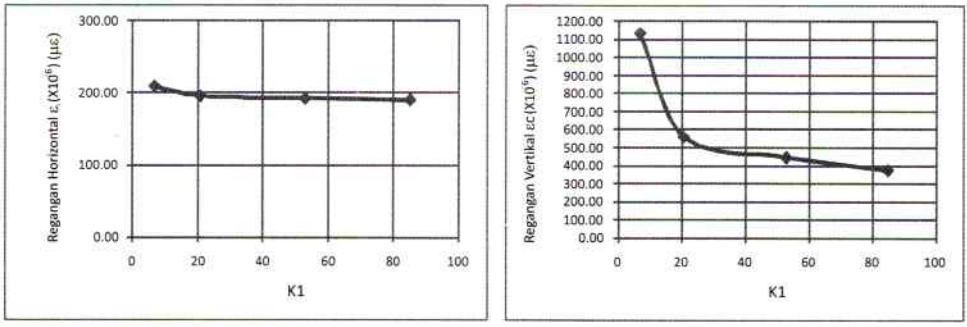
Dari grafik seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.14 menunjukan besarnya pengaruh variasi E_3 terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan pada saat h_1= 100 mm, h_2= 300, K_1= 41369 kPa, K_2=0,5; dan E_2= 200 MPa, K_1= 20822 kPa. Grafik diatas memberikan gambaran bahwa :

1. Peningkatan E_2 tidak ada pengaruhnya dalam mengurangi regangan tarik horizontal (ε_t) kritis kerika E_2 kecil maupun ketika E_2 besar
2. Demikian juga terhadap regangan tekan vertikal (ε_c) Peningkatan E_1 pengaruhnya tidak ada baik ketika E_2 kecil maupun ketika E_2 besar

Pengaruh modulus lapis pondasi dan modulus tanah dasar seperti terlihat pada Gambar 4.12 sampai 4.14 untuk masing-masing variasi tidak menunjukan adanya sensitifitas repon struktur perkerasan baik terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) di bawah lapis aspal maupun regangan tekan vertikal (ε_c) di atas tanah dasar, karena analisis nonlinier besarnya modulus lapis pondasi maupun modulus tanah dasar dipengaruhi oleh besarnya tegangan dan konstanta (K_1,K_2).

Dimana besarnya tegangan ditentukan oleh besarnya beban kendaraan sedangkan nilai konstanta besarnya tergantung pada sifat fisik bahan perkerasan.. Saling ketergantungan antara tegangan dan konstanta (K_1,K_2). Untuk itu peningkatan karakteristik bahan struktur perkerasan akan berdampak terhadap besarnya respon perkerasan, sedangkan untuk mendapatkan korelasi antara modulus dan konstanta K_1 dan K_2 sangat sulit diperkirakan, dengan demikian untuk memperoleh nilai korelasi harus dilakukan pengujian di laboratorium.

Karena adanya keterbatasan data, maka dalam penelitian ini di buat asumsi variasi K_1 dan K_2 untuk memberikan gambaran pengaruhnya terhadap sensitivitas respon struktur perkerasan lentur.



Gambar 4.15. Sensititas Respon Perkerasan Terhadap Variasi K_1 Tanah Dasar

Dari Gambar 4.15 menunjukan pengaruh K_1 tanah dasar terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) pada perkerasan. Dari gambar diatas memberikan gambaran bahwa peningkatan kekuatan tanah dasar akan meningkatkan modulus lapis pondasi, sehingga akan terjadi pengurangan regangan tarik horizontal (ε_t) dibawah lapis aspal sebesar 1,4%, 18,2 % pengurangan regangan tekan vertikal (ε_c) diatas tanah dasar dan pengaruhnya terhadap defleksi permukaan lapis aspal sebesar 20,5%. Peningkatan K_1 tanah dasar berdapak besar terhadap regangan tekan vertikal (ε_c) dan lendutan (δ) permukaan terutama dari tanah sangat lunak ke tanah lunak, tetapi dampaknya sangat kecil terhadap regangan tarik horizontal (ε_t).

V. Kesimpulan Dan Saran

V.1 Kesimpulan

Dalam analisis sensitivitas respon kritis regangan tarik horizontal (ε_t) di bagian bawah lapis aspal dan regangan tekan vertikal (ε_c) di bagian atas tanah dasar pada struktur perkerasan lentur, akibat pengaruh variasi tebal dan variasi modulus lapisan perkerasan dengan variasi (variasi 1 dan variasi 4), dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Dari analisis sensitivitas respon struktur perkerasan dengan material berperilaku linier (variasi 1) peningkatan tebal lapis aspal dan modulus lapis pondasi berpengaruh signifikan terhadap pengurangan regangan tarik horizontal (ε_t) dan regangan tekan vertikal (ε_c) struktur perkerasan. Sedangkan peningkatan tebal lapis pondasi dan modulus tanah dasar hanya berpengaruh signifikan terhadap pengurangan regangan tekan vertikal (ε_c) lapis perkerasan. sedangkan peningkatan modulus lapis aspal hanya berpegaruh signifikan terhadap pengurangan regangan tarik horizontal (ε_t) lapis perkerasan.
2. Dari analisis sensitivitas respon struktur perkerasan dengan material berperilaku nonlinier (variasi 4), diperoleh bahwa peningkatan modulus lapis perkerasan tidak menunjukan adanya sensitivitas respon struktur perkerasan, baik terhadap regangan tarik horizontal (ε_t) maupun regangan tekan vertikal (ε_c). Hal ini terjadi karena besarnya beban yang diberikan tetap. Sedangkan pada analisis nonlinier lapis pondasi atau tanah dasar, nilai modulus lapisan tergantung dari besarnya tegangan yang terjadi (*stress dependent*).
3. Respon struktur perkerasan dengan perilaku nonlinier (variasi 4) sangat dipengaruhi oleh konstanta K_1 dan K_2 dari lapis pondasi dan tanah dasar. Sehingga untuk menurunkan regangan tarik horizontal (ε_t), dan regangan tekan vertikal (ε_c) dapat diperoleh dengan peningkatan konstanta K_1 dan K_2 masing-masing lapisan, dimana konstanta K_1 dan K_2 dipengaruhi sifat fisik material tersebut.

V.2 Saran

Beberapa saran yang terkait dengan penelitian ini, yaitu :

1. Perlu penelitian lanjutan dalam penelitian di laboratorium mengenai karakteristik material lapis pondasi dan tanah dasar agar diperoleh korelasi data antara analisis linier dan analisis non-linier.
2. Perlu penelitian lanjutan mengenai analisis sensitivitas dengan kondisi viscoelastik lapis aspal.
3. Perlu penelitian lanjutan mengenai analisis perilaku linier dan non-linier dengan sistim 4-lapis struktur perkerasan lentur agar diperoleh gambaran lebih jelas respon struktur perkerasan yang terjadi dari kedua model tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Huang, Y.H. (1993). Program KENPAVE User's Manual. University of Kentucky, Lexington KY.

2. Huang, Y. H. (2004). Pavement Analysis and Design, 2st Ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
3. Yoder, E.J., Witczak, M.W. (1975), Prinsiples of Pavement Design, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
4. Burmister, D. M. (1943). "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways." Highway Research Record 23, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 126-144.